

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

Programa Academico de Ciencias

**BASES PARA LA SIMULACION TRIDIMENSIONAL  
DEL NUCLEO DE REACTORES TIPO PISCINA**

Tesis Para Optar el Titulo Profesional de :

**LICENCIADO EN CIENCIAS CON  
MENCION EN FISICA**

**MAXIMO S. LAZO FERRARI**

**Junio - 80 Lima**

## RESUMEN

Un problema importante en la simulación tridimensional del núcleo de un reactor por medio de programas de cálculo es establecer el reticulado óptimo el tiempo de procesamiento y las condiciones de contorno dadas por una matriz de respuesta que relaciona, la corriente neutrónica y el flujo neutrónico en el borde del núcleo.

En este trabajo se exponen los cálculos de difusión bidimensional a dos - grupos de un reactor tipo piscina con tres diferentes tipos de reticulados, y la matriz de respuesta que permite simular la corona de agua que circunda al reactor. Además se presenta la distribución de flujo bidimensional a cinco grupos de energía del Reactor Peruano de Potencia Cero en dos casos, en el primer caso, se consideran tres regiones : reflector interno, núcleo y reflector externo; y en el segundo se simula el reflector externo mediante su correspondiente matriz de - respuesta.

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera hacer presente mi más sincero agradecimiento a las personas que ayudaron a la concretización de este trabajo.

- Al Ing° C. Grant (Comisión Nacional de Energía Atómica Argentina), autor del código PUMA y con quien desarrollé el trabajo "Bases para Simulación del Núcleo de un Reactor tipo Piscina" presentado en el 2do. Encuentro Latino Americano de Tecnología Nuclear (Buenos Aires, Nov. 1979).

- Al Prof. M.Sc. César Picón Ch. (Universidad Nacional de Ingeniería, quien accedió gustosamente a asesorarme en este trabajo.

- Al Lic. Químico Ricardo Espinosa, Jefe del Reactor, por las facilidades brindadas para la realización del trabajo.

- Al Sr. Andrés Enriquez Torres (Universidad Nacional de Trujillo), por haberme brindado su abierta colaboración en la revisión de los manuscritos y confección de los diagramas.

- Al Lic. Carlos Fiestas y al Sr. Agustín Zúñiga (Instituto Peruano de Energía Nuclear) quienes colaboraron en la confección de los gráficos.

- A la Srta. Delia Barrón Coral, quien me ayudó eficientemente en el difícil trabajo de mecanografiado del trabajo.

# INDICE

	PAGINA
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
Neutrónica Fundamentos Teóricos	
1.1. Introducción	3
1.2. Ecuaciones de difusión en Teoría multigrupos	7
1.3. Factor de multiplicación	10
CAPITULO II	
Resolución del problema Neutrónico	
2.1. Introducción	12
2.2. Tratamiento del reticulado espacial	14
2.3. Tratamiento de las condiciones de contorno	17
2.4. Resolución numérica de las ecuaciones	20
CAPITULO III	
Esquema de Cálculo y Descripción de los Programas Utilizados	
3.1. Introducción	23
3.2. Descripción de los programas	24
CAPITULO IV	
Aplicaciones a reactores con geometría rectangular y cilíndrica	
4.1. Introducción	29
4.2. Reactor tipo piscina con geometría rectangular	30
4.3. Cálculo del reactor tipo piscina en el plano horizontal (X-Y)	31
4.4. Cálculo comparativo con EXTERMINATOR- II	40

4.5.	Reactor Peruano de Potencia Cero ( RP-0)	60
4.6.	Cálculo del RP-0 en el plano vertical ( R-Z)	61

## CAPITULO V

### Conclusiones

5.1.	Introducción	101
5.2.	Cálculo del reactor tipo piscina en el plano (X-Y)	101
5.3.	Cálculo comparativo con EXTERMINATOR-II	101
5.4.	Cálculo del RPO en el plano vertical (R-Z)	102
5.5.	Comparación de las distribuciones de flujo del RP-0 calculadas con la distribución de flujo medida.	102

## APENDICE I

Definiciones y Notación	104
-------------------------	-----

## APENDICE II

Ley de Fick y Validez de la Ley de Fick	110
---	-----

## APENDICE III

Determinación de las secciones eficaces multigrupo	115
--	-----

## APENDICE IV

Matrices de respuesta	118
-----------------------	-----

## APENDICE V

Problemas que se plantean en la simulación del funcionamiento de reactores nucleares.	124
---	-----

## APENDICE VI

Base para la simulación tridimensional del núcleo de un reactor tipo piscina.	132
---	-----

APENDICE VII

Esquema de un cálculo de reactor por el método de multigrupo. 133

APENDICE VIII

Resolución del problema de autovalores 139

APENDICE IX

Determinación de la distribución del flujo neutrónico en el RP-0 por activación de hojuelas 143

REFERENCIAS

INDICE DE TABLAS 154



## INTRODUCCION

El objetivo principal de este trabajo de tesis es presentar métodos de cálculo de reactores que por su simplicidad física y complejidad numérica exigen el uso de programas de cálculo para computadoras.

Se enfoca el problema de autovalores para la ecuación de difusión multigrupo ( caso estacionario). Se empieza formulando la ecuación de difusión multigrupos dependiente del tiempo, se deducen las ecuaciones correspondientes para el estado estacionario y se plantea el problema de autovalores.

Se realizan cálculos bidimensionales multigrupo con condiciones de contorno internas ( en el borde del núcleo) para un reactor tipo piscina (geometría X-Y) y el RP-0 ( geometría R-Z).

En el caso del reactor tipo piscina se realiza un estudio de optimización de la malla de cálculo.

Para el RP-0 se comparan las distribuciones de flujo térmico calculadas con las mediciones realizadas ( Ref. 26 )

El interés de presentar los cálculos neutrónicos por computadores está relacionada con la necesidad actual en el Perú de formar un grupo de trabajo que enfrente más adelante los problemas de simulación del funcionamiento de

reactores nucleares y/o sistemas análogos ( en Mecánica de Fluidos , Mecánica Estadística, etc). Los cálculos por computadoras, indirectamente permiten que los modelos físico matemáticos de partida tengan pocas aproximaciones respecto a la formulación física inicial, y por tanto los resultados sean más simples de interpretar.



## CAPITULO I

## NEUTRONICA FUNDAMENTOS TEORICOS

## 1.1. Introducción

El problema central de la Física de Reactores puede ser establecido en forma simple. Es calcular, para cualquier instante  $t$ , las características de la población neutrónica libre en una extensa región del espacio que contiene, una arbitraria, pero conocida mezcla de materiales. Específicamente queremos conocer el número de neutrones en un volumen infinitesimal  $dV$  que tienen energías entre  $E$  y  $E + dE$  y que están desplazándose en direcciones dentro de un ángulo infinitesimal de una dirección fija dada por el vector unitario.

Si este número es conocido, podemos usar los datos obtenidos experimentalmente y teóricamente de la física de neutrones de bajas energías para predecir los ritmos o tasas de las reacciones nucleares, inclusive la fisión, que tienen lugar por toda la región. Por lo tanto, podemos predecir que potencia nuclear será generada en cualquier instante en cualquier ubicación en la región.

El problema de determinar las características de la población neutrónica es simplificada por el hecho, en muchos casos de interés, la población es tan grande que los neutrones pueden ser tratados como un fluido. Luego, como en un gas, podemos hablar de la "densidad neutrónica en el espacio de fase" y no tener que ver con el problema de seguir la historia de cada neutrón. La magnitud de interés principal será luego la densidad en el espacio de fase

$N(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)$ , la cual está definida de la siguiente manera:

$N(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) dv dE d\vec{\Omega}$  es el número de neutrones, que en el instan

te  $t$ , están en un volumen infinitesimal  $dv$  incluyendo al punto  $\vec{r}$ , tienen energía cinética en un rango infinitesimal  $dE$  alrededor de  $E$ , y están viajando en una dirección contenida en el cono infinitesimal de direcciones  $d\bar{\Omega}$  alrededor de  $\bar{\Omega}$ .

Cuando el "fluido" neutrónico está presente en un medio material, los neutrones interactuarán con el material, y es describiendo estas interacciones matemáticamente que podemos derivar una ecuación que  $N(\vec{r}, \bar{\Omega}, E, t)$  debe cumplir. Específicamente, escribimos en términos matemáticos el hecho físico de que el ritmo o tasa de incremento en  $N(\vec{r}, \bar{\Omega}, E, t)$  en el instante  $t$  es la diferencia entre la tasa en la cual los neutrones son agregados al volumen  $dv$   $dE d\bar{\Omega}$  (habiendo nacido en un proceso de fisión) habiendo sido dispersados de otras energías y direcciones, o atravesando el borde de afuera hacia dentro de  $dv$ , y la tasa en la cual son removidos desde el volumen  $dv dE d\bar{\Omega}$  (habiendo sido absorbidos en un material en  $dv$ , por dispersión a otras energías y direcciones, o atravesando el borde de adentro hacia afuera de  $dv$ ), podemos derivar una ecuación integro-diferencial para  $N(\vec{r}, \bar{\Omega}, E, t)$ . Esta ecuación es la ecuación de transporte de Boltzmann. Si fuéramos capaces de resolverla, podríamos diseñar y predecir el comportamiento de reactores con una exactitud limitada solamente por incertidumbres en los datos nucleares básicos que prescriben las probabilidades de que ocurriera con un neutrón de una energía dada cuando interactúa con un átomo de un determinado material.

En vista de lo dicho se debería esperar que la física de reactores se reduciría a derivar la ecuación de Boltzmann y luego proceder a examinar las

maneras de resolverla. Sin embargo, esta aproximación introduce mucho procesos físicos complicados que se hace necesario deducir a partir de la ecuación de Boltzmann otras aproximaciones.

Una de estas aproximaciones es la teoría de difusión que permite describir como se comportan los neutrones en un medio finito compuesto de muchas regiones de materiales de diferente composición. En esta teoría las características de la población neutrónica es descrita por el flujo escalar  $\phi(\vec{r}, E, T)$  que da el número de neutrones de energía  $E$  que penetran por unidad de tiempo desde todas direcciones en una esfera de sección unitaria, con centro en  $\vec{r}$ .

En la teoría de difusión las secciones eficaces dependen del tiempo y están reacopladas con el flujo y la potencia a través de otros parámetros físicos tales como distribución de Xenón y otros isótopos, presión y temperatura del material que es refrigerante, y de los materiales que son combustible y moderador etc. Además, las operaciones de control tales como inyecciones y/o extracciones de otros materiales como Boro, Cadmio se pueden considerar como variaciones de las secciones eficaces en el tiempo.

De acuerdo con esto último es necesario formular otros modelos físicos para el tratamiento de estos parámetros adicionales de acuerdo al tipo de reactor que se quiera diseñar y/o analizar.

En la simulación del funcionamiento de un reactor, se consideran la Teoría de difusión y los modelos para los parámetros físicos adicionales. Resol

viendo el sistema de ecuaciones acopladas (utilizando esquemas numéricos y/o analíticamente) es posible simular las operaciones de control, efectos provocados por accidente, efectos debidos a venenos ( $Xe\ 135$ , sección eficaz de absorción muy grande), etc .

## 1.2. Ecuaciones de difusión en Teoría de Multigrupos

Supongamos que un sistema conste de varias regiones de propiedades neutrónicas diferentes, e imaginemos el intervalo de energías (0, 10 Mev) dividido en G zonas o grupos definidos, cada uno, por un conjunto apropiado de secciones eficaces.

Es posible deducir de la aproximación  $P_1$  de la Ecuación de Transporte con neutrones retardados y considerando la Ley de Fick que las ecuaciones cinéticas e espaciales de difusión para G grupos de energía y M precursores de neutrones retardados se expresan en la forma: [5]

$$\begin{aligned} \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g - \sigma_{Tg} \phi_g + \sum_{g' \neq g}^G \sigma_{g'g} \phi_{g'} + \\ + \sum_{m=1}^M \lambda_m S_{mg} C_m + (1-\beta) \chi_{pg} \sum_{g'=1}^G \nu \sigma_{fg'} \phi_{g'} + \\ + Q_g = \frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} \\ \beta_m \sum_{g=1}^G \nu \sigma_{fg} - \lambda_m C_m = \frac{\partial C_m}{\partial t} \end{aligned} \quad (1.1)$$

donde:  $\sigma_{g'g}$  es la sección eficaz macroscópica de transferencia del grupo  $g'$  al  $g$ .

$\sigma_{ag}$  es la sección eficaz macroscópica de absorción del grupo  $g$ .

$$\sigma_{Tg} = \sigma_{ag} + \sum_{g'=1}^G \sigma_{gg'}$$

$\nu$  es el número promedio de neutrones por fisión

$\sigma_{fg}$  es la sección eficaz macroscópica de fisión del grupo g.

$\phi_g$  es el flujo neutrónico para el grupo g en  $1/(\text{seg} \cdot \text{cm}^2)$   
 $v_g$ , es la velocidad media de los neutrones del grupo g en  $(\text{cm}/\text{seg})$ .

$Q_g = Q_g(\bar{r}, t)$ , es la fuente neutrónica del grupo g en  $(1/\text{seg} \cdot \text{cm}^3)$

$\chi_{pg}$  = fracción de neutrones prontos que se producen por fisión en el grupo g (espectro de fisión)

$C_m = C_m(\bar{r}, t)$  Concentración del precursor m en  $(1/\text{cm}^3)$

$\lambda_m$  constante de decaimiento del precursor m en  $(1/\text{seg})$

$\beta_m$  es la fracción de neutrones retardados que se producen como consecuencia del decaimiento del precursor m.

$$\beta = \sum_{m=1}^M \beta_m = \text{fracción total de neutrones retardados.}$$

$S_{mg}$  = fracción de neutrones que se producen como consecuencia del decaimiento del precursor m en el grupo g (espectro de neutrones retardados)

Las secciones eficaces, flujos y concentraciones dependen en general del espacio y del tiempo. Pueden estar además recopiladas a través de parámetros adicionales: concentración de Xenón, parámetros termohidráulicos, etc.

Si definimos los vectores y matrices como :

$$\Psi = \text{col} (\phi_1, \dots, \phi_G, c_1, \dots, c_M)$$

$$V^{-1} = \text{diag} (1/V_1, \dots, 1/V_G, 1, \dots, 1)$$

$$R = \text{col} (Q_1, \dots, Q_G, 0, \dots, 0)$$

las ecuaciones fundamentales en (1.1) pueden escribirse en la forma:

$$M\Psi = V^{-1} \frac{\partial \Psi}{\partial t} - R \quad (1.2)$$

donde los elementos de la matriz M se deducen fácilmente.

Para un estado estacionario esta ecuación matricial se convierte en:

$$M\Psi = -R \quad (1.3)$$

lo que expresado explícitamente, luego de algunas transformaciones, nos da:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g - \sigma_{Tg} \phi_g + \sum_{g' \neq g}^G \sigma_{g'g} \phi_{g'} + \\ + \chi_{Eg} \sum_{g'=1}^G \nu \sigma_{Tg'} \phi_{g'} = -Q_g \end{aligned} \quad (1.4)$$

Siendo  $\chi_{Eg}$  el "espectro estático" dado por :

$$\chi_{Eg} = (1-\beta) \chi_{Pg} + \sum_{m=1}^M \beta_m S_{mg}$$

Si definimos ahora los vectores

$$\phi = \text{col} (\phi_1, \dots, \phi_G)$$

$$Q = \text{col} (Q_1, \dots, Q_G)$$

la ecuación puede expresarse :

$$H \phi = - Q$$

### 1.3. Factor de la Multiplicación

Uno de los problemas más usuales en el diseño y análisis de reactores es la determinación del factor de multiplicación, representado por  $K$ , que definiremos a continuación.

La existencia de soluciones estacionarias de la ecuación de difusión multigrupo, es decir independiente del tiempo ( $\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$ ), implica que la población de neutrones que se producen en el sistema se iguala con el de neutrones que se elimina, ya sea por absorción o por fuga. Esta situación puede darse en un sistema sin fuentes externas, en el cual los neutrones se originan fundamentalmente en las fisiones, cuando el sistema está formado por una relación adecuada de material fisionable y de material absorbente, como sucede en un reactor. Dado que las fugas pueden verse como absorciones, el volumen del sistema también interviene en el balance neutrónico. En el caso de que la absorción sea mayor que la producción de neutrones, el estado estacionario puede mantenerse con una fuente externa. El caso de mayor interés es el primero - es decir sin fuente externa, y se estudia introduciendo en la ecuación de difusión el factor  $K$ , que modifica el número de neutrones producidos por fisión, de manera de obtener el estado estacionario.



Siendo  $K$  un factor que divide el número de neutrones por fisión, si  $K > 1$ , la producción es mayor que la absorción, es decir que la población de neutrones aumenta indefinidamente; si  $K = 1$ , la producción es igual a la absorción y el sistema es crítico, mientras que  $K < 1$  indica que es necesario aumentar la producción de neutrones por lo que el sistema es subcrítico. En este último caso la población disminuye con el tiempo.

Introduciremos  $K$  en la ecuación de difusión.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g - \sigma_{Tg} \phi_g + \sum_{g' \neq g}^G \sigma_{g'g} \phi_{g'} + \\ + \frac{\chi_{Eg}}{K} \sum_{g'=1}^G \sigma_{Tg'} \phi_{g'} = 0 \end{aligned} \quad (1.5)$$

Matemáticamente, el factor  $K$  que es introducido es un autovalor de la ecuación, por lo que usualmente se denomina problema de autovalores al estudio de la criticidad de un sistema. Los flujos son en este caso las autofunciones del sistema.

Si definimos el vector :

$$\phi_E = \text{col} (\phi_1, \dots, \phi_G)$$

La ecuación de autovalores puede expresarse

$$H_E \phi_E = 0 \quad (1.6)$$

## CAPITULO II

### RESOLUCION DEL PROBLEMA NEUTRONICO

#### 2.1. Introducción

El problema neutrónico en la teoría de difusión multigrupo puede ser resuelto analíticamente en el caso unidimensional, previo desacople de las ecuaciones por medio de una diagonalización. Pero este modelo tiene muchas limitaciones, dadas las heterogeneidades presentes en el reactor, debida a los materiales que cumplen la función de combustible, moderador, reflector, refrigerante y control. Se hace necesario en el análisis de reactores nucleares otros métodos que permitan resolver el problema neutrónico con más detalle. Uno de estos métodos es asociar a la ecuación diferencial de difusión una ecuación en diferencias finitas y a esta ecuación, un esquema numérico; este esquema numérico se traduce en un algoritmo que puede ser programado en un lenguaje adecuado para que pueda ser procesado en una computadora y calcular las distribuciones de flujos, potencia y/o resolver el problema de autovalores.

En el presente Capítulo se plantean las ecuaciones en diferencias para el caso tridimensional y se plantea el esquema iterativo de Gauss-Seidel, además el método de sobre relajación que permite acelerar la con-

vergencia de flujos.

## 2.2. Tratamiento del reticulado espacial

La discretización de las ecuaciones cinéticas e espaciales se realiza tomando flujos en el centro de los paralelepípedos determinados por el reticulado espacial.

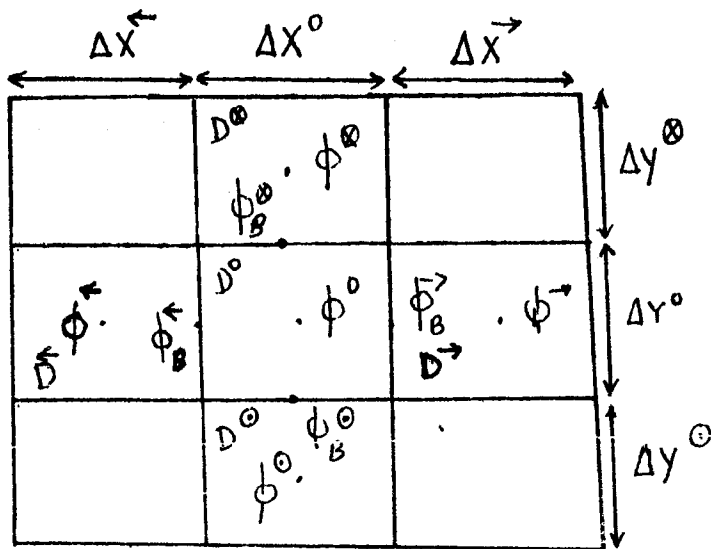


FIG. 2.1  
Proyección  
X-Y del  
reticulado

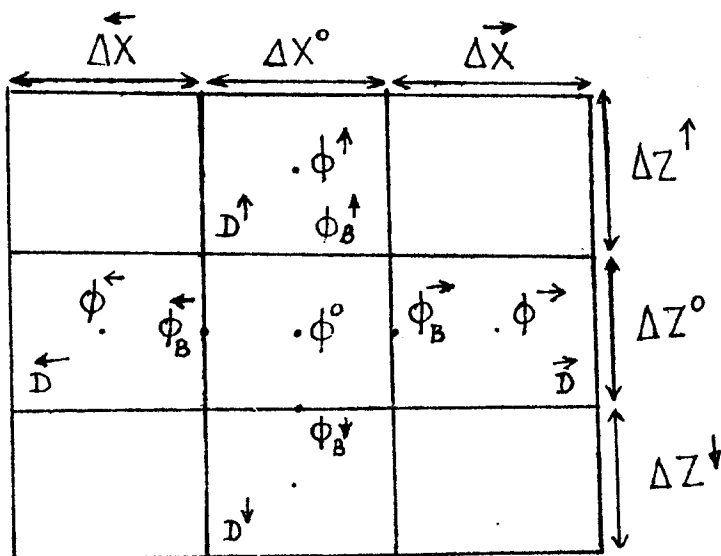


FIG. 2.2  
Proyección  
X-Z del  
reticulado

En las figuras 2.1 y 2.2 se dan para geometría cartesiana los parámetros necesarios para discretizar las ecuaciones cinéticas espaciales.

Los símbolos  $\rightarrow, \leftarrow, \otimes, \odot, \uparrow, \downarrow$  significan "derecha", "izquierda", "atras", "adelante", "arriba" y "abajo" respectivamente.

Se procede entonces integrando en el paralelepípedo central las ecuaciones estacionarias (1.5)

Para ello consideremos primero el término aplicando el teorema de Gauss :

$$-\int dv \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g = \int_{S^{\otimes}} J^{\otimes} ds + \int_{S^{\odot}} J^{\odot} ds + \int_{\vec{S}} J^{\rightarrow} ds + \int_{\vec{S}} J^{\leftarrow} ds + \int_{S^{\uparrow}} J^{\uparrow} ds + \int_{S^{\downarrow}} J^{\downarrow} ds$$

Consideremos para simplificar el tercer término de (2.1)

$$\int_{\vec{S}} J^{\rightarrow} ds \cong 2 \vec{S} D^{\circ} \frac{\phi_B - \phi^{\circ}}{\Delta X^{\circ}}$$

y como en el borde derecho se impone la condición de continuidad de flujos y corrientes :

$$D^{\circ} \frac{\phi_B^{\rightarrow} - \phi^{\circ}}{\Delta X^{\circ}} = D^{\rightarrow} \frac{\phi^{\rightarrow} - \phi_B^{\rightarrow}}{\Delta X^{\rightarrow}} \quad (2.3)$$

la que reemplazada en la (2.2) nos da

$$\int_{\vec{s}} \vec{J} ds \cong 2 \vec{s} \frac{\phi - \phi^{\circ}}{\frac{\Delta X}{D^{\vec{I}}} + \frac{\Delta X^{\circ}}{D^{\circ}}}$$

Cambiando en símbolo  $\rightarrow$  en (2.4) sucesivamente por  $\leftarrow$

$\otimes, \odot, \uparrow$  y  $\downarrow$ , se obtienen los demás términos de la (2.1)

Si utilizamos la notación

$$\Delta V_0 = \Delta X_0 \Delta y_0 \Delta z_0$$

$$\sigma_{Tg}^{\circ} = \sigma_{Tg} \cdot \Delta V_0$$

$$\sigma_{g'g}^{\circ} = \sigma_{g'g} \cdot \Delta V_0$$

$$\nu \sigma_{fg}^{\circ} = \nu \sigma_{fg} \cdot \Delta V_0$$

la ecuación de autovalores discretizada toma la forma

$$\sum_{I=\{\rightarrow, \leftarrow, \uparrow, \downarrow, \otimes, \odot\}} 2 S^I \frac{\phi_g^I - \phi_g^{\circ}}{\frac{\Delta X^I}{D_g^I} - \frac{\Delta X^{\circ}}{D_g^{\circ}}} - \sigma_{Tg}^{\circ} \phi_g^{\circ} + \sum_{g' \neq g} \sigma_{g'g}^{\circ} \phi_g^{\circ} +$$

$$+ \frac{\chi_{Eg}}{k_e} \sum_{g'} \nu \sigma_{fg'}^{\circ} \phi_{g'}^{\circ} = 0$$

Las ecuaciones (2.5) son válidas también para la simetría cilíndrica  $(R - \varphi - Z)$  con sólo reemplazar los parámetros geométricos  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, S, \Delta V_0)$  por sus expresiones o símbolos equivalentes.

### 2.3. Tratamiento de las condiciones de contorno

#### a) Flujo nulo en el borde del reactor

Si suponemos que a la derecha se asume flujo nulo en el flujo en el borde  $\phi_B^{\rightarrow}$ , entonces la (2.4) se transforma en

$$\int_{\vec{S}} \vec{J} ds \cong -2 S^{\rightarrow} \frac{D_0}{X_0} \phi_0 \quad (2.6)$$

lo que se deduce directamente haciendo  $\phi_B^{\rightarrow} = 0$  en la (2.2).

De manera análoga se procede para una condición de flujo nulo en cualquier otra dirección.

#### b) Corriente nula en el borde del reactor

Si fuera a la derecha, se hace directamente

$$\int_{\vec{S}} \vec{J} ds = 0$$

y del mismo modo para cualquier otra dirección.

#### c) Condiciones de contorno internas

Son del tipo:

$$J_g = \sum_{h=1}^G \alpha_{gh} \phi_h$$

en algún borde de un elemento del reticulado . Para simplificar podemos utilizar la notación matricial

$$J = M \phi \quad (2.7)$$

donde la matriz M es denominada " Matriz de Respuesta" y

$$J = \text{col} (J_1, \dots, J_B)$$

$$\phi = \text{col} (\phi_1, \dots, \phi_B)$$

Si planteamos esta condición a la derecha resulta :

$$\int_{\vec{S}} \vec{J}_B dS \cong \vec{S} D^\circ \frac{\phi_B - \phi_0}{\Delta X_0/2} \quad (2.8)$$

donde  $D^\circ$  es la matriz diagonal

$$D^\circ = \text{diag} (D_1^\circ, \dots, D^\circ)$$

$$\text{y como : } \vec{J}_B \cong D^\circ \frac{\phi_B - \phi_0}{\Delta X_0/2} \cong M \phi_B$$

despejando  $\phi_B$  y reemplazándolo en (2.8)

$$\int_{\vec{S}} \vec{J}_B dS \cong \frac{2 \vec{S} D^\circ}{\Delta X_0} \left[ \left( I - \frac{\Delta X_0}{2} D^{\circ-1} M \right)^{-1} - I \right] \phi_0 \quad (2.9)$$



En el caso de que sea la norma

$$\left\| \frac{\Delta X_0}{2} D^{o-1} M \right\| < 1$$

puede utilizarse el desarrollo en serie

$$\int_{\vec{S}} \vec{J}_B ds = \vec{S} M \sum_{i=0} \left( \frac{\Delta X_0}{2} D^{o-1} M \right)^i \phi_0 \quad (2.10)$$

para evitar errores de redondeo en el cálculo.

d) Flujo nulo en el contorno extrapolado

Este es un caso particular del anterior en que se impone la condición.

$$J_{Bg} = -\alpha_g \phi_g \quad (2.11)$$

en la que  $\alpha_g$  surge de la distancia de extrapolación  $d_g$  :

$$\alpha_g = D_g d_g \quad (2.12)$$

Para este caso particular, se si impone la condición a la derecha del elemento , la (2.9) se transforma en :

$$\int_{\vec{S}} \vec{J}_B ds = -2 \frac{\vec{S}}{\Delta X_0} \frac{\alpha_g}{1 + \frac{\Delta X}{2 D_g^o} \alpha_g} \phi_0$$

## 2.4. Resolución numérica de las ecuaciones

Las ecuaciones (2.5) surgidas de la discretización espacial de las

(1.5) (problema de autovalores), si denominamos para la celdilla :

$$a_{gi}^I = \frac{2S^I}{\frac{\Delta X^I}{D_{gi}^I} + \frac{\Delta X^o}{D_{gi}^o}} \quad I = \{ \uparrow, \rightarrow, \downarrow, \leftarrow, \otimes, \odot \}$$

$$a_{gi} = \sum_I a_{gi}^I + \sigma_{Tgi}^o$$

resulta el siguiente proceso iterativo, según el método de Gauss-Seidel,

para la ecuación (2.5)

$$\begin{aligned} \phi_{gi}^{(j+1)} = \frac{1}{a_{gi}} & \left\{ a_{gi}^{\downarrow} \phi_{gi}^{\downarrow(j+1)} + a_{gi}^{\leftarrow} \phi_{gi}^{\leftarrow(j+1)} + a_{gi}^{\otimes} \phi_{gi}^{\otimes(j+1)} + \right. \\ & + a_{gi}^{\uparrow} \phi_{gi}^{\uparrow(j)} + a_{gi}^{\rightarrow} \phi_{gi}^{\rightarrow(j)} + a_{gi}^{\odot} \phi_{gi}^{\odot(j)} + \\ & + \sum_{g'=1}^{g-1} \sigma_{g'gi}^o \phi_{g'i}^{(j+1)} + \sum_{g'=g+1}^G \sigma_{g'gi}^o \phi_{g'i}^{(j)} + \\ & \left. + \frac{\chi_{Eg}}{k_e^{(j)}} \left[ \sum_{g'=1}^{g-1} \nu \sigma_{fg'i} \phi_{g'i}^{(j+1)} + \sum_{g'=g}^G \nu \sigma_{fg'i} \phi_{g'i}^{(j)} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

donde el orden de cálculo se realiza, primero de menor a mayor grupo, luego de abajo hacia arriba, después de izquierda a derecha y finalmente de atrás hacia adelante.

El proceso iterativo empieza con una estimación inicial de  $K$ , y del flujo para todas las celdillas, esto es dar  $K^{(0)}$  y los vectores

$$\left\{ \tilde{\phi}_g^{(0)} \right\} = \left\{ \text{col} \left( \phi_{1g}^{(0)}, \dots, \phi_{ng}^{(0)} \right) \right\} \quad \text{para } n \text{ celdillas y}$$

los  $G$  grupos, y luego reemplazamos estos valores en el segundo miembro de (2.11). Resolviendo la ecuación, según el orden de cálculo obtenemos una nueva estimación del vector  $\tilde{\phi}_g$  que llamamos  $\tilde{\phi}_g^{(1)}$ , y así para todos los grupos. Luego se hace un estimado de  $K^{(1)}$  utilizando el recurso:

$$K^{(j+1)} = \frac{\nu_F^{(j+1)}}{\nu_F^{(j)} / K^{(j)}}$$

$$\text{donde: } \nu_F^{(j)} = \int \sum_{g'=1}^G \nu \sigma_f g' \phi_{g'}^{(j)} dV$$

este recurso se deduce interpretando a  $K$  como la relación entre el número de neutrones en sucesivas generaciones, siendo la fisión el evento que da origen a una generación de neutrones. Según esto  $K^{(j+1)}$  iteraciones y puede calcularse como la relación entre el número total de neutrones originados en las fisiones producidas por el flujo de la generación  $(j+1)$  ( $\phi^{(j+1)}$ ) y la fuente utilizada para su cálculo, es decir el número total de neutrones origi-

nadas en las fisiones producidas por el flujo de la generación (j) ( $\phi^{(j)}$ ).

Y además en cada iteración puede calcularse además un valor mejorado del flujo mediante un coeficiente de sobre relajación :

$$\phi_g^{(j+1)} \text{ (mejorado)} = \phi_g^{(j)} + \beta (\phi_g^{(j+1)} - \phi_g^{(j)})$$

Puede probarse que este proceso converge a la solución correcta. Usualmente se itera hasta que se cumpla la condición :

$$\frac{\|\phi^{(j+1)} - \phi^{(j)}\|}{\|\phi^{(j)}\|} < E$$

donde E es un número pequeño , generalmente entre  $1E^{-2}$  y  $1E^{-5}$ , según la precisión requerida para el problema, y las dobles barras  $\|\ \|\$  indican la norma del vector.

## CAPITULO III

### ESQUEMAS DE CALCULO Y DESCRIPCION DE LOS PROGRAMAS UTILIZADOS

#### 3.1. Introducción

En la actualidad existen muchos programas de cálculo que resuelven el problema de difusión multigrupo. Estos programas se diferencian por geometría de los sistemas que tratan (uni, bi ó tridimensional), métodos aproximados utilizados ( métodos de síntesis, modales, matrices de respuesta, etc) por las opciones en cuanto a entrada y salida de parámetros neutrónicos, etc. Es problema del especialista decidir qué programa utilizar y cómo.

En el presente trabajo se han utilizado tres programas. Uno de ellos (PUMA) permite la simulación del funcionamiento del reactor, el segundo (BORDE) es un código unidimensional que calcula condiciones de contorno internas y el tercero ( EXTERMINATOR -II) es un programa bidimensional ( conocido por los diseñadores y calculistas ).

### 3.2. Esquema de Cálculo

Los programas de cálculo utilizados son los códigos de difusión multigrupo PUMA, EXTERMINATOR-II y un programa auxiliar unidimensional multigrupo (BORDE) que permite obtener aproximadamente las condiciones de contorno en el borde del núcleo.

El esquema de cálculo utilizado básicamente es el siguiente :

- 1o. Cálculo del reactor de una dimensión, en la zona del reflector y determinación de las condiciones de contorno en el borde del núcleo en la forma  $J = M \phi$  con el programa auxiliar BORDE.
- 2o. Cálculo del reactor en dos dimensiones resolviendo la ecuación de difusión multigrupo por diferencias finitas. Así se obtienen distribuciones de flujo y el valor de la reactividad para cada malla de cálculo y se comparan resultados con mallas gruesas y finas en cada zona. Estos cálculos se realizaron en el programa PUMA y un cálculo comparativo con el programa EXTERMINATOR -II.

### 3.3. Descripción de los programas utilizados

#### Programa 1:

- A. Denominación del programa : PUMA
- B. Computadora para la cual el programa ha sido diseñado : PUMA es un programa independiente del tipo de computadora esto es que

puede ser procesada en cualquier computadora que tenga un compilador PL/I

- C. Naturaleza del problema que resuelve : Simulación del funcionamiento de reactores en geometrías  $X, Y, Z, \phi, R, Z, \theta$  . Resuelve la ecuación de difusión multigrupo.
- D. Método de solución : Se utiliza el esquema numérico de Gauss-Seidel para resolver las ecuaciones en diferencias finitas correspondientes a la ecuación de difusión multigrupo. La estructura modular del programa permite acoplar un modelo termohidráulico con el correspondiente sistema en diferencias.
- E. Características no usuales del programa
1. Se pueden imponer las condiciones de contorno exteriores-flujo nulo, corriente nula, flujo nulo en el contorno extrapolado y condiciones de contorno internas (dadas con matrices de respuesta).
  2. Se pueden resolver problemas de autovalores estacionario y dinámico. Permite la búsqueda de criticidad. Y se pueden simular todas las evoluciones del reactor incluyendo un modelo termohidráulico y una estrategia de recambio de combustible.
  3. El programa calcula flujos adjunto y hace cálculo de pertur-

baciones.

- F. Estado actual : Un uso .El programa ha sido desarrollado en la -  
CNEA en Argentina en 1978.
- G. Requerimientos sobre la computadora : se requiere una máquina -  
que tenga un mínimo de 192K palabras de memoria.

### Programa 2

- A. Denominación del programa : BORDE
- B. Computadora para lo cual el programa ha sido diseñado: BORDE es  
un programa que puede ser procesado en cualquier computadora que  
tenga un compilador PL/1
- C. Naturaleza del problema que resuelve : Resuelve la ecuación de -  
difusión unidimensional multigrupo, calculando condiciones inter -  
nas, en geometrías rectangular y cilíndrica.
- D. Método de solución : se resuelve analíticamente las ecuaciones de  
difusión en medios no multiplicativos, previo desacople de las ecu  
ciones por medio de una diagonalización y luego determinando la  
matriz M que relaciona el flujo y la corriente en el borde -  
interior.
- E. Características no usuales del programa :



- 1.- Se pueden imponer condiciones internas o externas. La condición externa de distancia extrapolada es asumida por el programa.
  - 2.- El programa permite dispersión de neutrones de cualquier grupo a cualquier otro grupo.
- F. Estado actual : En uso. El programa ha sido desarrollado en la CNEA en Argentina en 1979. Presentado en el 2do Encuentro Latinoamericano de Tecnología Nuclear en Buenos Aires, Nov. 1979.
- G. Requerimiento sobre la computadora :
- Se requiere una máquina que tenga un mínimo de 192K palabras de memoria.

### Programa 3

- A. Denominación del programa : EXTERMINATOR -II
- B. Computadora para la cual el programa ha sido diseñado : EXTERMINATOR-II es un programa independiente del tipo de computadora es decir que puede ser procesado por cualquier computadora que tenga un compilador FORTRAN -IV.
- C. Naturaleza del problema que resuelve : Resuelve la ecuación de difusión bidimensional multigrupo en geometrías  $X, Y, R, Z$ ; o  $R, \theta$
- D. Método de Solución : El método equipoise es empleado para resol -

ver las ecuaciones en diferencias correspondientes a las ecuaciones de difusión multigrupo.

E. Características no usuales del programa

1. Se pueden imponer tres tipos de condiciones de contorno exteriores - flujo nulo, derivada normal de flujo nula, o condición de periodicidad.
2. El programa permite dispersión de neutrones de cualquier grupo a cualquier otro grupo.
3. Se pueden resolver problemas de autovalores, problemas con fuente constante y búsqueda de densidad de nucleídos, por iteración directa.
4. Los efectos del factor de multiplicación y los flujos debido a concentración en equilibrio de Xenón pueden ser tomados en cuenta.
5. El código calcula flujo adjunto y hace cálculos de perturbaciones.

F. Estado actual : En uso. El programa a sido catalogado en Octubre 1979, en la computadora IBM 370/138 a la que tiene acceso el centro de cómputo del Ministerio de Energía y Minas.

○ Requerimientos sobre la computadora :

Se requiere una máquina que tenga un mínimo de 64K palabras de memoria y cinco dispositivos de I/O para memoria temporal.

## CAPITULO IV

### APLICACIONES A REACTORES CON GEOMETRIA RECTANGULAR Y CILINDRICA

#### 4.1. Introducción

Tomando como ejemplo un reactor tipo piscina (geometría X-Y) y el RP-0 (geometría R-Z) se realizaron cálculos bidimensionales a 2 y 5 grupos de energía, con los programas PUMA y BORDE, determinando la distribución de flujo y el valor del factor de multiplicación efectiva.

En el caso del reactor tipo piscina se dan los resultados para varios tipos de malla de cálculo.

Finalmente se realizó un cálculo con EXTERMINATOR -II para compararlos con los resultados obtenidos con el programa PUMA.

#### 4.2. Reactor Tipo Piscina con geometría rectangular.

El núcleo del reactor consta de un máximo de 5 x 6 elementos combustibles tipo MTR, rodeados por un reflector de grafito y agua. El combustible es uranio enriquecido al 20% en U - 235, contenido en una vaina de aluminio.

Este sistema se encuentra inmerso en una piscina cilíndrica de agua con paredes de hormigón, en la que ambos elementos actúan como blindaje frente a la radiación y parcialmente, como reflector de neutrones.

A continuación se detallan las especificaciones del reactor que han sido utilizados en el cálculo bidimensional.

##### Generalidades

Potencia máxima : 10 MW

##### Núcleo

Moderador y refrigerante : Agua ligera

Reflector : Grafito

Blindaje biológico : Agua ligera en la parte superior, agua ligera y hormigón como blindaje lateral.

Número máximo de elementos combustibles : 30 formando un rectángulo de 5 x 6.

Número de elementos reflectores : 20

### Combustible

Tipo : MTR

Dimensiones totales del elemento : 7.6 x 8.1 x 61.5 cm.

Enriquecimiento del uranio : 20 por ciento

### Reflector

Reflector lateral : bloques de grafito de 7.6 x 8.1 cm.

### Cajas de irradiación

Número : 6 cajas de 7.6 x 8.1 cm

## 4.3. Cálculo del reactor tipo piscina en el plano horizontal (X-Y)

El cálculo se efectuó con el programa auxiliar que permite construir las matrices de respuesta mediante un cálculo unidimensional (Método Analítico) y luego con el programa que efectúa el cálculo de difusión - multigrupo.

Los datos de entrada del programa auxiliar son las constantes multigrupo del agua y el espesor. Las matrices respuestas obtenidas se dan en la Tabla 4.2.

Los datos de entrada del programa de difusión multigrupo fueron :

- a) Especificación del reticulado ( Ver Fig. 4.1. )
- b) Constantes macroscópicas ( Tabla 4.1 )

los resultados para los casos en los que se varía la malla de cálculo se dan en las tablas 4.3 y 4.4.

Los programas fueron procesados en una computadora IBM 370/158. Se especificaron para todos los casos.

### Datos Generales

Precisión de flujo = 0.0001

Energía por fisión = 202 Mev

Altura activa del elemento combustib. = 61.5 cm

Potencia = 10 MW/ 61.5

TABLA 4.1

## CONSTANTES MACROSCOPICAS

MATERIAL	$D_1$ (cm)	$D_2$ (cm)	$\sigma_{f1}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\sigma_{f2}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\sigma_{12}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\sigma_{21}$ (cm <sup>-1</sup> )
Combustible	1.487	2.517E-1	3.679E-3	6.166E-2	2.478E-2	0.0
Grafito	8.89E-1	6.227E-1	4.721E-6	3.838E-4	1.844E-3	3.455E-11
Cajas de Irradiación	1.303	2.227E-1	4.484E-4	1.781E-2	3.552E-2	1.092E-4
Agua	1.229	1.601E-1	4.55E-4	1.895E-2	4.81E-2	9.914E-5

COMBUSTIBLE

(cm<sup>-1</sup>)

$\sigma_{f1} = 2.293E-3$

$\sigma_{f2} = 1.001E-1$

$\sigma_{11} = 9.131E-4$

$\sigma_{12} = 4.079E-2$

FIGURA 4.1.

MALLA 18 x 20

COMBUSTIBLE

REFLECTOR 2

CAJA DE IRRADIACIONES 3

20.

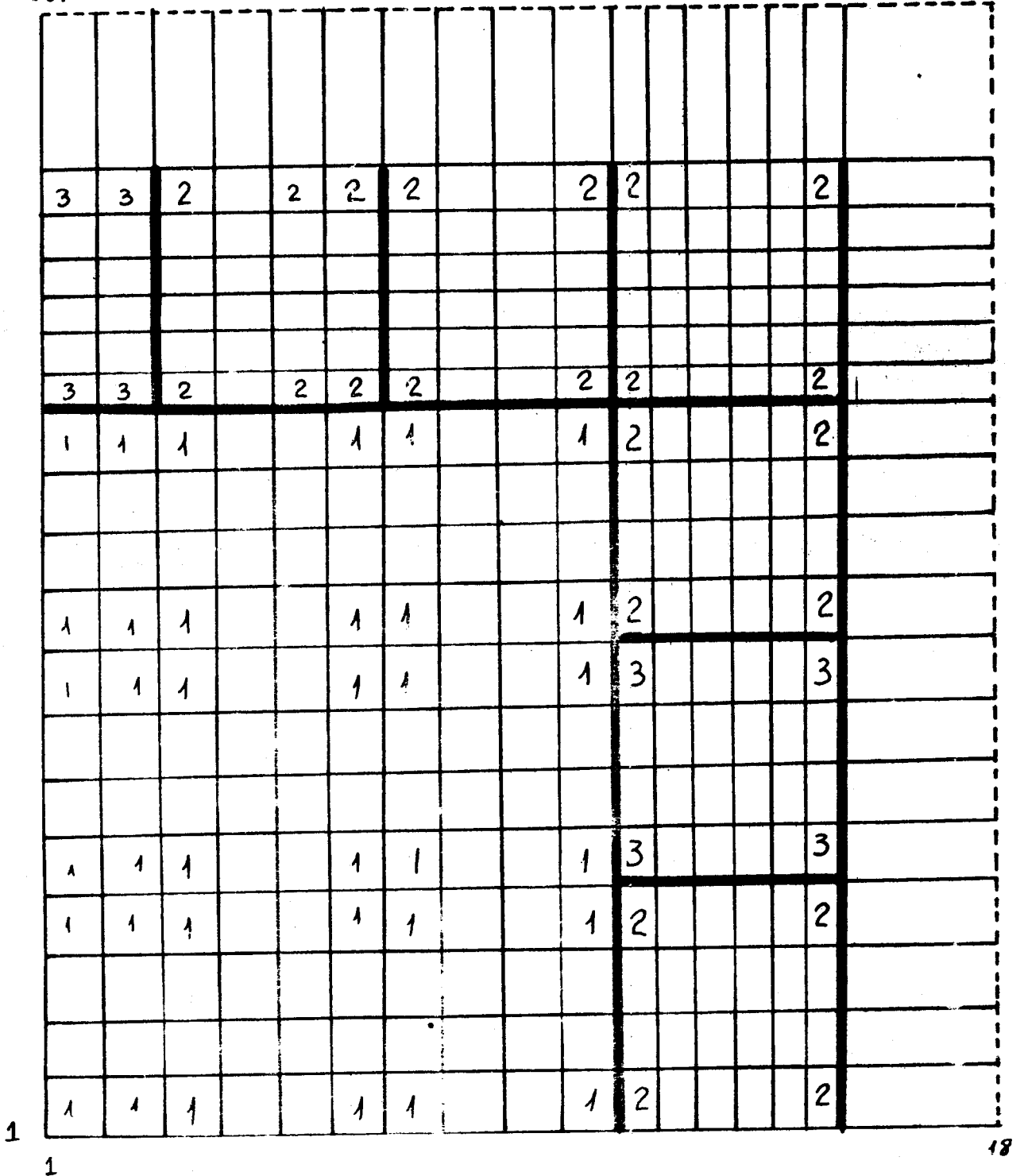








TABLA 4.2

## MATRIZ DE RESPUESTA

## CONDICIONES DE CONTORNO CALCULADAS

ZONA	ESPELOR (cm)	$M_{11}$	$M_{12}$	$M_{21}$	$M_{22}$
AGUA	26.515	-2.51958E-1	1.79062E-4	8.68872E-2	-5.58067E-2
ACU	23.381	2.5554E-1	1.7757E-4	8.61633E-2	-5.60819E-2

TABLA 4.3

## TIEMPOS Y NUMERO DE ITERACIONES

MALLA*	TIEMPO CPU (Seg)	ITERACIONES (Convergencia del flujo)		TIEMPOS DE CALCULO (MIN)		
		Número	Tiempo (min)	Flujos Medios	Contantes de malla	Total de Procesamiento
18 x 20	39.12	59	0.476	0.045	0.029	0.6388
14 x 15	24.11	37	0.242	0.042	0.022	0.3874
13 x 14	22.60	39	0.220	0.039	0.020	0.3622

\* Procesados en una IBM 370 / 158

TABLA 4.4.

## FLUJOS, FACTOR DE MULTIPLICACION, FACTOR DE FORMA

MALLA*	K	FLUJOS MEDIOS ( m/cm <sup>2</sup> . seg )					
		EN EL COMBUSTIBLE		EN EL REACTOR		FACTOR DE FORMA	
		Rápido x 1E14	Térmico x 1E13	Rápido x 1E13	Térmico x E13	Rápido	Térmico
18 x 20	1.10570	1.75291	6.63389	8.92138	4.64718	1.36279	1.29859
14 x 15	1.10614	1.75472	6.63349	8.92602	4.62885	1.36405	1.30130
13 x 14	1.10461	1.76195	6.63187	8.94122	4.6784	1.36497	1.30774

\* FACTOR DE FORMA =  $\phi_{Max} / \bar{\phi}$

#### 4.4. Cálculo Comparativo con EXTERMINATOR -II

Los datos de entrada del programa EXTERMINATOR -II son básicamente :

- a) Especificación del reticulado
- b) Constantes macroscópicas ( Tabla 4.1.)

Los resultados del cálculo se dan en la Tabla 4 .5

MALDA PARA EL CALCULO CON EXTERMINATOR -II

13

	3	3	2	2	2	2	2	2		2		
	3	3	2	2	2	2	2					
	3	3	2	2	2	2	2			2		
	1	1	1	1	1	1	1	2		2		
	1	1	1	1	1	1	1					
	1	1	1	1	1	1	1	2		2		
	1	1	1	1	1	1	1	3		3		
	1	1	1	1	1	1	1	3		3		
	1	1	1	1	1	1	1	2		2		
	1	1	1	1	1	1	1	2		2		
	1	1	1	1	1	1	1	2		2		

2

1

1 2

12

TABLA 4.5

CALCULO COMPARATIVO CON EXTERMINATOR -II

MALLA	K	TIEMPO CPU (SEG)	NUMERO DE ITERA CIONES CONVER GENCIA DEL FLUJO
12 x 13	1.10728	18.79	34



TABLA 4.6.

DISTRIBUCION DE FLUJO POR PUNTOS

RETICULADO 18*20				PLANO Y # 3							
REACTOR TIPO				PLANO X #							
PISCINA				PLANO Y # 3							
CALC. BID.				PLANO X #							
GRUPO 1				PLANO Y # 3							
PLANO Y #	PLANO X #			PLANO Y #	PLANO X #			PLANO Y #	PLANO X #		
1	2.4447E	14		1	2.3900E	14		9	1.5445E	14	
2	2.4237E	14		2	2.3693E	14		10	1.3393E	14	
3	2.3819E	14		3	2.3280E	14		11	1.0871E	14	
4	2.3198E	14		4	2.2665E	14		12	9.0259E	13	
5	2.2381E	14		5	2.1853E	14		13	7.4500E	13	
6	2.1380E	14		6	2.0851E	14		14	6.0920E	13	
7	2.0207E	14		7	1.9668E	14		15	4.9143E	13	
8	1.8875E	14		8	1.8313E	14		16	3.8964E	13	
9	1.7394E	14		9	1.6791E	14					
10	1.5746E	14		10	1.5090E	14		PLANO Y # 6			
11	1.3733E	14		11	1.3027E	14		PLANO X #			
12	1.1745E	14		12	1.1035E	14		1	2.1765E	14	
13	9.8831E	13		13	9.2183E	13		2	2.1577E	14	
14	8.1374E	13		14	7.5545E	13		3	2.1200E	14	
15	6.4923E	13		15	6.0146E	13		4	2.0633E	14	
16	4.9297E	13		16	4.5664E	13		5	1.9872E	14	
				PLANO Y # 4							
				PLANO X #							
				1	2.3359E	14		6	1.8916E	14	
				2	2.3155E	14		7	1.7757E	14	
				3	2.2749E	14		8	1.6375E	14	
				4	2.2142E	14		9	1.4717E	14	
				5	2.1338E	14		10	1.2651E	14	
				6	2.0340E	14		11	1.0178E	14	
				7	1.9151E	14		12	8.4072E	13	
				8	1.7772E	14		13	6.9197E	13	
				9	1.6193E	14		14	5.6569E	13	
				10	1.4386E	14		15	4.5770E	13	
				11	1.2188E	14		16	3.6504E	13	
				12	1.0196E	14		PLANO Y # 7			
				13	8.4535E	13		PLANO X #			
				14	6.9070E	13		1	2.0722E	14	
				15	5.5094E	13		2	2.0548E	14	
				16	4.2095E	13		3	2.0197E	14	
				PLANO Y # 5							
				PLANO X #							
				1	2.2645E	14		4	1.9665E	14	
				2	2.2448E	14		5	1.8948E	14	
				3	2.2053E	14		6	1.8041E	14	
				4	2.1461E	14		7	1.6936E	14	
				5	2.0673E	14		8	1.5615E	14	
				6	1.9688E	14		9	1.4028E	14	
				7	1.8503E	14		10	1.2054E	14	
				8	1.7103E	14		11	9.6999E	13	
								12	8.0129E	13	
								13	6.5953E	13	
								14	5.3919E	13	
								15	4.3633E	13	
								16	3.4808E	13	

(CONTINUACION)

PLANO Y	#	8
PLANO X	1x	
1	1.9518E	14
2	1.9363E	14
3	1.9048E	14
4	1.8566E	14
5	1.7909E	14
6	1.7071E	14
7	1.6047E	14
8	1.4826E	14
9	1.3373E	14
10	1.1585E	14
11	9.4290E	13
12	7.8346E	13
13	6.4671E	13
14	5.2888E	13
15	4.2677E	13
16	3.3865E	13

PLANO Y	#	9
PLANO X	1x	
1	1.8147E	14
2	1.8020E	14
3	1.7757E	14
4	1.7341E	14
5	1.6760E	14
6	1.6008E	14
7	1.5084E	14
8	1.3991E	14
9	1.2725E	14
10	1.1280E	14
11	9.5618E	13
12	7.9902E	13
13	6.6143E	13
14	5.3973E	13
15	4.3034E	13
16	3.2897E	13

PLANO Y	#	10
PLANO X	1x	
1	1.6590E	14
2	1.6506E	14
3	1.6321E	14
4	1.5994E	14
5	1.5505E	14
6	1.4850E	14
7	1.4032E	14
8	1.3062E	14

9	1.1950E	14
10	1.0699E	14
11	9.1889E	13
12	7.7434E	13
13	6.4395E	13
14	5.2589E	13
15	4.1775E	13
16	3.1684E	13

PLANO Y	#	11
PLANO X	1x	
1	1.4792E	14
2	1.4778E	14
3	1.4727E	14
4	1.4525E	14
5	1.4146E	14
6	1.3593E	14
7	1.2880E	14
8	1.2020E	14
9	1.1025E	14
10	9.8967E	13
11	8.5198E	13
12	7.2010E	13
13	6.0046E	13
14	4.9119E	13
15	3.9020E	13
16	2.9574E	13

PLANO Y	#	12
PLANO X	1x	
1	1.2611E	14
2	1.2706E	14
3	1.2949E	14
4	1.2925E	14
5	1.2670E	14
6	1.2223E	14
7	1.1609E	14
8	1.0845E	14
9	9.9411E	13
10	8.8889E	13
11	7.5834E	13
12	6.4073E	13
13	5.3560E	13
14	4.3936E	13
15	3.4982E	13
16	2.6537E	13

PLANO Y	#	13
PLANO X	1x	
1	1.0020E	14
2	1.0207E	14
3	1.0854E	14
4	1.1038E	14
5	1.0914E	14
6	1.0575E	14
7	1.0063E	14
8	9.3974E	13
9	8.5801E	13
10	7.5742E	13
11	6.4297E	13
12	5.5256E	13
13	4.6646E	13
14	3.8502E	13
15	3.0776E	13
16	2.3396E	13

PLANO Y	#	14
PLANO X	1x	
1	8.1893E	13
2	8.3898E	13
3	8.9826E	13
4	9.2460E	13
5	9.2129E	13
6	8.9659E	13
7	8.5487E	13
8	7.9830E	13
9	7.2729E	13
10	6.4021E	13
11	5.5181E	13
12	4.7922E	13
13	4.0764E	13
14	3.3826E	13
15	2.7134E	13
16	2.0667E	13

PLANO Y	#	15
PLANO X	1x	
1	6.6679E	13
2	6.8517E	13
3	7.3676E	13
4	7.6387E	13
5	7.6544E	13
6	7.4763E	13
7	7.1418E	13
8	6.6717E	13

TABLA 4.6.

(CONTINUACION)

9	6.0744E	13
10	5.3501E	13
11	4.6487E	13
12	4.0654E	13
13	3.4788E	13
14	2.9000E	13
15	2.3338E	13
16	1.7809E	13

PLANO Y # 18	PLANO X $\frac{1}{2}x$
1	3.3763E 13
2	3.4393E 13
3	3.5298E 13
4	3.6317E 13
5	3.6524E 13
6	3.5845E 13
7	3.4356E 13
8	3.2148E 13
9	2.9301E 13
10	2.5905E 13
11	2.2721E 13
12	2.0051E 13
13	1.7310E 13
14	1.4539E 13
15	1.1763E 13
16	9.0127E 12

PLANO Y # 2	PLANO X $\frac{1}{2}x$
1	8.7499E 13
2	8.6746E 13
3	8.5251E 13
4	8.3037E 13
5	8.0148E 13
6	7.6669E 13
7	7.2774E 13
8	6.8855E 13
9	6.5832E 13
10	6.5970E 13
11	7.1676E 13
12	7.3276E 13
13	7.4090E 13
14	7.4217E 13
15	7.3800E 13
16	7.3002E 13

PLANO Y # 16	PLANO X $\frac{1}{2}x$
1	5.3879E 13
2	5.5386E 13
3	5.9534E 13
4	6.1892E 13
5	6.2228E 13
6	6.0940E 13
7	5.8305E 13
8	5.4500E 13
9	4.9630E 13
10	4.3775E 13
11	3.8219E 13
12	3.3577E 13
13	2.8855E 13
14	2.4140E 13
15	1.9479E 13
16	1.4888E 13

PLANO Y # 3	PLANO X $\frac{1}{2}x$
1	8.6187E 13
2	8.5442E 13
3	8.3961E 13
4	8.1764E 13
5	7.8893E 13
6	7.5430E 13
7	7.1560E 13
8	6.7711E 13
9	6.4926E 13
10	6.5782E 13
11	7.2702E 13
12	7.4569E 13
13	7.5372E 13
14	7.5266E 13
15	7.4488E 13
16	7.3289E 13

RETICULADO 18\*20  
 REACTOR TIPO  
 PISCINA  
 CALC. BID.  
 GRUPO 2

PLANO Y # 17	PLANO X $\frac{1}{2}x$
1	4.3016E 13
2	4.4092E 13
3	4.6917E 13
4	4.8653E 13
5	4.8967E 13
6	4.8028E 13
7	4.6003E 13
8	4.3028E 13
9	3.9202E 13
10	3.4626E 13
11	3.0321E 13
12	2.6715E 13
13	2.3025E 13
14	1.9312E 13
15	1.5613E 13
16	1.1948E 13

PLANO Y # 1	PLANO X $\frac{1}{2}x$
1	8.8159E 13
2	8.7403E 13
3	8.5902E 13
4	8.3681E 13
5	8.0785E 13
6	7.7299E 13
7	7.3394E 13
8	6.9441E 13
9	6.6308E 13
10	6.6123E 13
11	7.1304E 13
12	7.2780E 13
13	7.3579E 13
14	7.3783E 13
15	7.3506E 13
16	7.2880E 13

PLANO Y # 4	PLANO X $\frac{1}{2}x$
1	8.4238E 13
2	8.3506E 13
3	8.2050E 13
4	7.9886E 13
5	7.7050E 13
6	7.3624E 13
7	6.9802E 13
8	6.6069E 13

TABLA 4.6.

(CONTINUACION)

PLANO	Y	#	7	9	5.0441E	13	
PLANO	X		1x				
9	6.3665E	13		10	5.2034E	13	
10	6.5774E	13		11	5.8965E	13	
11	7.5075E	13		12	6.0685E	13	
12	7.7439E	13		13	6.0983E	13	
13	7.8047E	13		14	6.0176E	13	
14	7.731 E	13		15	5.8705E	13	
15	7.5701E	13		16	5.7016E	13	
16	7.3707E	13					
PLANO	Y	#	5	PLANO	Y	#	10
PLANO	X		1x	PLANO	X		1x
1	8.1672E	13		1	6.1794E	13	
2	8.0962E	13		2	6.1294E	13	
3	7.9547E	13		3	6.0319E	13	
4	7.7439	13		4	5.8881E	13	
5	7.4667	13		5	5.6966E	13	
6	7.1310E	13		6	5.4593E	13	
7	6.7571E	13		7	5.1879E	13	
8	6.3995E	13		8	4.9146E	13	
9	6.2078E	13		9	4.7202E	13	
10	6.5978E	13		10	4.8069E	13	
11	8.4855E	13		11	5.3595E	13	
12	8.9318E	13		12	5.4977E	13	
13	8.8111E	13		13	5.5437E	13	
14	8.4173E	13		14	5.5139E	13	
15	7.9054E	13		15	5.4309E	13	
16	7.3617E	13		16	5.3185E	13	
PLANO	Y	#	8	PLANO	Y	#	11
PLANO	X		1x	PLANO	X		1x
1	7.0611E	13		1	5.9190E	13	
2	7.0038E	13		2	5.8466E	13	
3	6.8884E	13		3	5.7206E	13	
4	6.7139E	13		4	5.5653E	13	
5	6.4810E	13		5	5.3771E	13	
6	6.1948E	13		6	5.1538E	13	
7	5.8724E	13		7	4.9026E	13	
8	5.5616E	13		8	4.6481E	13	
9	5.3930E	13		9	4.4561E	13	
10	5.7233E	13		10	4.4998E	13	
11	7.3185E	13		11	4.9716E	13	
12	7.6879E	13		12	5.0829E	13	
13	7.5639E	13		13	5.1194E	13	
14	7.2011E	13		14	5.0963E	13	
15	6.7408E	13		15	5.0296E	13	
16	6.2687E	13		16	4.9344E	13	
PLANO	Y	#	9	PLANO	Y	#	11
PLANO	X		1x	PLANO	X		1x
1	6.6107E	13		1	5.9190E	13	
2	6.5593E	13		2	5.8466E	13	
3	6.4559E	13		3	5.7206E	13	
4	6.2990E	13		4	5.5653E	13	
5	6.0879E	13		5	5.3771E	13	
6	5.8265E	13		6	5.1538E	13	
7	5.5293E	13		7	4.9026E	13	
8	5.2352E	13		8	4.6481E	13	

(CONTINUACION)

PLANO	Y	#	12
PLANO	X	1x	
1	6.2936E	13	
2	6.1035E	13	
3	5.8032E	13	
4	5.5508E	13	
5	5.3140E	13	
6	5.0737E	13	
7	4.8254E	13	
8	4.5819E	13	
9	4.3859E	13	
10	4.3633E	13	
11	4.7214E	13	
12	4.7854E	13	
13	4.7876E	13	
14	4.7439E	13	
15	4.6665E	13	
16	4.5662E	13	

9	4.8038E	13	
10	4.6492E	13	
11	4.5626E	13	
12	4.4881E	13	
13	4.3991E	13	
14	4.2932E	13	
15	4.1721E	13	
16	4.0391E	13	

PLANO	Y	#	15
PLANO	X	1x	
1	8.6324E	13	
2	7.9606E	13	
3	6.7213E	13	
4	6.2536E	13	
5	5.8855E	13	
6	5.5716E	13	
7	5.2905E	13	
8	5.0354E	13	
9	4.8087E	13	
10	4.6143E	13	
11	4.4724E	13	
12	4.3576E	13	
13	4.2352E	13	
14	4.1027E	13	
15	3.9601E	13	
16	3.8092E	13	

PLANO	Y	#	17
PLANO	X	1x	
1	7.3374E	13	
2	6.9734E	13	
3	6.3860E	13	
4	6.0762E	13	
5	5.7802E	13	
6	5.4978E	13	
7	5.2251E	13	
8	4.9599E	13	
9	4.7017E	13	
10	4.4497E	13	
11	4.2413E	13	
12	4.0725E	13	
13	3.8998E	13	
14	3.7221E	13	
15	3.5394E	13	
16	3.3522E	13	

PLANO	Y	#	13
PLANO	X	1x	
1	8.4301E	13	
2	7.8402E	13	
3	6.5634E	13	
4	6.1023E	13	
5	5.7482E	13	
6	5.4466E	13	
7	5.1750E	13	
8	4.9326E	13	
9	4.7381E	13	
10	4.6293E	13	
11	4.6344E	13	
12	4.6148E	13	
13	4.5652E	13	
14	4.4878E	13	
15	4.3878E	13	
16	4.2712E	13	

PLANO	Y	#	16
PLANO	X	1x	
1	8.0439E	13	
2	7.5120E	13	
3	6.5888E	13	
4	6.1928E	13	
5	5.8554E	13	
6	5.5537E	13	
7	5.2749E	13	
8	5.0139E	13	
9	4.7702E	13	
10	4.5438E	13	
11	4.3639E	13	
12	4.2189E	13	
13	4.0691E	13	
14	3.9127E	13	
15	3.7495E	13	
16	3.5803E	13	

PLANO	Y	#	18
PLANO	X	1x	
1	6.6403E	13	
2	6.4290E	13	
3	6.1653E	13	
4	5.9334E	13	
5	5.6785E	13	
6	5.4173E	13	
7	5.1527E	13	
8	4.8849E	13	
9	4.6145E	13	
10	4.3412E	13	
11	4.1095E	13	
12	3.9208E	13	
13	3.7282E	13	
14	3.5312E	13	
15	3.3299E	13	
16	3.1251E	13	

PLANO	Y	#	14
PLANO	X	1x	
1	8.8879E	13	
2	8.1675E	13	
3	6.7283E	13	
4	6.2301E	13	
5	5.8539E	13	
6	5.5392E	13	
7	5.2605E	13	
8	5.0125E	13	

(CONTINUACION)

RETICULADO 14x15  
 REACTOR TIPO  
 PISCINA  
 CALC. BID.

GRUPO 1				PLANO Y # 4				PLANO Y # 7			
PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X
1	2.4300E	14	1	2.0066E	14	1	1.2550E	14	1	2.3570E	14
2	2.3470E	14	2	1.9405E	14	2	1.2979E	14	2	2.2755E	14
3	2.1846E	14	3	1.8025E	14	3	1.2457E	14	3	2.1145E	14
4	1.9506E	14	4	1.5883E	14	4	1.1230E	14	4	1.8786E	14
5	1.7287E	14	5	1.3602E	14	5	9.8829E	13	5	1.6497E	14
6	1.5640E	14	6	1.1704E	14	6	8.8358E	13	6	1.4781E	14
7	1.3632E	14	7	9.4391E	13	7	7.5387E	13	7	1.2697E	14
8	1.1653E	14	8	7.8047E	13	8	6.3703E	13	8	1.0720E	14
9	9.8032E	13	9	6.4261E	13	9	5.3262E	13	9	8.9325E	13
10	8.0714E	13	10	5.2530E	13	10	4.3700E	13	10	7.3152E	13
11	6.4404E	13	11	4.2479E	13	11	3.4801E	13	11	5.8244E	13
12	4.8913E	13	12	3.3846E	13	12	2.6404E	13	12	4.4267E	13

PLANO Y # 2				PLANO Y # 5				PLANO Y # 8			
PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X
1	2.3570E	14	1	1.7342E	14	1	9.9896E	13	1	2.2144E	14
2	2.2755E	14	2	1.6901E	14	2	1.1032E	14	2	2.1373E	14
3	2.1145E	14	3	1.5828E	14	3	1.0764E	14	3	1.9821E	14
4	1.8786E	14	4	1.4097E	14	4	9.7396E	13	4	1.7461E	14
5	1.6497E	14	5	1.2347E	14	5	8.5275E	13	5	1.4970E	14
6	1.4781E	14	6	1.1034E	14	6	7.5285E	13	6	1.2896E	14
7	1.2697E	14	7	9.4616E	13	7	6.3916E	13	7	1.0382E	14
8	1.0720E	14	8	7.9673E	13	8	5.4934E	13	8	8.5805E	13
9	8.9325E	13	9	6.6239E	13	9	4.6381E	13	9	7.0652E	13
10	7.3152E	13	10	5.4106E	13	10	3.8288E	13	10	5.7755E	13
11	5.8244E	13	11	4.3020E	13	11	3.0608E	13	11	4.2693E	13
12	4.4267E	13	12	3.2685E	13	12	2.3270E	13	12	3.7186E	13

PLANO Y # 3				PLANO Y # 6				PLANO Y # 9				
PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	PLANO Y #	PLANO X	
1	2.2144E	14	1	1.4697E	14	1	8.1710E	13	1	2.0652E	13	
2	2.1373E	14	2	1.4634E	14	2	9.2116E	13	2	5.7755E	13	
3	1.9821E	14	3	1.3874E	14	3	9.1150E	13	3	4.2693E	13	
4	1.7461E	14	4	1.2452E	14	4	8.2794E	13	4	3.3634E	13	
5	1.4970E	14	5	1.0964E	14	5	7.2269E	13	5	2.6982E	13	
6	1.2896E	14	6	9.8386E	13	6	6.3629E	13	6	2.0553E	13	
7	1.0382E	14	7	8.4696E	13	7	5.4851E	13	7			
8	8.5805E	13	8	7.1598E	13	8	4.7640E	13	8			
9	7.0652E	13	9	5.9722E	13	9	4.0529E	13	9			
10	5.7755E	13	10	4.8874E	13	10	3.3634E	13	10			
11	4.2693E	13	11	3.8849E	13	11	2.6982E	13	11			
12	3.7186E	13	12	2.9449E	13	12	2.0553E	13	12			

(CONTINUACION)

PLANO PLANO	Y %	#	10 %	PLANO PLANO	Y %	#	10 %	PLANO PLANO	Y %	#	2 %
1	6.6557E		13	1	3.3626E		13	1	8.5007E		13
2	7.5941E		13	2	3.6117E		13	2	8.2089E		13
3	7.5940E		13	3	3.6382E		13	3	7.6423E		13
4	6.9222E		13	4	3.3362E		13	4	6.8755E		13
5	6.0355E		13	5	2.9117E		13	5	6.4168E		13
6	5.3170E		13	6	2.5743E		13	6	6.5013E		13
7	4.6206E		13	7	2.2581E		13	7	7.2087E		13
8	4.0412E		13	8	1.9929E		13	8	7.3968E		13
9	3.4584E		13	9	1.7206E		13	9	7.4691E		13
10	2.8833E		13	10	1.4453E		13	10	7.4452E		13
11	2.3205E		13	11	1.1699E		13	11	7.3527E		13
12	1.7708E		13	12	0.9595E		13	12	7.2199E		13

PLANO PLANO	Y %	#	11 %
1	5.3778E		13
2	6.1462E		13
3	6.1865E		13
4	5.6556E		13
5	4.9313E		13
6	4.3503E		13
7	3.7967E		13
8	3.3375E		13
9	2.8665E		13
10	2.3999E		13
11	1.9366E		13
12	1.4802E		13

RETIÇULADO 14\*1  
 REACTOR TIPO  
 PISCINA  
 CALC. BID.  
 GRUPO 2

PLANO PLANO	Y %	#	3 %
1	7.9884E		13
2	7.7129E		13
3	7.1713E		13
4	6.4396E		13
5	6.1122E		13
6	6.5580E		13
7	6.6368E		13
8	6.1649E		13
9	6.0181E		13
10	6.5336E		13
11	7.9098E		13
12	7.2682E		13

PLANO PLANO	Y %	#	12 %
1	4.2905E		13
2	4.8319E		13
3	4.8746E		13
4	4.4653E		13
5	3.8953E		13
6	3.4410E		13
7	3.0136E		13
8	2.6554E		13
9	2.2888E		13
10	1.9198E		13
11	1.5521E		13
12	1.1873E		13

PLANO PLANO	Y %	#	1 %
1	8.7635E		13
2	8.4662E		13
3	7.8920E		13
4	7.1141E		13
5	6.6017E		13
6	6.5636E		13
7	7.0634E		13
8	7.2041E		13
9	7.2779E		13
10	7.2938E		13
11	7.2640E		13
12	7.2021E		13

PLANO PLANO	Y %	#	4 %
1	7.2522E		13
2	7.0119E		13
3	6.5291E		13
4	6.8658E		13
5	6.5664E		13
6	6.9695E		13
7	7.8421E		13
8	8.3133E		13
9	8.1682E		13
10	7.7143E		13
11	7.1364E		13
12	6.5515E		13

TABLA 4.6  
(CONTINUACION)

PLANO	Y	#	5
PLANO	X		±%
1	6.3621E		13
2	6.1679E		13
3	5.7717E		13
4	5.2065E		13
5	4.8618E		13
6	4.9297E		13
7	5.4620E		13
8	5.5981E		13
9	5.6385E		13
10	5.6006E		13
11	5.5101E		13
12	5.3940E		13

PLANO	Y	#	6
PLANO	X		±%
1	8.2395E		13
2	6.1717E		13
3	5.5319E		13
4	5.0091E		13
5	4.7078E		13
6	4.5920E		13
7	4.5898E		13
8	4.5661E		13
9	4.5139E		13
10	4.4354E		13
11	4.3358E		13
12	4.2212E		13

PLANO	Y	#	11
PLANO	X		±%
1	7.8555E		13
2	6.2364E		13
3	5.6247E		13
4	5.0933E		13
5	4.7323E		13
6	4.5066E		13
7	4.3265E		13
8	4.1813E		13
9	4.0316E		13
10	3.8757E		13
11	3.7135E		13
12	3.5460E		13

PLANO	Y	#	6
PLANO	X		±%
1	5.8960E		13
2	5.6347E		13
3	5.2648E		13
4	4.7658E		13
5	4.4421E		13
6	4.4632E		13
7	4.9081E		13
8	5.0104E		13
9	5.0408E		13
10	5.0148E		13
11	4.9483E		13
12	4.8565E		13

PLANO	Y	#	9
PLANO	X		±%
1	8.6594E		13
2	6.2992E		13
3	5.6206E		13
4	5.0867E		13
5	4.7702E		13
6	4.6116E		13
7	4.5212E		13
8	4.4443E		13
9	4.3536E		13
10	4.2473E		13
11	4.1268E		13
12	3.9956E		13

PLANO	Y	#	12
PLANO	X		±%
1	7.1878E		13
2	6.1034E		13
3	5.5641E		13
4	5.0442E		13
5	4.6632E		13
6	4.4131E		13
7	4.2054E		13
8	4.0371E		13
9	3.8650E		13
10	3.6682E		13
11	3.5067E		13
12	3.3212E		13

PLANO	Y	#	7
PLANO	X		±%
1	6.2250E		13
2	5.6134E		13
3	5.1657E		13
4	4.6794E		13
5	4.3635E		13
6	4.3279E		13
7	4.6698E		13
8	4.7281E		13
9	4.7264E		13
10	4.6009E		13
11	4.6039E		13
12	4.5059E		13

PLANO	Y	#	10
PLANO	X		±%
1	8.4128E		13
2	6.3127E		13
3	5.6481E		13
4	5.1112E		13
5	4.7725E		13
6	4.5768E		13
7	4.4332E		13
8	4.3173E		13
9	4.1942E		13
10	4.0617E		13
11	3.9200E		13
12	3.7708E		13

PLANO	Y	#	13
PLANO	X		±%
1	6.5287E		13
2	5.9471E		13
3	5.4810E		13
4	4.9752E		13
5	4.5763E		13
6	4.3056E		13
7	4.0752E		13
8	3.8874E		13
9	3.6957E		13
10	3.4997E		13
11	3.2999E		13
12	3.0969E		13



(CONTINUACION)

RETICULADO 13\*14  
 REACTOR TIPO  
 PISCINA  
 CALC. BID.  
 GRUPO 1

PLANO Y	#	1
PLANO X	£x	
1	2.4420E	14
2	2.3581E	14
3	2.1939E	14
4	1.9570E	14
5	1.6563E	14
6	1.3604E	14
7	1.1624E	14
8	9.7752E	13
9	8.0457E	13
10	6.4183E	13
11	4.8737E	13

PLANO Y	#	4
PLANO X	£x	
1	2.0130E	14
2	1.9464E	14
3	1.8069E	14
4	1.5896E	14
5	1.2780E	14
6	9.3043E	13
7	7.7004E	13
8	6.3448E	13
9	5.1892E	13
10	4.1979E	13
11	3.3455E	13

PLANO Y	#	7
PLANO X	£x	
1	9.8389E	13
2	1.0979E	14
3	1.0719E	14
4	9.6892E	13
5	8.0447E	13
6	6.2825E	13
7	5.4148E	13
8	4.5816E	13
9	3.7876E	13
10	3.0307E	13
11	2.3052E	13

PLANO Y	#	2
PLANO X	£x	
1	2.3680E	14
2	2.2856E	14
3	2.1227E	14
4	1.8839E	14
5	1.5739E	14
6	1.2653E	14
7	1.0673E	14
8	8.8922E	13
9	7.2765E	13
10	5.7917E	13
11	4.4011E	13

PLANO Y	#	5
PLANO X	£x	
1	1.7365E	14
2	1.6931E	14
3	1.5851E	14
4	1.4103E	14
5	1.1737E	14
6	9.4008E	13
7	7.9036E	13
8	6.5642E	13
9	5.3585E	13
10	4.2592E	13
11	3.2355E	13

PLANO Y	#	8
PLANO X	£x	
1	8.0594E	13
2	9.1554E	13
3	9.0719E	13
4	8.2328E	13
5	6.8114E	13
6	5.4110E	13
7	4.7021E	13
8	4.0040E	13
9	3.3258E	13
10	2.6698E	13
11	2.0345E	13

PLANO Y	#	3
PLANO X	£x	
1	2.2235E	14
2	2.1456E	14
3	1.9884E	14
4	1.7488E	14
5	1.4082E	14
6	1.0240E	14
7	8.4740E	13
8	6.9837E	13
9	5.7126E	13
10	4.6206E	13
11	3.6806E	13

PLANO Y	#	6
PLANO X	£x	
1	1.3752E	14
2	1.3868E	14
3	1.3213E	14
4	1.1883E	14
5	9.9860E	13
6	8.0424E	13
7	6.8000E	13
8	5.6823E	13
9	4.6559E	13
10	3.7037E	13
11	2.8084E	13

PLANO Y	#	9
PLANO X	£x	
1	6.5717E	13
2	7.5419E	13
3	7.5541E	13
4	6.8810E	13
5	5.6896E	13
6	4.5698E	13
7	3.9947E	13
8	3.4191E	13
9	2.8514E	13
10	2.2957E	13
11	1.7523E	13

( CONTINUACION )

RETICULADO 13\*14  
 REACTOR TIPO  
 PISCINA  
 CALC.BID.

GRUPO 2

PLANO	Y	#	10
PLANO	%		±x
1	5.3140E	13	
2	6.1009E	13	
3	6.1515E	13	
4	5.6207E	13	
5	4.6509E	13	
6	3.7629E	13	
7	3.3032E	13	
8	2.8380E	13	
9	2.3743E	13	
10	1.9161E	13	
11	1.4647E	13	

PLANO	Y	#	1
PLANO	%		±x
1	8.8059E	13	
2	8.5056E	13	
3	7.9276E	13	
4	7.1558E	13	
5	6.5493E	13	
6	7.3460E	13	
7	7.4618E	13	
8	7.5103E	13	
9	7.5013E	13	
10	7.4478E	13	
11	7.3640E	13	

PLANO	Y	#	4
PLANO	%		±x
1	7.2788E	13	
2	7.0360E	13	
3	6.5513E	13	
4	5.9028E	13	
5	5.6429E	13	
6	8.1801E	13	
7	8.5207E	13	
8	8.2973E	13	
9	7.7951E	13	
10	7.1855E	13	
11	6.5769E	13	

PLANO	Y	#	11
PLANO	%		±x
1	4.2419E	13	
2	4.7948E	13	
3	4.8455E	13	
4	4.4371E	13	
5	3.6756E	13	
6	2.9880E	13	
7	2.6303E	13	
8	2.2659E	13	
9	1.9000E	13	
10	1.5360E	13	
11	1.1755E	13	

PLANO	Y	#	2
PLANO	%		±x
1	8.5396E	13	
2	8.2450E	13	
3	7.6750E	13	
4	6.9167E	13	
5	6.3955E	13	
6	7.5103E	13	
7	7.6607E	13	
8	7.6975E	13	
9	7.6418E	13	
10	7.5217E	13	
11	7.3652E	13	

PLANO	Y	#	5
PLANO	%		±x
1	6.4000E	13	
2	6.1966E	13	
3	5.7962E	13	
4	5.2376E	13	
5	4.8454E	13	
6	5.6863E	13	
7	5.7919E	13	
8	5.8026E	13	
9	5.7378E	13	
10	5.6240E	13	
11	5.4887E	13	

PLANO	Y	#	12
PLANO	%		±x
1	3.3255E	13	
2	3.5834E	13	
3	3.6159E	13	
4	3.3149E	13	
5	2.7484E	13	
6	2.2401E	13	
7	1.9750E	13	
8	1.7040E	13	
9	1.4308E	13	
10	1.1580E	13	
11	8.8676E	12	

PLANO	Y	#	3
PLANO	%		±x
1	8.0210E	13	
2	7.7431E	13	
3	7.1991E	13	
4	6.4834E	13	
5	6.2017E	13	
6	9.0191E	13	
7	9.4043E	13	
8	9.1724E	13	
9	8.6354E	13	
10	7.9767E	13	
11	7.3083E	13	

PLANO	Y	#	6
PLANO	%		±x
1	5.9294E	13	
2	5.5618E	13	
3	5.1802E	13	
4	4.7023E	13	
5	4.3305E	13	
6	4.9351E	13	
7	4.9985E	13	
8	4.9992E	13	
9	4.9521E	13	
10	4.8709E	13	
11	4.7678E	13	

TABLA 4.6.  
 (CONTINUACION)

PLANO	Y	#	7	PLANO	Y	#	10
PLANO	X		$\frac{1}{x}$	PLANO	X		$\frac{1}{x}$
1	8.6029E		13	1	7.9363E		13
2	6.4182E		13	2	6.3831E		13
3	5.7458E		13	3	5.7720E		13
4	5.2062E		13	4	5.2307E		13
5	4.7959E		13	5	4.7318E		13
6	4.7538E		13	6	4.4314E		13
7	4.7094E		13	7	4.2784E		13
8	4.6388E		13	8	4.1201E		13
9	4.5440E		13	9	3.9551E		13
10	4.4300E		13	10	3.7838E		13
11	4.3023E		13	11	3.6074E		13

PLANO	Y	#	8	PLANO	Y	#	11
PLANO	X		$\frac{1}{x}$	PLANO	X		$\frac{1}{x}$
1	8.8738E		13	1	7.2377E		13
2	6.5091E		13	2	6.2256E		13
3	5.8119E		13	3	5.6917E		13
4	5.2631E		13	4	5.1641E		13
5	4.8245E		13	5	4.6402E		13
6	4.6611E		13	6	4.2966E		13
7	4.5709E		13	7	4.1217E		13
8	4.4663E		13	8	3.9423E		13
9	4.3466E		13	9	3.7580E		13
10	4.2135E		13	10	3.5688E		13
11	4.0706E		13	11	3.3756E		13

PLANO	Y	#	9	PLANO	Y	#	12
PLANO	X		$\frac{1}{x}$	PLANO	X		$\frac{1}{x}$
1	8.5429E		13	1	6.5555E		13
2	6.4887E		13	2	6.0492E		13
3	5.8168E		13	3	5.5908E		13
4	5.2675E		13	4	5.0789E		13
5	4.7974E		13	5	4.5330E		13
6	4.5539E		13	6	4.1539E		13
7	4.4283E		13	7	3.9604E		13
8	4.2945E		13	8	3.7625E		13
9	4.1511E		13	9	3.5602E		13
10	3.9986E		13	10	3.3540E		13
11	3.8361E		13	11	3.1445E		13

FIGURA 4.5

MALLA 18 x 20

FLUJO NEUTRONICO DISTRIBUCION ESPACIAL  
 RAPIDO ( x 1E13 )  
 TERMICO

6.39823	7.00168	5.83904	2.93871
7.73789	5.99038	4.8701	4.0644
15.5186	14.3932	11.8706	5.68846
6.20518	5.70646	4.83154	5.28425
21.0734	19.214	15.0254	6.49402
7.60769	7.00282	6.10072	7.9640
23.8885	22.2534	7.5638	8.64981
8.61473	8.0393	6.77493	7.42022

MALLA 14 x 15

FLUJO NEUTRONICO DISTRIBUCION ESPACIAL

RAPIDO (1 x E 13)  
 TERMICO

6.22524	7.00944	5.81635	2.88839
7.95815	6.0419	4.96111	4.1152
15.5584	14.366	11.9273	5.7014
6.1047	5.68371	4.77893	5.30457
21.1822	17.7582	15.0616	8.66904
7.64991	7.13237	6.05768	8.17264
24.0501	23.4004	17.6777	8.66904
8.67275	8.09831	6.75432	7.50237

MALLA 13 x 14

FLUJO NEUTRONICO DISTRIBUCION ESPACIAL

RAPIDO ( x 1 E 13 )  
 TERMICO

6.22524	7.00944	5.81635	2.88839
7.95815	6.04190	4.96111	4.1152
15.5584	14.966	11.9273	5.70146
6.1647	5.68371	4.77894	5.30457
21.1822	19.7182	15.0616	6.31609
7.64991	7.13237	6.05768	8.17264
24.050	22.4004	17.6777	8.66904
8.67275	8.08831	6.75432	7.50237

DISTRIBUCION DE FLUJO POR PUNTOS OBTENIDA VIA EXTERMINATOR-II

RETICULADO 12\*13  
 REACTOR TIPO  
 PISCINA  
 CALC.BID.  
 COMPARE DE  
 EXTERMINATOR II  
 CON PUMA  
 GRUPO I

PLANO Y	#	1
PLANO X		1x
1	2.4420E	14
2	2.4420E	14
3	2.4092E	14
4	2.2858E	14
5	2.0839E	14
6	1.8141E	14
7	1.6559E	14
8	1.4773E	14
9	1.0680E	14
10	7.0930E	13
11	3.8632E	13
12	1.4754E	13

PLANO Y	#	4
PLANO X		1x
1	2.3064E	14
2	2.3064E	14
3	2.2759E	14
4	2.1551E	14
5	1.9552E	14
6	1.6746E	14
7	1.4951E	14
8	1.2725E	14
9	8.7439E	13
10	5.7636E	13
11	3.4234E	13
12	1.3418E	13

PLANO Y	#	7
PLANO X		1x
1	1.5843E	14
2	1.5843E	14
3	1.5732E	14
4	1.5161E	14
5	1.3930E	14
6	1.2079E	14
7	1.0943E	14
8	9.6531E	13
9	6.8337E	13
10	4.4967E	13
11	2.4673E	13
12	9.4956E	12

PLANO Y	#	2
PLANO X		1x
1	2.4420E	14
2	1.7855E	16
3	1.7540E	16
4	2.2825E	14
5	2.0839E	14
6	1.8141E	14
7	1.6559E	14
8	1.4773E	14
9	1.0680E	14
10	7.0930E	13
11	3.8632E	13
12	1.4754E	13

PLANO Y	#	5
PLANO X		1x
1	2.1305E	14
2	2.1305E	14
3	2.1029E	14
4	1.9920E	14
5	1.8039E	14
6	1.5003E	14
7	1.3520E	14
8	1.1179E	14
9	7.5886E	13
10	5.0120E	13
11	3.1122E	14
12	1.2243E	13

PLANO Y	#	8
PLANO X		1x
1	1.3913E	14
2	1.3913E	14
3	1.3940E	14
4	1.3680E	14
5	1.2660E	14
6	1.1009E	14
7	9.9748E	13
8	8.7833E	13
9	6.2396E	13
10	4.1127E	13
11	2.2385E	13
12	8.5930E	12

PLANO Y	#	3
PLANO X		1x
1	2.4148E	14
2	2.4148E	14
3	2.3836E	14
4	3.2592E	14
5	2.0573E	14
6	1.7852E	14
7	1.6237E	14
8	1.4412E	14
9	1.0329E	14
10	6.8468E	13
11	3.7615E	13
12	1.4462E	13

PLANO Y	#	6
PLANO X		1x
1	1.8912E	14
2	1.8912E	14
3	1.8689E	14
4	1.7773E	14
5	1.6168E	14
6	1.3838E	14
7	1.2348E	14
8	1.0526E	14
9	7.2636E	13
10	4.7888E	13
11	2.8287E	13
12	1.1002E	13

PLANO Y	#	9
PLANO X		1x
1	1.1455E	14
2	1.1455E	14
3	1.1823E	14
4	1.2046E	14
5	1.1245E	14
6	9.7844E	13
7	8.8063E	13
8	7.5886E	13
9	5.4289E	13
10	3.6072E	13
11	1.9687E	13
12	7.5951E	12

TABLA 4.7.

(CONTINUACION)

PLANO	Y	#	10
PLANO	X		±x
1	7.6575E	13	
2	7.6575E	13	
3	7.9857E	13	
4	8.4846E	13	
5	8.0448E	13	
6	7.0043E	13	
7	6.2822E	13	
8	5.4256E	13	
9	4.0930E	13	
10	2.7925E	13	
11	1.5581E	13	
12	6.1444E	13	

PLANO	Y	#	13
PLANO	X		±x
1	1.2404E	13	
2	1.2404E	13	
3	1.2338E	13	
4	1.2072E	13	
5	1.1294E	13	
6	9.8665E	12	
7	8.9409E	12	
8	7.9037E	12	
9	6.4103E	12	
10	4.9168E	12	
11	3.5645E	12	
12	1.7724E	12	

PLANO	Y	#	2
PLANO	X		±x
1	8.8063E	13	
2	8.8063E	13	
3	8.6947E	13	
4	8.2483E	13	
5	7.5525E	13	
6	6.7615E	13	
7	6.6039E	13	
8	6.9945E	13	
9	7.4507E	13	
10	7.5984E	13	
11	7.5656E	13	
12	4.0897E	13	

PLANO	Y	#	11
PLANO	X		±x
1	4.9595E	13	
2	4.9595E	13	
3	5.1630E	13	
4	5.5208E	13	
5	5.2713E	13	
6	4.5984E	13	
7	4.1324E	13	
8	3.5875E	13	
9	2.7765E	13	
10	1.9477E	13	
11	1.1340E	13	
12	4.6805E	12	

RETICULADO 12\*13  
 REACTOR TIPO  
 PISCINA  
 CALC. BID.  
 COMPARE DE  
 EXTERMINATOR II  
 CON PUMA  
 GRUPO 2

PLANO	Y	#	3
PLANO	X		±x
1	8.7078E	13	
2	8.7078E	13	
3	8.5962E	13	
4	8.1531E	13	
5	7.4606E	13	
6	6.6827E	13	
7	6.5645E	13	
8	7.0634E	13	
9	7.5722E	13	
10	7.6739E	13	
11	7.5623E	13	
12	4.0437E	13	

PLANO	Y	#	12
PLANO	X		±x
1	2.9783E	13	
2	2.9783E	13	
3	2.9619E	13	
4	2.9511E	13	
5	2.7896E	13	
6	2.4348E	13	
7	2.1958E	13	
8	1.9224E	13	
9	1.5217E	13	
10	1.1156E	13	
11	7.4278E	12	
12	3.3512E	12	

PLANO	Y	#	1
PLANO	X		±x
1	8.8063E	13	
2	8.8063E	13	
3	8.6947E	13	
4	8.2483E	13	
5	7.5525E	13	
6	6.7615E	13	
7	6.6039E	13	
8	6.9945E	13	
9	7.4507E	13	
10	7.5984E	13	
11	7.5656E	13	
12	4.0897E	13	

PLANO	Y	#	4
PLANO	X		±x
1	8.3172E	13	
2	8.3172E	13	
3	8.2089E	13	
4	7.7822E	13	
5	7.1061E	13	
6	6.3840E	13	
7	6.4431E	13	
8	7.4901E	13	
9	8.2844E	13	
10	8.0448E	13	
11	7.4967E	13	
12	3.8567E	13	



(CONTINUACION)

PLANO	Y	#	5
PLANO	X		£x
1	7.6903E		13
2	7.6903E		13
3	7.5919E		13
4	7.1980E		13
5	6.5711E		13
6	5.9245E		13
7	6.1083E		13
8	7.5131E		13
9	8.8523E		13
10	8.0612E		13
11	6.9354E		13
12	3.5514E		13

PLANO	Y	#	8
PLANO	X		£x
1	6.0853E		13
2	6.0853E		13
3	5.8588E		13
4	5.4485E		13
5	4.9825E		13
6	4.4836E		13
7	4.3982E		13
8	4.7166E		13
9	4.9956E		13
10	4.9956E		13
11	4.8479E		13
12	2.4886E		13

PLANO	Y	#	11
PLANO	X		£x
1	7.6444E		13
2	7.6444E		13
3	6.8698E		13
4	6.1181E		13
5	5.5011E		13
6	4.9431E		13
7	4.6871E		13
8	4.4409E		13
9	4.1061E		13
10	3.7418E		13
11	3.3545E		13
12	1.5299E		13

PLANO	Y	#	6
PLANO	X		£x
1	6.8665E		13
2	6.8665E		13
3	6.7811E		13
4	6.4431E		13
5	5.8982E		13
6	5.2943E		13
7	5.3238E		13
8	6.1214E		13
9	6.7057E		13
10	6.4693E		13
11	6.0558E		13
12	3.1605E		13

PLANO	Y	#	9
PLANO	X		£x
1	7.3982E		13
2	7.3982E		13
3	6.6039E		13
4	5.7538E		13
5	5.1728E		13
6	4.6871E		13
7	4.5623E		13
8	4.6116E		13
9	4.7068E		13
10	4.6247E		13
11	4.4442E		13
12	2.2369E		13

PLANO	Y	#	12
PLANO	X		£x
1	6.5153E		13
2	6.5153E		13
3	6.3840E		13
4	5.9671E		13
5	5.4387E		13
6	4.8577E		13
7	4.5558E		13
8	4.2407E		13
9	3.7976E		13
10	3.3085E		13
11	2.7154E		13
12	1.1790E		13

PLANO	Y	#	7
PLANO	X		£x
1	6.0262E		13
2	6.0262E		13
3	5.9343E		13
4	5.6389E		13
5	5.1794E		13
6	4.6542E		13
7	4.6017E		13
8	5.0284E		13
9	5.4026E		13
10	5.4190E		13
11	5.2615E		13
12	2.7276E		13

PLANO	Y	#	10
PLANO	X		£x
1	8.5404E		13
2	8.5404E		13
3	7.1586E		13
4	6.1116E		13
5	5.4485E		13
6	4.9267E		13
7	4.7297E		13
8	4.5853E		13
9	4.4114E		13
10	4.1816E		13
11	3.9092E		13
12	1.8863E		13

PLANO	Y	#	13
PLANO	X		£x
1	3.5317E		13
2	3.5317E		13
3	3.4923E		13
4	3.3446E		13
5	3.0893E		13
6	2.7259E		13
7	2.5106E		13
8	2.2762E		13
9	1.9421E		13
10	1.5965E		13
11	1.2512E		13
12	6.3807E		12

#### 4.5. Reactor Peruano de Potencia Cero ( RP-0)

El núcleo del reactor consta de un máximo de 236 elementos combustibles tipo varillas, dispuestos en 5 coronas, un reflector interno y un reflector externo de grafito. El combustible es Uranio enriquecido al 20.09 % en U - 235, contenido en una vaina de aluminio.

Este sistema se encuentra rodeado de un tanque de agua, que sirve de blindaje frente a la radiación y parcialmente como reflector de neutrones.

A continuación se detallan las especificaciones del reactor que han sido utilizadas en el cálculo bidimensional.

#### Generalidades

Potencia máxima : 10 W

#### Núcleo

Moderador : Agua ligera

Reflector : Grafito

Blindaje biológico : Agua ligera en la parte superior y agua ligera como blindaje lateral.

Número máximo de elementos combustibles : 236 formando 5 coronas de elementos combustibles.

Número de elementos reflectores : Reflector interno y reflector

externo de geometría octogonal.

### Combustible

Tipo : Barritas

Dimensiones totales del elemento : 540 mm, con dos tapones de grafito en los extremos, de 55 mm en el extremo inferior y 28.5cm en el extremo superior para la vaina en la posición vertical.

Enriquecimiento del Uranio : 20.09 %

### Reflector

Reflector central : dispuesto en un tanque de aluminio de 16 cm de diámetro.

Reflector externo : de geometría octogonal dispuesto alrededor de la zona de combustible con un espesor radial de

#### 4.6. Cálculo del RP-0 en el plano vertical ( R-Z)

Se realizó un cálculo completo del RP-0 incluyendo reflectores y combustible y otro cálculo simulando el reflector externo mediante una matriz de respuesta calculada con el programa BORDE.

Los datos de entrada del programa de difusión PUMA son :

- a) Especificación del reticulado ( Ver Fig. 4.  $\xi$  )

b) Constantes macroscópicas (Tabla 4.8 )

Los resultados para los dos casos se dan en las tablas 4.12 y 4.13

TABLA. 4.8.

## CONSTANTES MACROSCOPICAS

Material	D <sub>1</sub> (cm)	D <sub>2</sub> (cm)	D <sub>3</sub> (cm)	D <sub>4</sub> (cm)	D <sub>5</sub> (cm)	$\sigma_{T1}$ (1/cm)	$\sigma_{T2}$ (1/cm)	$\sigma_{T3}$ (1/cm)
grafito	2.1893	1.0546	8.9031E-1	8.919E-1	8.3105E-1	6.2901E-6	4.3880E-9	1.1524E-6
agua	2.2511	8.0366E-1	5.8526E-1	5.505E-1	1.7107E-1	4.5222E-4	2.0933E-7	1.0526E-4
Aluminio	2.9203	2.0718	3.9470	3.9837	3.5272	3.8563E-4	1.5147E-4	7.0324E-4
Extremo Superior del elemento - combustible	2.5093	1.2442	1.5812	1.5283	6.5461E-1	4.0385E-4	1.2766E-4	5.8616E-4
Extremo inferior del elemento combustible	1.9907	7.6003E-1	5.7978E-1	5.4981E-1	1.8948E-1	4.1877E-4	1.4085E-5	1.5086E-4
Combustible	3.323	6.1903E-1	6.1903E-1	5.7765E-1	1.8316E-1	7.7793E-4	3.3141E-4	1.9139E-3

TABLA 4.8  
(CONTINUACION)

Material	$\sigma_{T4}$ (1/cm)	$\sigma_{T5}$ (1/cm)	$\sigma_{12}$ (1/cm)	$\sigma_{13}$ (1/cm)	$\sigma_{14}$ (1/cm)	$\sigma_{15}$ (1/cm)	$\sigma_{21}$ (1/cm)	$\sigma_{23}$ (1/cm)
Gráfico	2.0809 E-5	2.4350 E-4	2.5056 E-2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.3193 E-2
Agua	1.5036 E-3	1.7114 E-2	1.0837 E-1	9.5469 E-4	0.0000	0.0000	0.0000	1.5027 E-1
Aluminio	1.2398 E-3	1.0506 E-2	1.6748 E-2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.1677 E-4
Extremo Superior del elemento combustible	6.517 E-2	4.8561 E-2	3.6816 E-2	1.925 E-4	0.0000	0.0000	0.0000	3.1375 E-2
Extremo inferior del elemento combustible	1.3848 E-3	1.5479 E-2	9.778 E-2	8.0777 E-4	0.0000	0.0000	0.0000	1.2888 E-1
Combustible	8.9707 E-3	5.1452 E-2	9.6229 E-2	8.2185 E-4	0.0000	0.0000	0.0000	1.3191 E-1

TABLA 4.8  
(CONTINUACION)

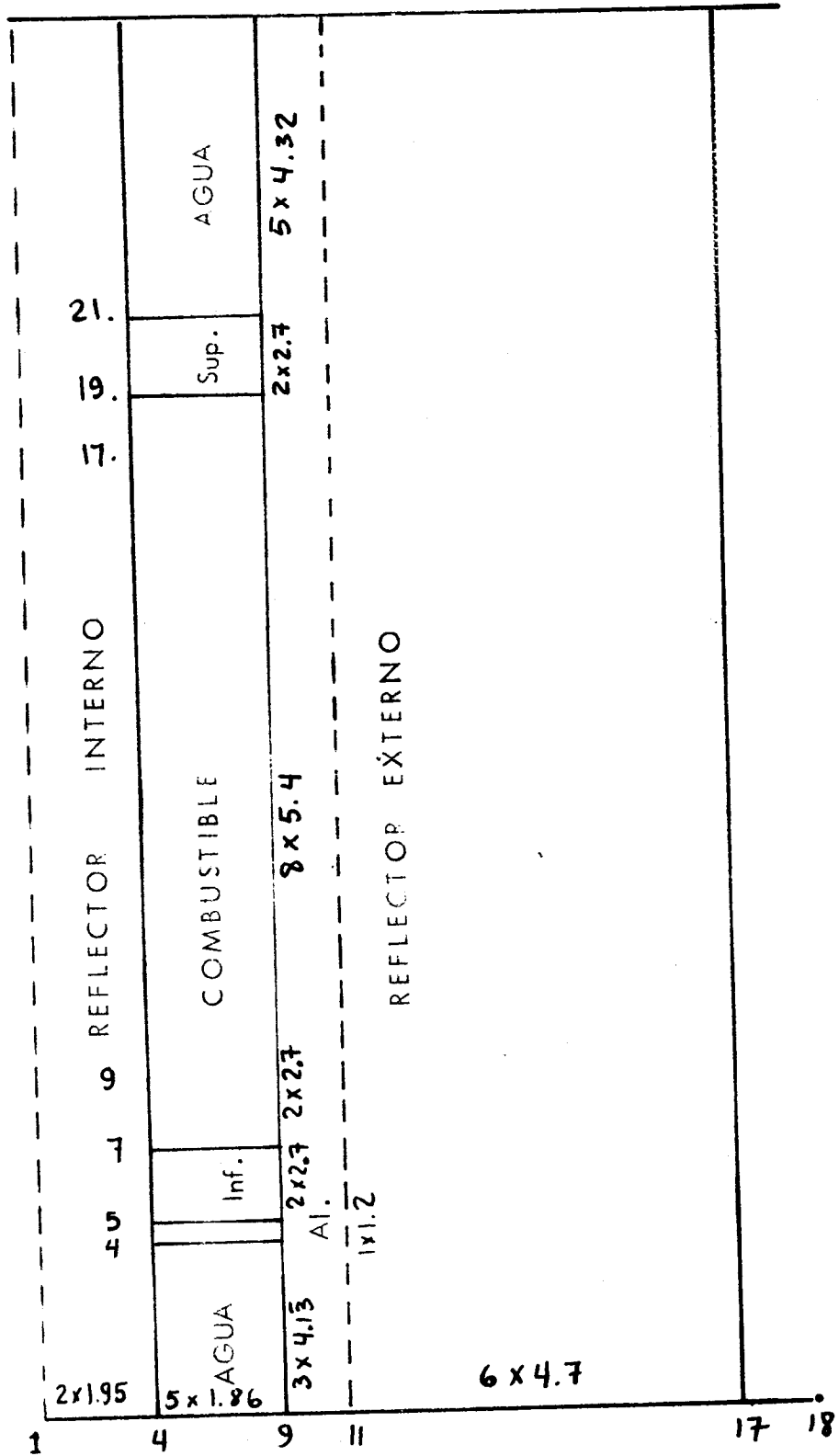
Material	$\sigma_{24}$ (1/cm)	$\sigma_{25}$ (1/cm)	$\sigma_{31}$ (1/cm)	$\sigma_{32}$ (1/cm)	$\sigma_{34}$ (1/cm)	$\sigma_{35}$ (1/cm)	$\sigma_{41}$ (1/cm)	$\sigma_{42}$ (1/cm)
grafito	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.5961E-2	0.0000	0.0000	0.0000
agua	1.9269E-3	0.0000	0.0000	0.0000	2.1185E-1	5.69E-4	0.0000	0.0000
Aluminio	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.462E-3	0.0000	0.0000	0.0000
Extremo superior del elemento combustible	4.0065E-4	0.0000	0.0000	0.0000	6.517E-2	1.1454E-4	0.0000	0.0000
Extremo inferior del elementos combustible	1.6811E-3	0.0000	0.0000	0.0000	2.674E-1	4.8059E-4	0.0000	0.0000
Combustible	1.7386E-3	0.0000	0.0000	0.0000	2.7706E-1	5.0304E-4	0.0000	0.0000

TABLA 4.8

(CONTINUACION)

Material	$\sigma_{43}$ (1/cm)	$\sigma_{45}$ (1/cm)	$\sigma_{51}$ (1/cm)	$\sigma_{52}$ (1/cm)	$\sigma_{53}$ (1/cm)	$\sigma_{54}$ (1/cm)
Grafito	0.0000	2.2117E-2	0.0000	0.0000	0.0000	1.8108E-5
Agua	0.0000	2.3188E-1	0.0000	0.0000	0.0000	3.2719E-4
Aluminio	0.0000	1.2264E-3	0.0000	0.0000	0.0000	5.2976E-5
Extremo superior del elemento combustible	0.0000	4.8561E-2	0.0000	0.0000	0.0000	1.1593E-4
extremo inferior del elemento combustible	0.0000	1.9879E-1	0.0000	0.0000	0.0000	3.1512E-4
Combustible	0.0000	2.0681E-1	0.0000	0.0000	0.0000	3.0764E-4
Combustible (1/cm)						
						$\nu \sigma_{f_1} = 9.6574E-4$
						$\nu \sigma_{f_2} = 4.3006E-4$
						$\nu \sigma_{f_3} = 2.1243E-3$
						$\nu \sigma_{f_4} = 7.8235E-3$
						$\nu \sigma_{f_5} = 7.2321E-2$





R x Z  
18 x 26

FIG. 4.8

TABLA 4.9

## MATRIZ DE RESPUESTA

## CONDICIONES DE CONTORNO CALCULADAS

ZONA : GRAFITO

ESPESOR : 18.8 cm.

-2.8695E-1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.0248E-1	-1.4367E-1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.6069E-2	4.9005E-2	-1.3922E-1	0.0000	0.0000	0.0000
6.3419E-3	1.119E-2	5.8404E-2	-1.2522E-1	8.8017E-5	
3.6497E-3	5.0969E-3	1.4493E-2	5.8855E-2	-6.1699E-2	

TABLA 4.10

DISTRIBUCION DE FLUJO POR PUNTOS REACTOR CON 3 REGIONES : REFLECTOR INTERNO, COMBUSTIBLE Y REFLECTOR EXTERNO.

RPO  
CALC. BIDIMENS  
REACTOR COMPLETO  
POTENCIA 1w  
GEOMETRIA R-Z  
GRUPO 1

SEGMENTO # 1  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	5.8445E 04
2	5.2660E 04
3	4.6820E 04
4	3.9405E 04
5	3.5239E 04
6	3.2984E 04
7	3.2210E 04
8	3.2847E 04
9	3.5444E 04
10	3.4959E 04
11	3.0903E 04

SEGMENTO # 4  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	7.1489E 05
2	6.8650E 05
3	6.4737E 05
4	5.8988E 05
5	5.5223E 05
6	5.2145E 05
7	4.9500E 05
8	4.7259E 05
9	4.5196E 05
10	3.9807E 05
11	2.9988E 05

SEGMENTO # 7  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	1.8640E 06
2	1.9876E 06
3	2.1300E 06
4	2.3546E 06
5	2.4616E 06
6	2.2850E 06
7	2.2259E 06
8	1.9956E 06
9	1.4664E 06
10	1.0767E 06
11	6.7183E 05

SEGMENTO # 2  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	2.6425E 05
2	1.8602E 05
3	1.6703E 05
4	1.4209E 05
5	1.2795E 05
6	1.1980E 05
7	1.1611E 05
8	1.1674E 05
9	1.2345E 05
10	1.1915E 05
11	1.0208E 05

SEGMENTO # 5  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	9.4363E 05
2	9.2366E 05
3	8.8650E 05
4	8.0453E 05
5	7.5866E 05
6	7.1826E 05
7	6.7916E 05
8	6.3954E 05
9	6.0997E 05
10	5.2400E 05
11	3.7933E 05

SEGMENTO # 8  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	2.3615E 06
2	2.5463E 06
3	2.7482E 06
4	3.0293E 06
5	3.1610E 06
6	2.9436E 06
7	2.8505E 06
8	2.5465E 06
9	1.8835E 06
10	1.3652E 06
11	8.2881E 05

SEGMENTO # 3  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	4.4487E 05
2	4.1479E 05
3	3.8090E 05
4	3.3348E 05
5	3.0556E 05
6	2.8699E 05
7	2.7483E 05
8	2.6894E 05
9	2.7187E 05
10	2.5128E 05
11	2.0250E 05

SEGMENTO # 6  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	1.3653E 06
2	1.3949E 06
3	1.4063E 06
4	1.3750E 06
5	1.3554E 06
6	1.2909E 06
7	1.2202E 06
8	1.1105E 06
9	9.6155E 05
10	7.6967E 05
11	5.1599E 05

SEGMENTO # 9  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	3.0503E 06
2	3.2919E 06
3	3.5454E 06
4	3.8830E 06
5	4.0440E 06
6	3.7684E 06
7	3.6338E 06
8	3.2364E 06
9	2.4133E 06
10	1.7492E 06
11	1.0505E 06

TABLA 4.10

(CONTINUACION)

RPO  
 CALC. BIDIMENS  
 REACTOR COMPLETO  
 POTENCIA 1w  
 GEOMETRIA R-Z  
 GRUPO 2

SEGMENTO # 1		
FLUJO RADIAL		
r	r	r
1	1.0305E 05	
2	8.8016E 04	
3	7.3361E 04	
4	5.2180E 04	
5	4.1988E 04	
6	3.8678E 04	
7	4.0443E 04	
8	4.8328E 04	
9	6.6126E 04	
10	7.4093E 04	
11	7.5590E 04	

SEGMENTO # 4		
FLUJO RADIAL		
r	r	r
1	1.1414E 06	
2	1.0312E 06	
3	9.0864E 05	
4	7.6800E 05	
5	6.9508E 05	
6	6.5471E 05	
7	6.4397E 05	
8	6.6018E 05	
9	7.1479E 05	
10	7.1626E 05	
11	6.4342E 05	

SEGMENTO # 7		
FLUJO RADIAL		
r	r	r
1	2.7396E 06	
2	2.6786E 06	
3	2.6181E 06	
4	2.5426E 06	
5	2.5433E 06	
6	2.3518E 06	
7	2.3198E 06	
8	2.1816E 06	
9	1.9130E 06	
10	1.6595E 06	
11	1.2966E 06	

SEGMENTO # 2		
FLUJO RADIAL		
r	r	r
1	3.5272E 05	
2	3.0466E 05	
3	2.5698E 05	
4	1.8645E 05	
5	1.5257E 05	
6	1.4076E 05	
7	1.4474E 05	
8	1.6779E 05	
9	2.2251E 05	
10	2.4394E 05	
11	2.4257E 05	

SEGMENTO # 5		
FLUJO RADIAL		
r	r	r
1	1.4750E 06	
2	1.3547E 06	
3	1.2190E 06	
4	9.8327E 05	
5	8.7295E 05	
6	8.1835E 05	
7	7.9881E 05	
8	8.1960E 05	
9	9.2648E 05	
10	9.0818E 05	
11	7.9133E 05	

SEGMENTO # 8		
FLUJO RADIAL		
r	r	r
1	3.4228E 06	
2	3.3800E 06	
3	3.3302E 06	
4	3.2442E 06	
5	3.2462E 06	
6	3.0106E 06	
7	2.9492E 06	
8	2.7546E 06	
9	2.4064E 06	
10	2.0539E 06	
11	1.5650E 06	

SEGMENTO # 3		
FLUJO RADIAL		
r	r	r
1	7.3933E 05	
2	6.5322E 05	
3	5.6579E 05	
4	4.3582E 05	
5	3.7303E 05	
6	3.4733E 05	
7	3.4724E 05	
8	3.7755E 05	
9	4.6125E 05	
10	4.8308E 05	
11	4.5681E 05	

SEGMENTO # 6		
FLUJO RADIAL		
r	r	r
1	2.0626E 06	
2	1.9559E 06	
3	1.8286E 06	
4	1.5821E 06	
5	1.4739E 06	
6	1.3890E 06	
7	1.3436E 06	
8	1.3127E 06	
9	1.3502E 06	
10	1.2520E 06	
11	1.0315E 06	

SEGMENTO # 9		
FLUJO RADIAL		
r	r	r
1	4.3862E 06	
2	4.3409E 06	
3	4.2771E 06	
4	4.1503E 06	
5	4.1470E 06	
6	3.8469E 06	
7	3.7515E 06	
8	3.4898E 06	
9	3.0564E 06	
10	2.5955E 06	
11	1.9499E 06	

(CONTINUACION)

RPO  
 CALC. BIDIMENS  
 REACTOR COMPLETO  
 POTENCIA 1w  
 GEOMETRIA R-Z  
 GRUPO 3

SEGMENTO # 1		SEGMENTO # 4		SEGMENTO # 7	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	raf	r	raf	r	raf
1	6.5201E 04	1	6.6770E 05	1	1.5102E 06
2	5.5303E 04	2	5.9192E 05	2	1.4287E 06
3	4.5841E 04	3	5.0730E 05	3	1.3485E 06
4	3.1237E 04	4	4.1843E 05	4	1.2269E 06
5	2.4251E 04	5	3.9016E 05	5	1.1595E 06
6	2.2295E 04	6	3.7539E 05	6	1.0968E 06
7	2.4138E 04	7	3.7517E 05	7	1.0595E 06
8	3.1187E 04	8	3.8794E 05	8	1.0267E 06
9	4.7239E 04	9	4.4555E 05	9	1.0289E 06
10	5.5345E 04	10	4.7713E 05	10	9.8720E 05
11	5.9903E 04	11	4.6853E 05	11	8.7826E 05

SEGMENTO # 2		SEGMENTO # 5		SEGMENTO # 8	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	raf	r	raf	r	raf
1	2.1929E 05	1	8.5021E 05	1	1.8657E 06
2	1.8797E 05	2	7.6730E 05	2	1.7803E 06
3	1.5777E 05	3	6.8190E 05	3	1.6949E 06
4	1.1052E 05	4	5.4234E 05	4	1.5603E 06
5	8.7805E 04	5	4.7712E 05	5	1.4817E 06
6	8.0970E 04	6	4.4894E 05	6	1.4030E 06
7	8.5748E 04	7	4.4467E 05	7	1.3470E 06
8	1.0643E 05	8	4.7206E 05	8	1.2897E 06
9	1.5497E 05	9	5.6637E 05	9	1.2674E 06
10	1.7797E 05	10	5.9009E 05	10	1.1957E 06
11	1.8872E 05	11	5.6558E 05	11	1.0421E 06

SEGMENTO # 3		SEGMENTO # 6		SEGMENTO # 9	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	raf	r	raf	r	raf
1	4.4537E 05	1	1.1611E 06	1	2.3744E 06
2	3.8909E 05	2	1.0762E 06	2	2.2737E 06
3	3.3461E 05	3	9.8904E 05	3	2.1697E 06
4	2.5316E 05	4	8.4078E 05	4	1.9999E 06
5	2.1443E 05	5	7.6515E 05	5	1.8995E 06
6	2.0071E 05	6	7.2126E 05	6	1.7969E 06
7	2.0470E 05	7	7.0240E 05	7	1.7184E 06
8	2.3264E 05	8	7.1006E 05	8	1.6358E 06
9	3.0572E 05	9	7.7958E 05	9	1.5951E 06
10	3.3703E 05	10	7.7789E 05	10	1.4906E 06
11	3.4358E 05	11	7.1645E 05	11	1.2794E 06

(CONTINUACION)

RPO  
CALC. BIDIMENS  
REACTOR COMPLETO  
POTENCIA 1w  
GEOMETRIA R-2  
GRUPO 4

SEGMENTO # 1  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	8.4305E 04
2	7.4952E 04
3	6.5790E 04
4	5.0648E 04
5	4.0990E 04
6	3.8241E 04
7	4.1477E 04
8	5.1375E 04
9	6.6476E 04
10	7.3384E 04
11	7.6493E 04

SEGMENTO # 4  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	8.2450E 05
2	7.6730E 05
3	7.0085E 05
4	6.2777E 05
5	6.0015E 05
6	5.8230E 05
7	5.7486E 05
8	5.7792E 05
9	5.9880E 05
10	6.0164E 05
11	5.7057E 05

SEGMENTO # 7  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	1.8093E 06
2	1.7905E 06
3	1.7793E 06
4	1.7797E 06
5	2.0043E 06
6	2.8665E 06
7	1.7871E 06
8	1.4265E 06
9	1.2914E 06
10	1.1836E 06
11	1.0276E 06

SEGMENTO # 2  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	2.8054E 05
2	2.5222E 05
3	2.2425E 05
4	1.7726E 05
5	1.4692E 05
6	1.3739E 05
7	1.4552E 05
8	1.7314E 05
9	2.1589E 05
10	2.3354E 05
11	2.3849E 05

SEGMENTO # 5  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	1.0404E 06
2	9.8339E 05
3	9.2230E 05
4	8.1248E 05
5	7.4910E 05
6	7.2142E 05
7	6.9924E 05
8	7.0646E 05
9	7.4421E 05
10	7.3399E 05
11	6.8144E 05

SEGMENTO # 8  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	2.2207E 06
2	2.2164E 06
3	2.2204E 06
4	2.2436E 06
5	2.5183E 06
6	3.4716E 06
7	2.2341E 06
8	1.7706E 06
9	1.5721E 06
10	1.4176E 06
11	1.2065E 06

SEGMENTO # 3  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	5.5937E 05
2	5.1305E 05
3	4.6769E 05
4	3.9647E 05
5	3.4968E 05
6	3.3168E 05
7	3.3718E 05
8	3.6807E 05
9	4.1805E 05
10	4.3379E 05
11	4.2604E 05

SEGMENTO # 6  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	1.4042E 06
2	1.3621E 06
3	1.3193E 06
4	1.2426E 06
5	1.2231E 06
6	1.2605E 06
7	1.1127E 06
8	1.0321E 06
9	1.0003E 06
10	9.4877E 05
11	8.4982E 05

SEGMENTO # 9  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	2.8104E 06
2	2.8155E 06
3	2.8278E 06
4	2.8617E 06
5	3.1945E 06
6	4.3517E 06
7	2.8221E 06
8	2.2337E 06
9	1.9624E 06
10	1.7503E 06
11	1.4657E 06

(CONTINUACION)

RPO  
CALC. BIDIMENS  
POTENCIA 1w  
GEOMETRIA R-2  
GRUPO 5

SEGMENTO # 1  
FLUJO RADIAL

#r	#araf
1	8.2459E 05
2	8.1409E 05
3	8.0208E 05
4	7.4724E 05
5	6.7690E 05
6	6.3142E 05
7	6.0207E 05
8	5.6641E 05
9	5.1123E 05
10	4.7919E 05
11	4.2479E 05

SEGMENTO # 4  
FLUJO RADIAL

#r	#araf
1	5.2236E 06
2	5.1812E 06
3	5.0718E 06
4	4.7949E 06
5	4.6493E 06
6	4.4597E 06
7	4.2387E 06
8	4.0057E 06
9	3.4002E 06
10	2.9863E 06
11	2.5744E 06

SEGMENTO # 2  
FLUJO RADIAL

#r	#araf
1	2.4914E 06
2	2.4703E 06
3	2.4485E 06
4	2.3554E 06
5	2.1873E 06
6	2.0559E 06
7	1.9456E 06
8	1.7865E 06
9	1.5601E 06
10	1.4473E 06
11	1.2709E 06

SEGMENTO # 5  
FLUJO RADIAL

#r	#araf
1	5.9898E 06
2	5.9826E 06
3	5.9974E 06
4	6.2299E 06
5	6.0913E 06
6	5.7823E 06
7	5.3615E 06
8	4.6582E 06
9	3.7010E 06
10	3.3398E 06
11	2.9089E 06

SEGMENTO # 3  
FLUJO RADIAL

#r	#araf
1	4.1705E 06
2	4.1502E 06
3	4.1386E 06
4	4.1969E 06
5	4.0508E 06
6	3.8603E 06
7	3.6317E 06
8	3.2406E 06
9	2.8658E 06
10	2.4207E 06
11	2.0938E 06

SEGMENTO # 6  
FLUJO RADIAL

#r	#araf
1	6.9666E 06
2	6.9638E 06
3	7.0228E 06
4	7.6232E 06
5	7.3139E 06
6	6.7041E 06
7	6.2055E 06
8	5.2640E 06
9	4.0298E 06
10	3.7090E 06
11	3.3154E 06

TABLA 4.11

DISTRIBUCION DE FLUJO POR PUNTOS REACTOR CON 2 REGIONES : REFLECTOR INTERNO Y COMBUSTIBLE

RPO  
 CALC. BIDIMENS  
 CONDICIONES DE  
 CONTORNO  
 INTERNAS  
 POTENCIA 1w  
 GEOMETRIA R-Z  
 GRUPO 1

SEGMENTO # 1		SEGMENTO # 4		SEGMENTO # 7	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>
1	5.8565E 04	1	7.1747E 05	1	1.8729E 06
2	5.2740E 04	2	6.8878E 05	2	1.9968E 06
3	4.6864E 04	3	6.4929E 05	3	2.1394E 06
4	3.9403E 04	4	5.9129E 05	4	2.3645E 06
5	3.5133E 04	5	5.5311E 05	5	2.4705E 06
6	3.2859E 04	6	5.2171E 05	6	2.2907E 06
7	3.1992E 04	7	4.9454E 05	7	2.2283E 06
8	3.2498E 04	8	4.7133E 05	8	1.9947E 06
9	3.4878E 04	9	4.4958E 05	9	1.4648E 06
10	3.4108E 04	10	3.9423E 05	10	1.0736E 06
11	2.9527E 04	11	2.9341E 05	11	6.6557E 05

SEGMENTO # 2		SEGMENTO # 5		SEGMENTO # 8	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>
1	2.0474E 05	1	9.4731E 05	1	2.3738E 06
2	1.8640E 05	2	9.2703E 05	2	2.5593E 06
3	1.6720E 05	3	8.8948E 05	3	2.7619E 06
4	1.4210E 05	4	8.0684E 05	4	3.0439E 06
5	1.2787E 05	5	7.6029E 05	5	3.1746E 06
6	1.1950E 05	6	7.1907E 05	6	2.9533E 06
7	1.1554E 05	7	6.7904E 05	7	2.8564E 06
8	1.1578E 05	8	6.3841E 05	8	2.5484E 06
9	1.2186E 05	9	6.0757E 05	9	1.8838E 06
10	1.1674E 05	10	5.2004E 05	10	1.3633E 06
11	9.8157E 04	11	3.7255E 05	11	8.2339E 05

SEGMENTO # 3		SEGMENTO # 6		SEGMENTO # 9	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>
1	4.4624E 05	1	1.3712E 06	1	3.0681E 06
2	4.1591E 05	2	1.4007E 06	2	3.3110E 06
3	3.8178E 05	3	1.4118E 06	3	3.5658E 06
4	3.3403E 05	4	1.3799E 06	4	3.9052E 06
5	3.0576E 05	5	1.3593E 06	5	4.0657E 06
6	2.8880E 05	6	1.2934E 06	6	3.7853E 06
7	2.7415E 05	7	1.2210E 06	7	3.6464E 06
8	2.6763E 05	8	1.1098E 06	8	3.2440E 06
9	2.6960E 05	9	9.5942E 05	9	2.4174E 06
10	2.4775E 05	10	7.6591E 05	10	1.7499E 06
11	1.9666E 05	11	5.0925E 05	11	1.0467E 06



(CONTINUACION)

RPO  
 CALC. BIDIMENS  
 CONDICIONES DE  
 CONTORNO  
 INTERNAS  
 POTENCIA 1w  
 GEOMETRIA R-Z  
 GRUPO 2

SEGMENTO # 1		SEGMENTO # 4		SEGMENTO # 7	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	raf	r	raf	r	raf
1	1.0326E 05	1	1.1454E 06	1	2.7525E 06
2	8.8153E 04	2	1.0345E 06	2	2.6909E 06
3	7.3436E 04	3	9.1105E 05	3	2.6295E 06
4	5.2167E 04	4	7.6929E 05	4	2.5529E 06
5	4.1869E 04	5	6.9536E 05	5	2.5519E 06
6	3.8404E 04	6	6.5371E 05	6	2.3566E 06
7	3.9908E 04	7	6.4132E 05	7	2.3205E 06
8	4.7306E 04	8	6.5543E 05	8	2.1777E 06
9	6.4173E 04	9	7.0627E 05	9	1.9055E 06
10	7.1172E 04	10	7.0308E 05	10	1.6475E 06
11	7.1008E 04	11	6.2253E 05	11	1.2768E 06

SEGMENTO # 2		SEGMENTO # 5		SEGMENTO # 8	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	raf	r	raf	r	raf
1	3.5355E 05	1	1.4806E 06	1	3.4405E 06
2	3.0526E 05	2	1.3594E 06	2	3.3971E 06
3	2.5735E 05	3	1.2229E 06	3	3.3466E 06
4	1.8652E 05	4	9.8576E 05	4	3.2595E 06
5	1.5231E 05	5	8.7419E 05	5	3.2595E 06
6	1.4003E 05	6	8.1819E 05	6	3.0196E 06
7	1.4326E 05	7	7.9683E 05	7	2.9536E 06
8	1.6492E 05	8	8.1498E 05	8	2.7537E 06
9	2.1700E 05	9	9.1746E 05	9	2.4015E 06
10	2.3569E 05	10	8.9448E 05	10	2.0443E 06
11	2.2961E 05	11	7.6960E 05	11	1.5478E 06

SEGMENTO # 3		SEGMENTO # 6		SEGMENTO # 9	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	raf	r	raf	r	raf
1	7.4151E 05	1	2.0714E 06	1	4.4114E 06
2	6.5490E 05	2	1.9638E 06	2	4.3657E 06
3	5.6698E 05	3	1.8357E 06	3	4.3013E 06
4	4.3636E 05	4	1.5874E 06	4	4.1735E 06
5	3.7291E 05	5	1.4776E 06	5	4.1683E 06
6	3.4639E 05	6	1.3907E 06	6	3.8630E 06
7	3.4509E 05	7	1.3427E 06	7	3.7627E 06
8	3.7336E 05	8	1.3085E 06	8	3.4951E 06
9	4.5322E 05	9	1.3415E 06	9	3.0567E 06
10	4.7098E 05	10	1.2386E 06	10	2.5907E 06
11	4.3773E 05	11	1.0101E 06	11	1.9374E 06

(CONTINUACION)

RPO  
CALC. BIDIMENS  
CONDICIONES DE  
CONTORNO  
INTERNAS  
POTENCIA 1w  
GEOMETRIA R-Z  
GRUPO 3

SEGMENTO # 1		SEGMENTO # 4		SEGMENTO # 7	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>
1	6.5316E 04	1	6.6981E 05	1	1.5171E 06
2	5.5374E 04	2	5.9350E 05	2	1.4350E 06
3	4.5879E 04	3	5.0820E 05	3	1.3542E 06
4	3.1223E 04	4	4.1839E 05	4	1.2316E 06
5	2.4168E 04	5	3.8952E 05	5	1.1631E 06
6	2.2100E 04	6	3.7391E 05	6	1.0987E 06
7	2.3732E 04	7	3.7261E 05	7	1.0593E 06
8	3.0325E 04	8	3.8408E 05	8	1.0236E 06
9	4.5383E 04	9	4.3779E 05	9	1.0215E 06
10	5.2568E 04	10	4.6474E 05	10	9.7557E 05
11	5.5608E 04	11	4.4916E 05	11	8.5993E 05

SEGMENTO # 2		SEGMENTO # 5		SEGMENTO # 8	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>
1	2.1974E 05	1	8.5320E 05	1	1.8750E 06
2	1.8828E 05	2	7.6973E 05	2	1.7890E 06
3	1.5795E 05	3	6.8378E 05	3	1.7029E 06
4	1.1054E 05	4	5.4342E 05	4	1.5673E 06
5	8.7629E 04	5	4.7743E 05	5	1.4874E 06
6	8.0438E 04	6	4.4836E 05	6	1.4067E 06
7	8.4611E 04	7	4.4282E 05	7	1.3484E 06
8	1.0400E 05	8	4.6805E 05	8	1.2881E 06
9	1.4976E 05	9	5.5789E 05	9	1.2617E 06
10	1.7015E 05	10	5.7716E 05	10	1.1859E 06
11	1.7661E 05	11	5.4545E 05	11	1.0261E 06

SEGMENTO # 3		SEGMENTO # 6		SEGMENTO # 9	
FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL		FLUJO RADIAL	
r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>	r	r <sub>af</sub>
1	4.4652E 05	1	1.1659E 06	1	2.3877E 06
2	3.8991E 05	2	1.0880E 06	2	2.2863E 06
3	3.3513E 05	3	9.9262E 05	3	2.1816E 06
4	2.5332E 05	4	8.4346E 05	4	2.0106E 06
5	2.1418E 05	5	7.6687E 05	5	1.9086E 06
6	1.9989E 05	6	7.2179E 05	6	1.8039E 06
7	2.0297E 05	7	7.0129E 05	7	1.7229E 06
8	2.2909E 05	8	7.0636E 05	8	1.6372E 06
9	2.9818E 05	9	7.7123E 05	9	1.5925E 06
10	3.2562E 05	10	7.6515E 05	10	1.4842E 06
11	3.2583E 05	11	6.9664E 05	11	1.2677E 06

(CONTINUACION)

RPO  
CALC. BIDIMENS  
CONDICIONES DE  
CONTORNO  
INTERNAS  
POTENCIA 1W  
GEOMETRIA R-Z  
GRUPO 4

SEGMENTO # 1  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	8.4361E 04
2	7.4959E 04
3	6.5770E 04
4	5.0572E 04
5	4.0790E 04
6	3.7814E 04
7	4.0636E 04
8	4.9756E 04
9	6.3648E 04
10	6.9439E 04
11	7.0694E 04

SEGMENTO # 4  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	8.2628E 05
2	7.6850E 05
3	7.0121E 05
4	6.2682E 05
5	5.9827E 05
6	5.7911E 05
7	5.7000E 05
8	5.7114E 05
9	5.8691E 05
10	5.8390E 05
11	5.4416E 05

SEGMENTO # 7  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	1.8163E 06
2	1.7970E 06
3	1.7855E 06
4	1.7852E 06
5	2.0072E 06
6	2.8676E 06
7	1.7856E 06
8	1.4207E 06
9	1.2797E 06
10	1.1665E 06
11	1.0018E 06

SEGMENTO # 2  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	2.8080E 05
2	2.5233E 05
3	2.2424E 05
4	1.7710E 05
5	1.4637E 05
6	1.3620E 05
7	1.4315E 05
8	1.6858E 05
9	2.0794E 05
10	2.2242E 05
11	2.2213E 05

SEGMENTO # 5  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	1.0431E 06
2	9.8555E 05
3	9.2389E 05
4	8.1325E 05
5	7.4873E 05
6	7.1954E 05
7	6.9519E 05
8	6.9897E 05
9	7.3117E 05
10	7.1539E 05
11	6.5387E 05

SEGMENTO # 8  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	2.2304E 06
2	2.2257E 06
3	2.2294E 06
4	2.2521E 06
5	2.5253E 06
6	3.4774E 06
7	2.2353E 06
8	1.7670E 06
9	1.5626E 06
10	1.4027E 06
11	1.1836E 06

SEGMENTO # 3  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	5.6019E 05
2	5.1351E 05
3	4.6784E 05
4	3.9623E 05
5	3.4876E 05
6	3.2973E 05
7	3.3354E 05
8	3.6144E 05
9	4.0654E 05
10	4.1753E 05
11	4.0199E 05

SEGMENTO # 6  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	1.4088E 06
2	1.3662E 06
3	1.3230E 06
4	1.2457E 06
5	1.2247E 06
6	1.2602E 06
7	1.1098E 06
8	1.0250E 06
9	9.8728E 05
10	9.3025E 05
11	8.2239E 05

SEGMENTO # 9  
FLUJO RADIAL

r	r <sub>af</sub>
1	2.8245E 06
2	2.8294E 06
3	2.8415E 06
4	2.8752E 06
5	3.2072E 06
6	4.3652E 06
7	2.8283E 06
8	2.2332E 06
9	1.9570E 06
10	1.7398E 06
11	1.4481E 06

(CONTINUACION)

RPO  
CALC. BIDIMENS  
CONDICIONES DE  
CONITORNO  
INTERNAS  
POTENCIA 1w  
GEOMETRIA R-Z  
GRUPO 5

SEGMENTO # 1  
FLUJO RADIAL

r	raf
1	8.2204E 05
2	8.1130E 05
3	7.9911E 05
4	7.4360E 05
5	6.7146E 05
6	6.2341E 05
7	5.9086E 05
8	5.5200E 05
9	4.9622E 05
10	4.6338E 05
11	4.0714E 05

SEGMENTO # 4  
FLUJO RADIAL

r	raf
1	5.2178E 06
2	5.1719E 06
3	5.0563E 06
4	4.7681E 06
5	4.6170E 06
6	4.4211E 06
7	4.1936E 06
8	3.9545E 06
9	3.3353E 06
10	2.9119E 06
11	2.4878E 06

SEGMENTO # 7  
FLUJO RADIAL

r	raf
1	7.8340E 06
2	7.6972E 06
3	7.5287E 06
4	6.6717E 06
5	4.4884E 06
6	2.0361E 06
7	3.4841E 06
8	3.5720E 06
9	3.9615E 06
10	3.8715E 06
11	3.5762E 06

SEGMENTO # 2  
FLUJO RADIAL

r	raf
1	2.4845E 06
2	2.4626E 06
3	2.4401E 06
4	2.3450E 06
5	2.1718E 06
6	2.0332E 06
7	1.9141E 06
8	1.7460E 06
9	1.5178E 06
10	1.4025E 06
11	1.2206E 06

SEGMENTO # 5  
FLUJO RADIAL

r	raf
1	5.9877E 06
2	5.9778E 06
3	5.9901E 06
4	6.2166E 06
5	6.0690E 06
6	5.7491E 06
7	5.3151E 06
8	4.5964E 06
9	3.6303E 06
10	3.2602E 06
11	2.8158E 06

SEGMENTO # 8  
FLUJO RADIAL

r	raf
1	8.6985E 06
2	8.5041E 06
3	8.2857E 06
4	7.3993E 06
5	4.7887E 06
6	2.0785E 06
7	3.6273E 06
8	3.7741E 06
9	4.1914E 06
10	4.1642E 06
11	3.9231E 06

SEGMENTO # 3  
FLUJO RADIAL

r	raf
1	4.1617E 06
2	4.1393E 06
3	4.1258E 06
4	4.1798E 06
5	4.0261E 06
6	3.8260E 06
7	3.5860E 06
8	3.1828E 06
9	2.6041E 06
10	2.3540E 06
11	2.0178E 06

SEGMENTO # 6  
FLUJO RADIAL

r	raf
1	6.9772E 06
2	6.9888E 06
3	7.0226E 06
4	7.6259E 06
5	7.3076E 06
6	6.6845E 06
7	6.1681E 06
8	5.2044E 06
9	3.9564E 06
10	3.6263E 06
11	3.2175E 06

SEGMENTO # 9  
FLUJO RADIAL

r	raf
1	1.0046E 07
2	9.8484E 06
3	9.6484E 06
4	8.9314E 06
5	5.8637E 06
6	2.5609E 06
7	4.4126E 06
8	4.4674E 06
9	4.7202E 06
10	4.6797E 06
11	4.4388E 06

TABLA 4.12  
TIEMPOS Y NUMERO DE ITERACIONES  
PRECISION PARA EL CALCULO DE FLUJO  $1.0E^{-3}$

TIPO DE CALCULO	TIEMPO CPU (seg)	NUMERO DE ITERACIONES (Conv. de flujo)
COMPLETO	163.54	56
CON CONDICIONES DE CONTORNO INTERNAS	143.25	55

FLUJOS, FACTOR DE MULTIPLICACION, FACTOR DE FORMA

TIPO DE CALCULO	K	FLUJOS MEDIOS ( n / cm <sup>2</sup> seg )							EN EL REACTOR (x1E5)	
		EN EL COMBUSTIBLE (x1E6)							g = 1	g = 2
		g = 1	g = 2	g = 3	g = 4	térmico	g = 1	g = 2		
COMPLETO	1.06319	4.22896	4.42749	2.06544	3.52642	5.71337	4.69091	7.32839		
CON CON-DICIONES DE CONTORNO INTERNAS	1.05965	4.24361	4.44108	2.07106	3.53440	5.71542	4.14414	5.73008		

TABLA 4.13

(CONTINUACION)

TIPO DE CALCULO	FLUJOS MEDIOS (n/cm <sup>2</sup> seg)		FACTOR DE FORMA $\phi_{Max} / \bar{\phi}$							
	EN EL REACTOR (X1E5)		g = 3	g = 4	térmico	g = 1	g = 2	g = 3	g = 4	Térmico
COMPLETO	4.67811	6.17304			20.0174	1.39337	1.36925	1.4172	1.79156	2.21694
CON CONDI- CIONES DE CONTORNO INTERNAS	3.28375	4.39002			1.25619	1.3973	1.37366	1.42187	1.79576	2.22733

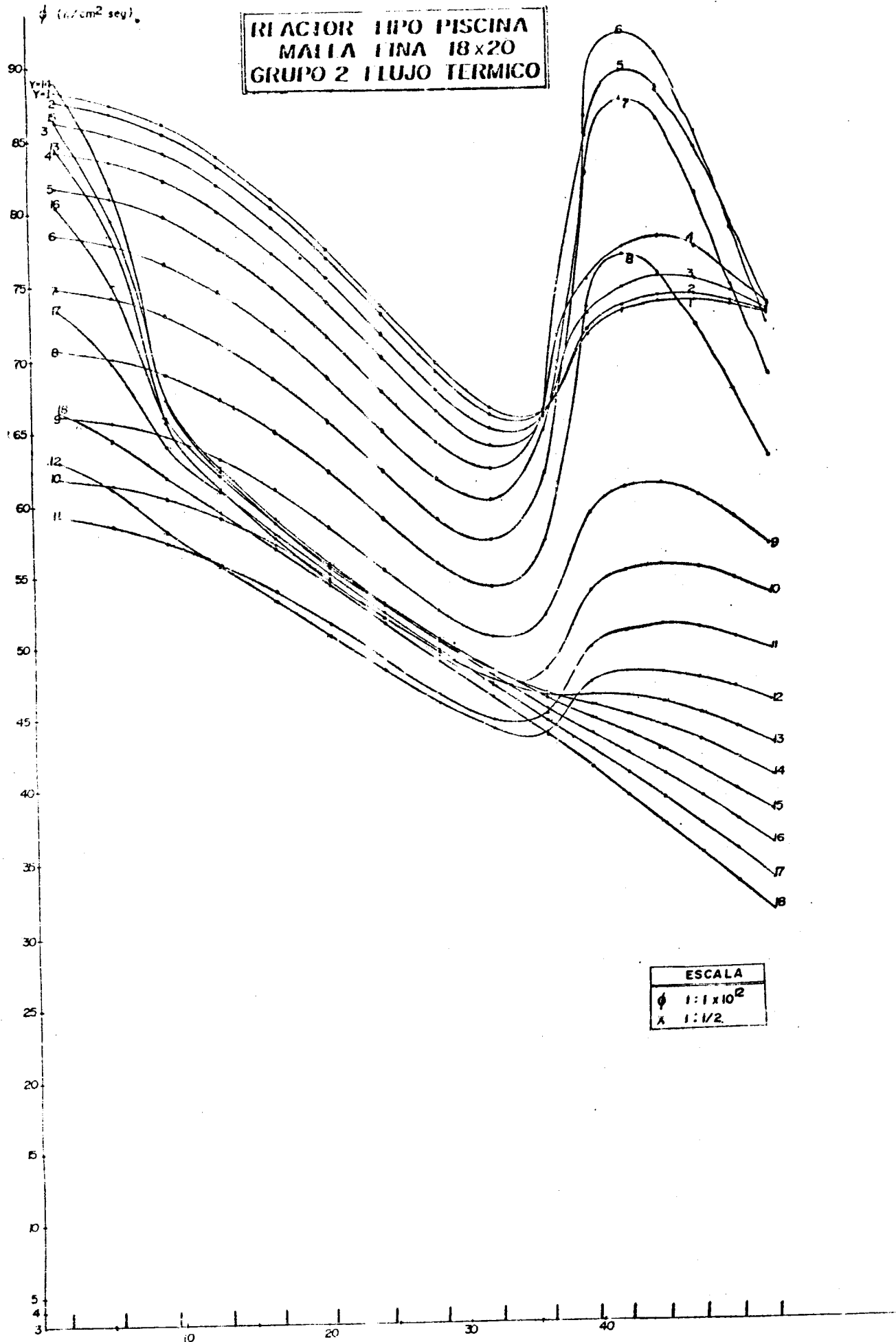
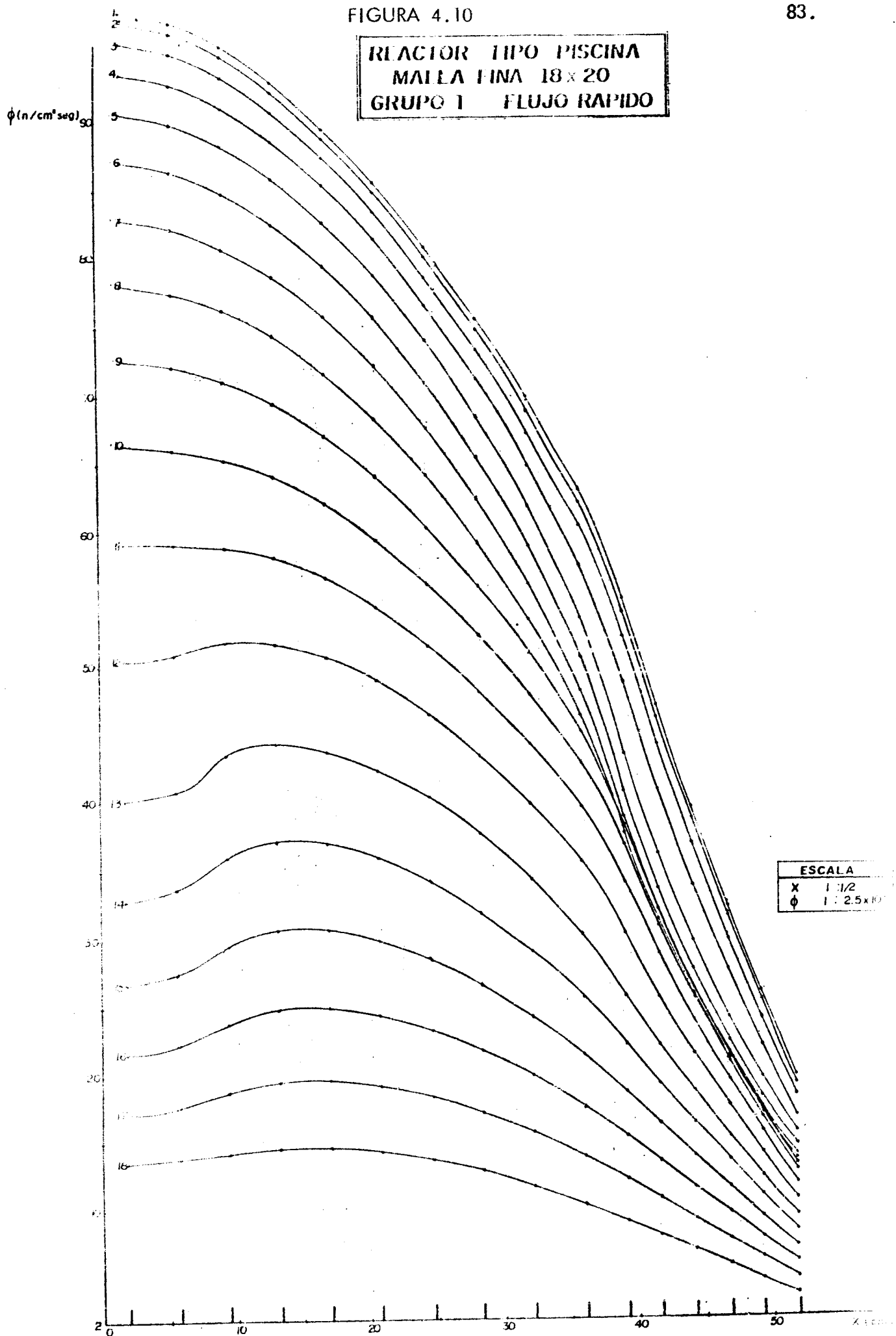


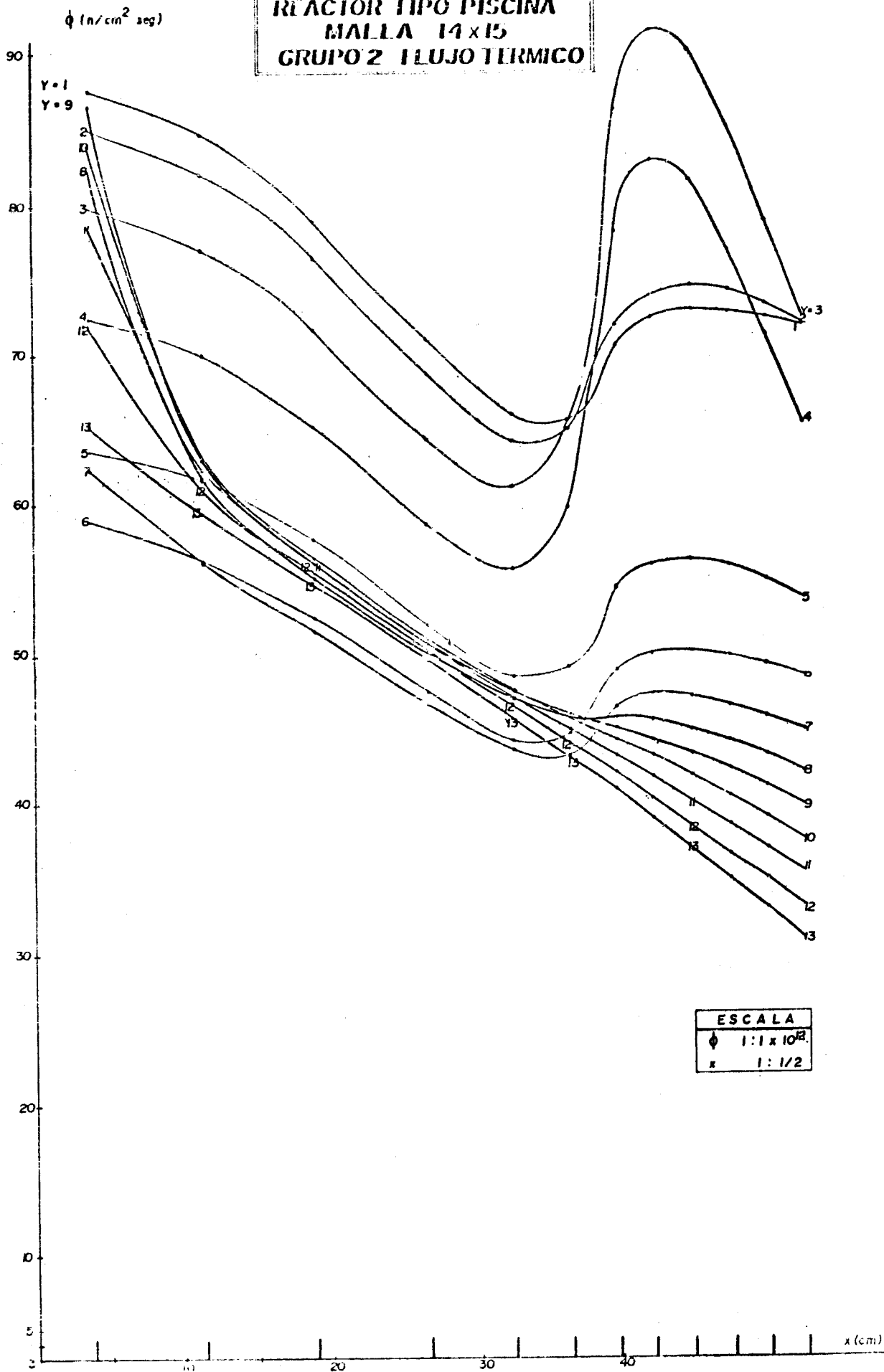


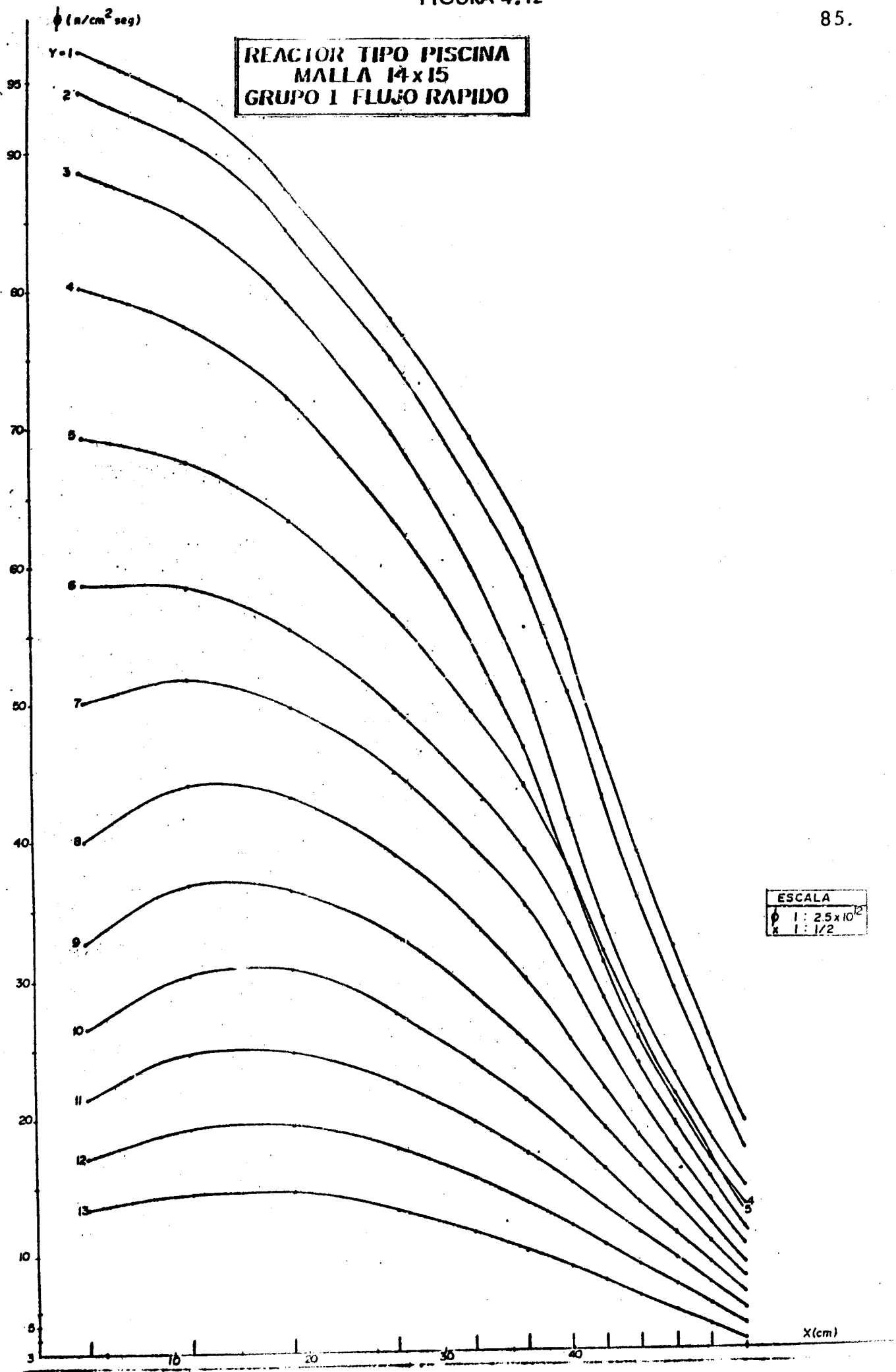
FIGURA 4.10

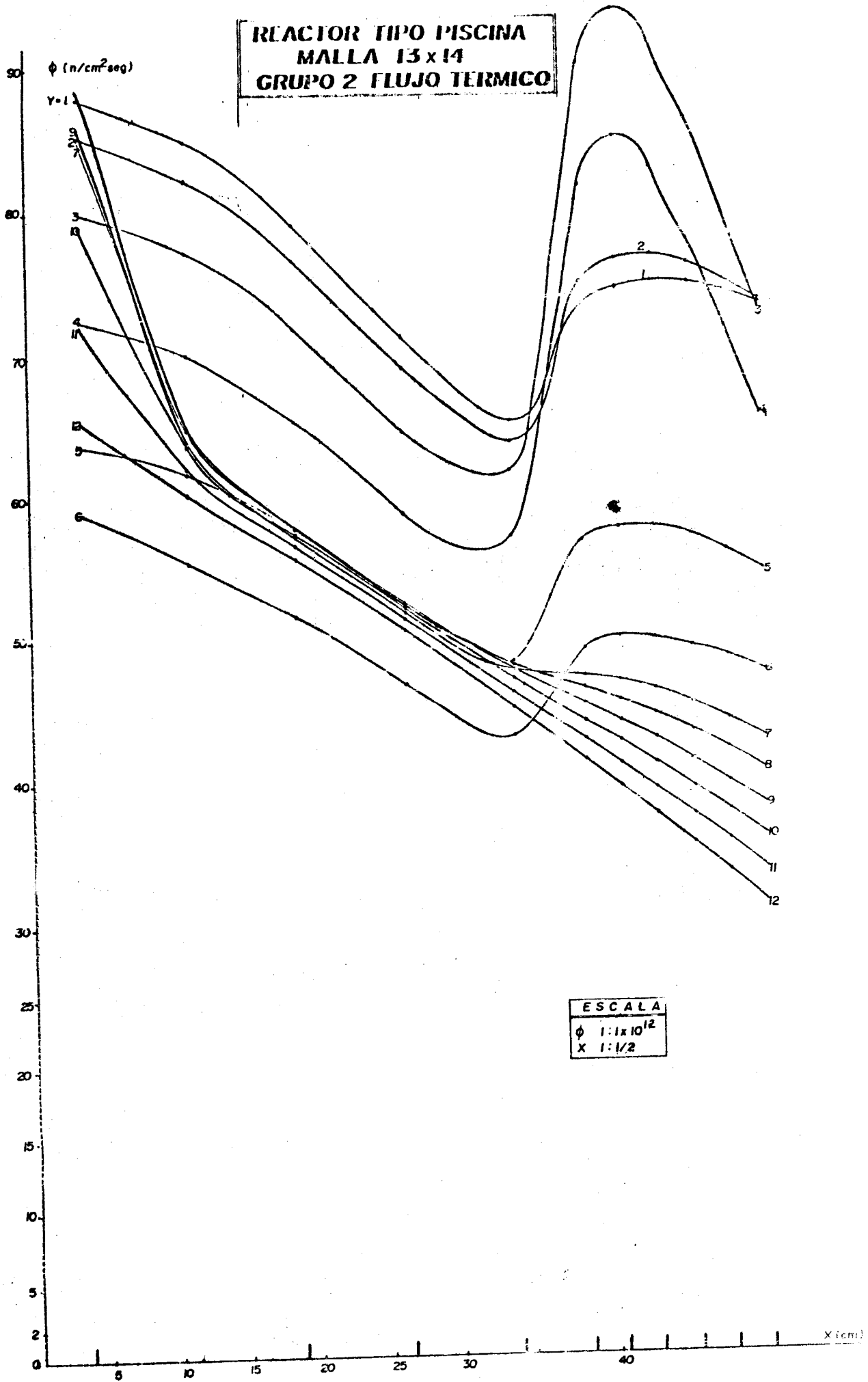
REACTOR TIPO PISCINA  
MALEA FINA 18x20  
GRUPO 1 FLUJO RAPIDO



**REACTOR TIPO PISCINA  
MALLA 14x15  
GRUPO 2 FLUJO TERMICO**







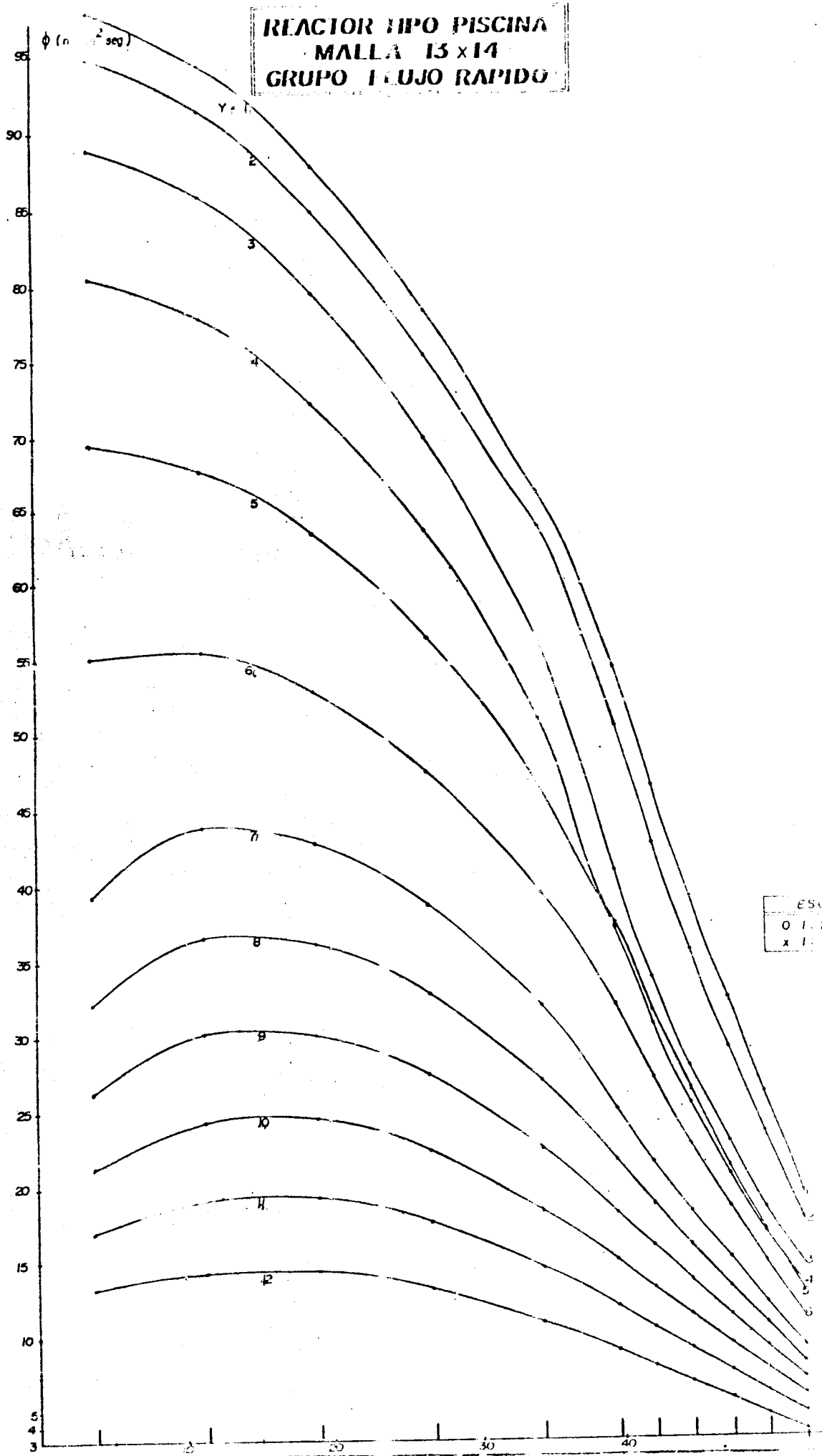
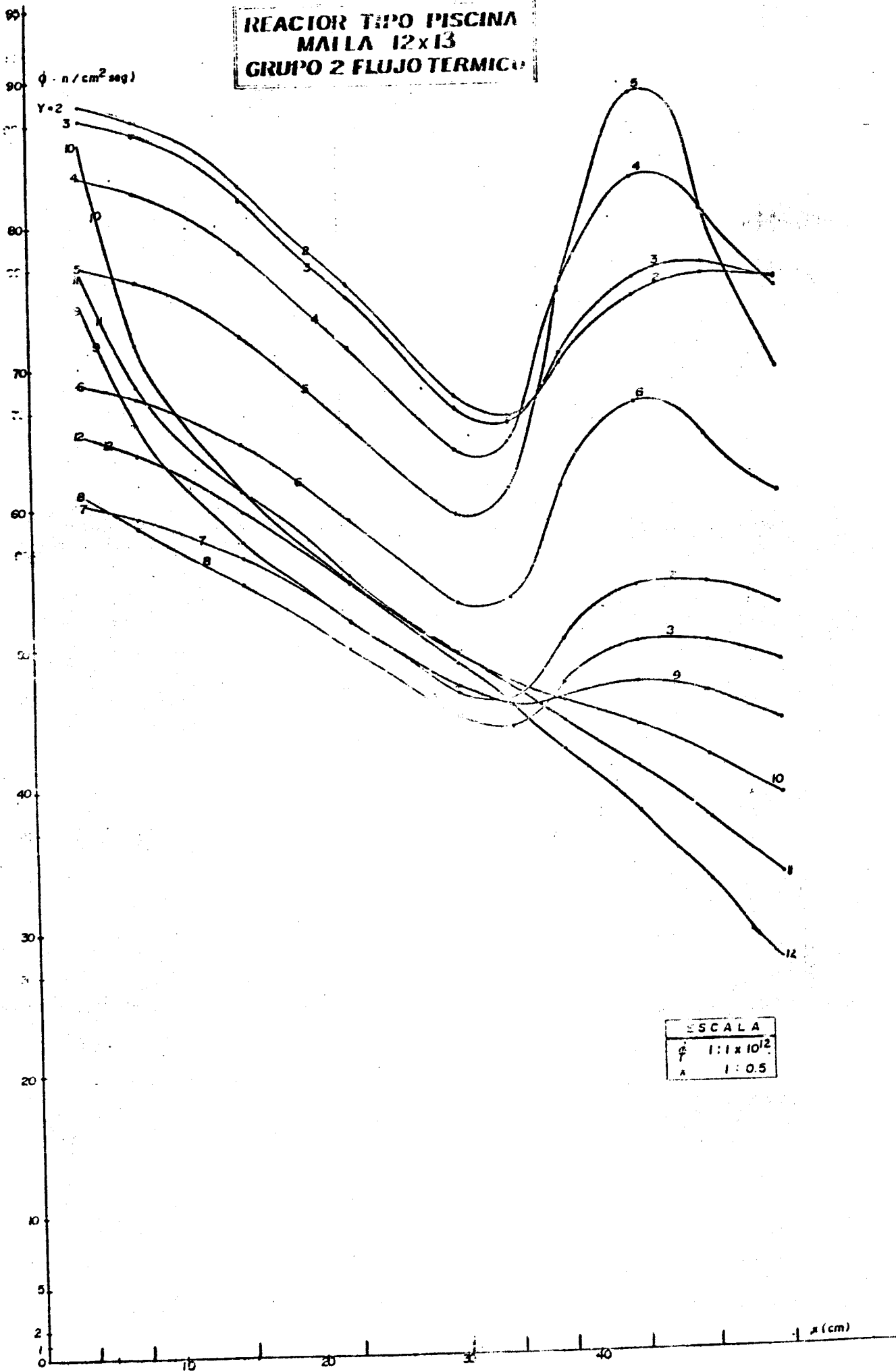


FIGURA 4.1.5

**REACTOR TIPO PISCINA  
MALLA 12x13  
GRUPO 2 FLUJO TERMICO**

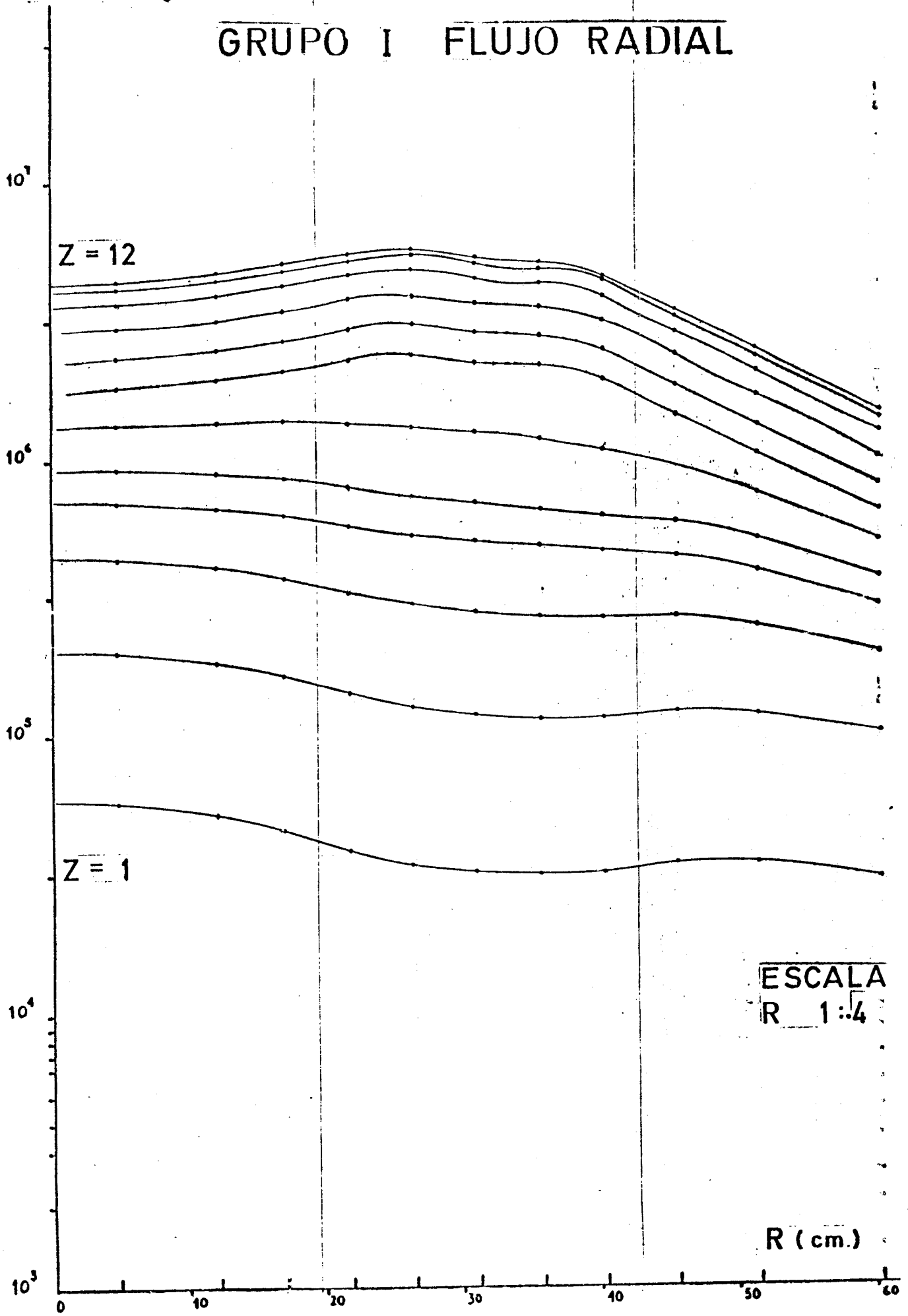




$\phi$  (n/cm<sup>2</sup>seg)

RPO

GRUPO I FLUJO RADIAL

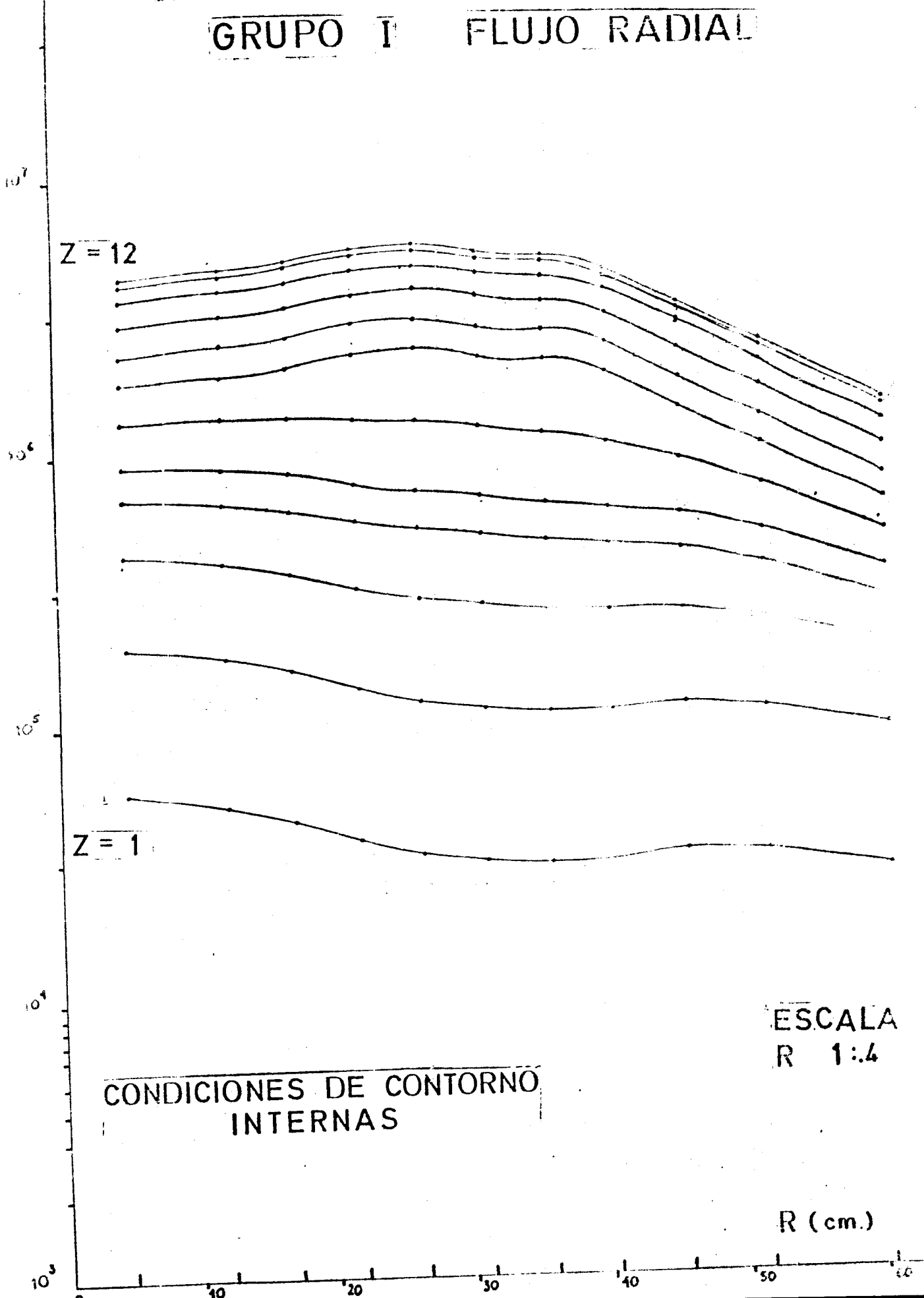




RPO

GRUPO I FLUJO RADIAL

$\phi$  (n/cm<sup>2</sup>seg)



RPO

GRUPO II FLUJO RADIAL

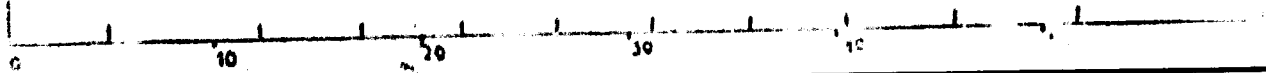
(n/cm<sup>2</sup>seg)

Z = 12

Z = 1

ESCALA  
R 1:4

R (cm)



RPO

GRUPO II FLUJO RADIAL

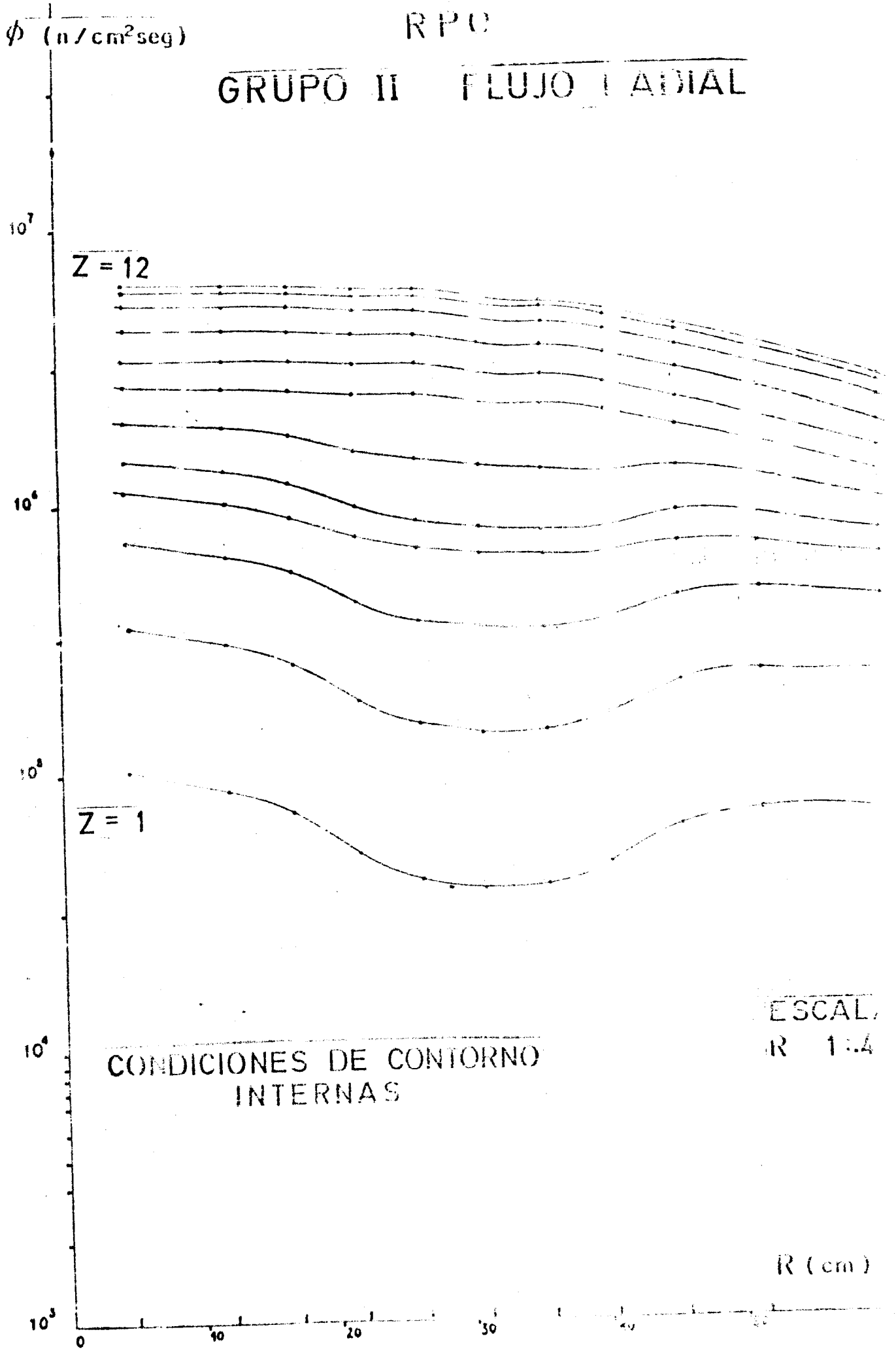


FIGURA 4.21

$\phi$  (n/cm<sup>2</sup>seg)

RPO

GRUPO III FLUJO RADIAL

10<sup>7</sup>

Z = 12

10<sup>6</sup>

10<sup>5</sup>

Z = 1

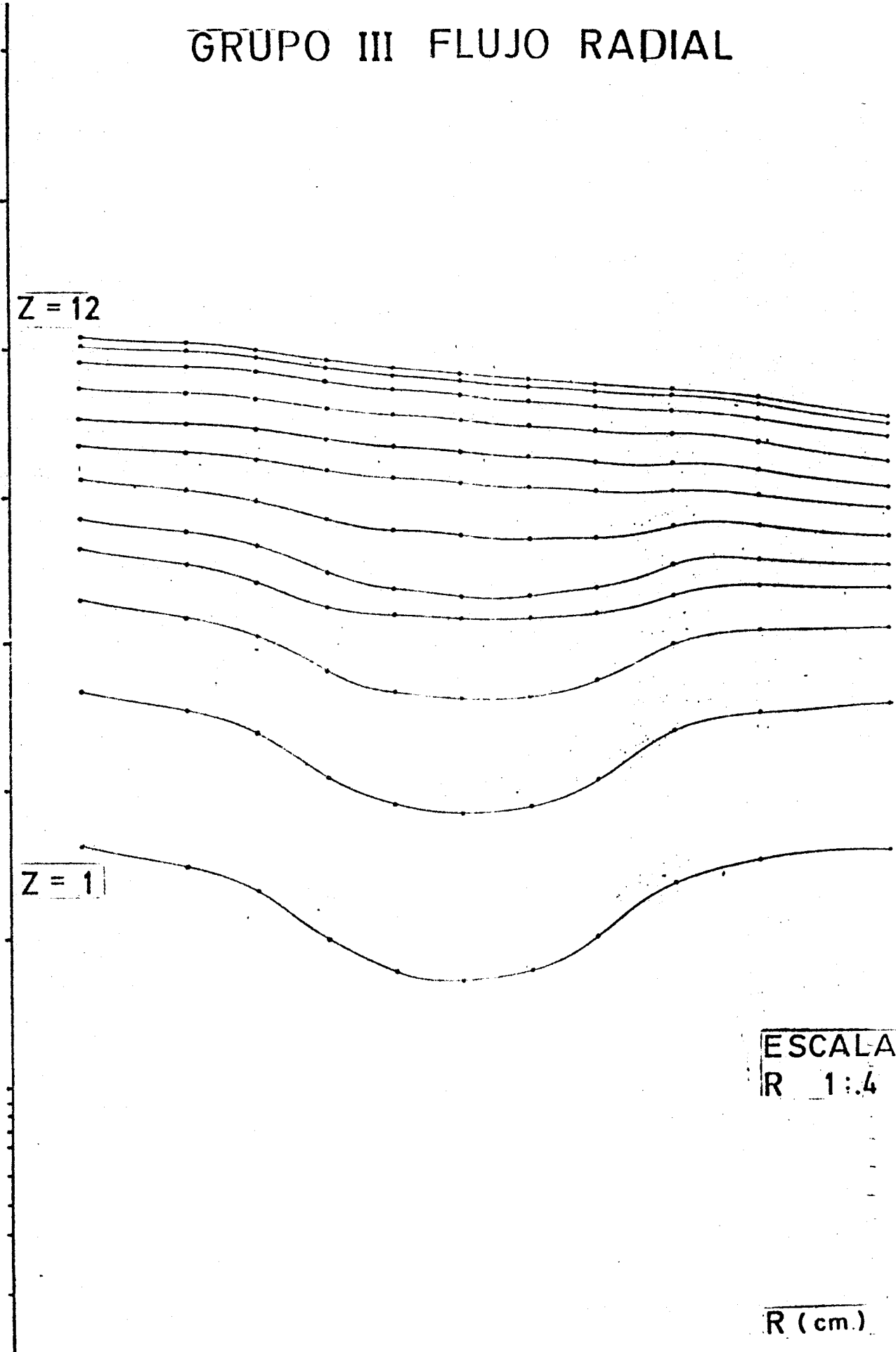
10<sup>4</sup>

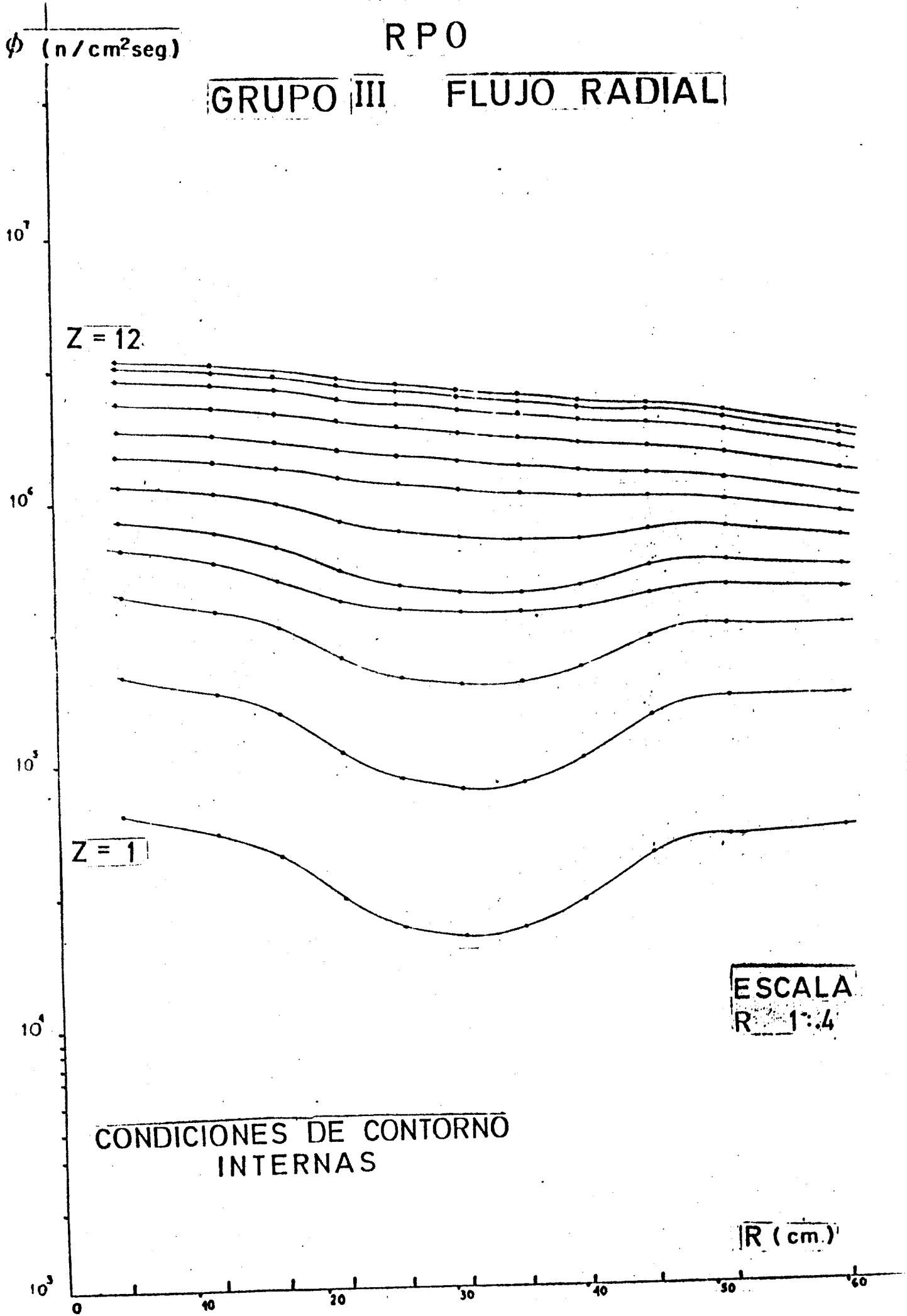
ESCALA  
R 1:4

R (cm.)

10<sup>3</sup>

0 10 20 30 40 50 60

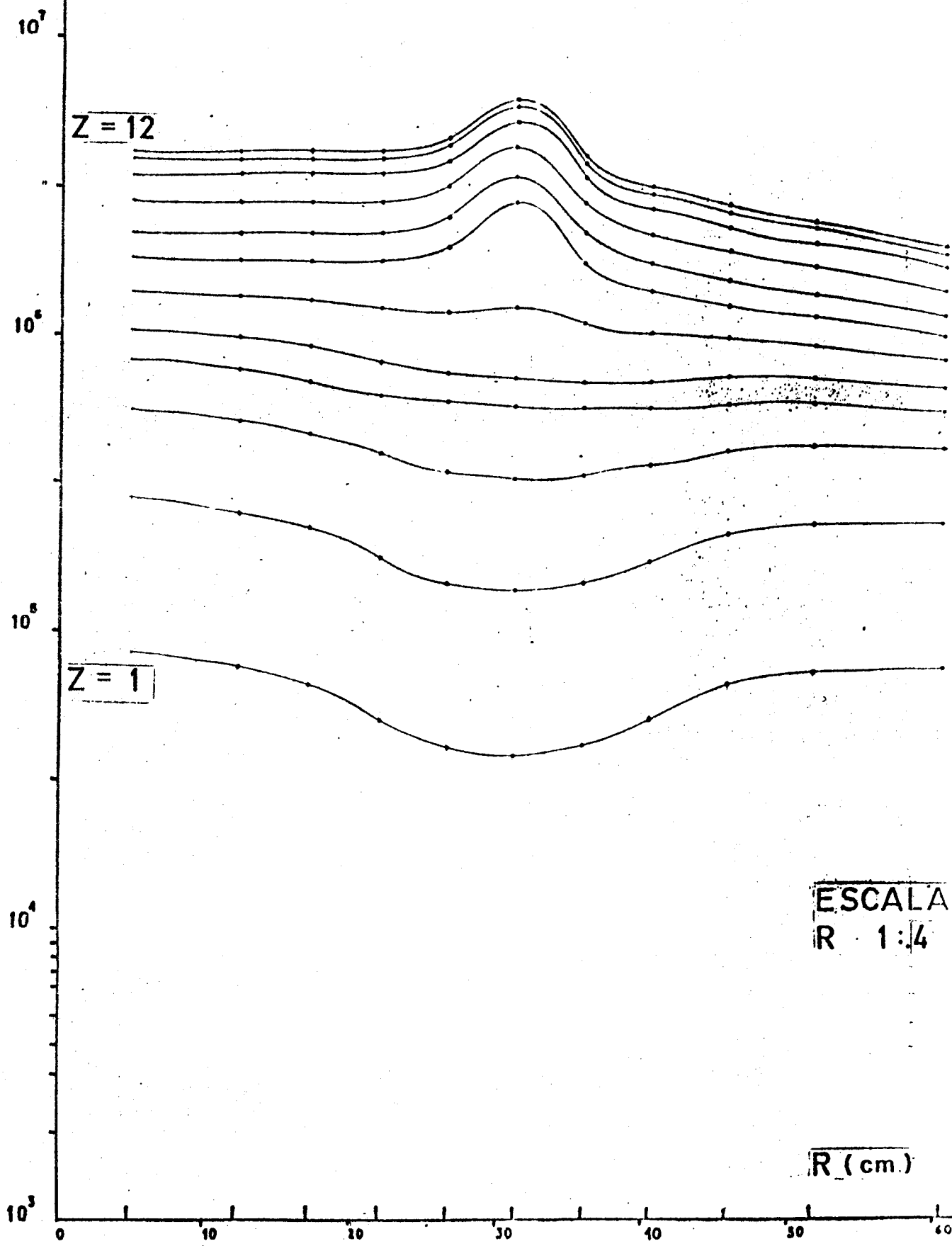




$\phi$  (n/cm<sup>2</sup>seg.)

RPO

GRUPO IV FLUJO RADIAL



(n/cm<sup>2</sup>seg)

RPO

GRUPO IV FLUJO RADIAL

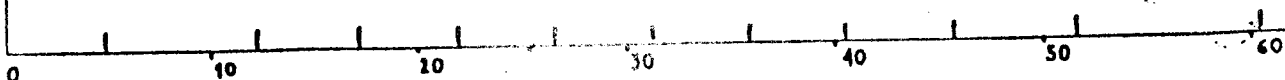
Z = 12

Z = 1

ESCALA  
R 1:4

CONDICIONES DE CONTORNO  
INTERNAS

R (cm)



(n/cm<sup>2</sup>seg)

RPO

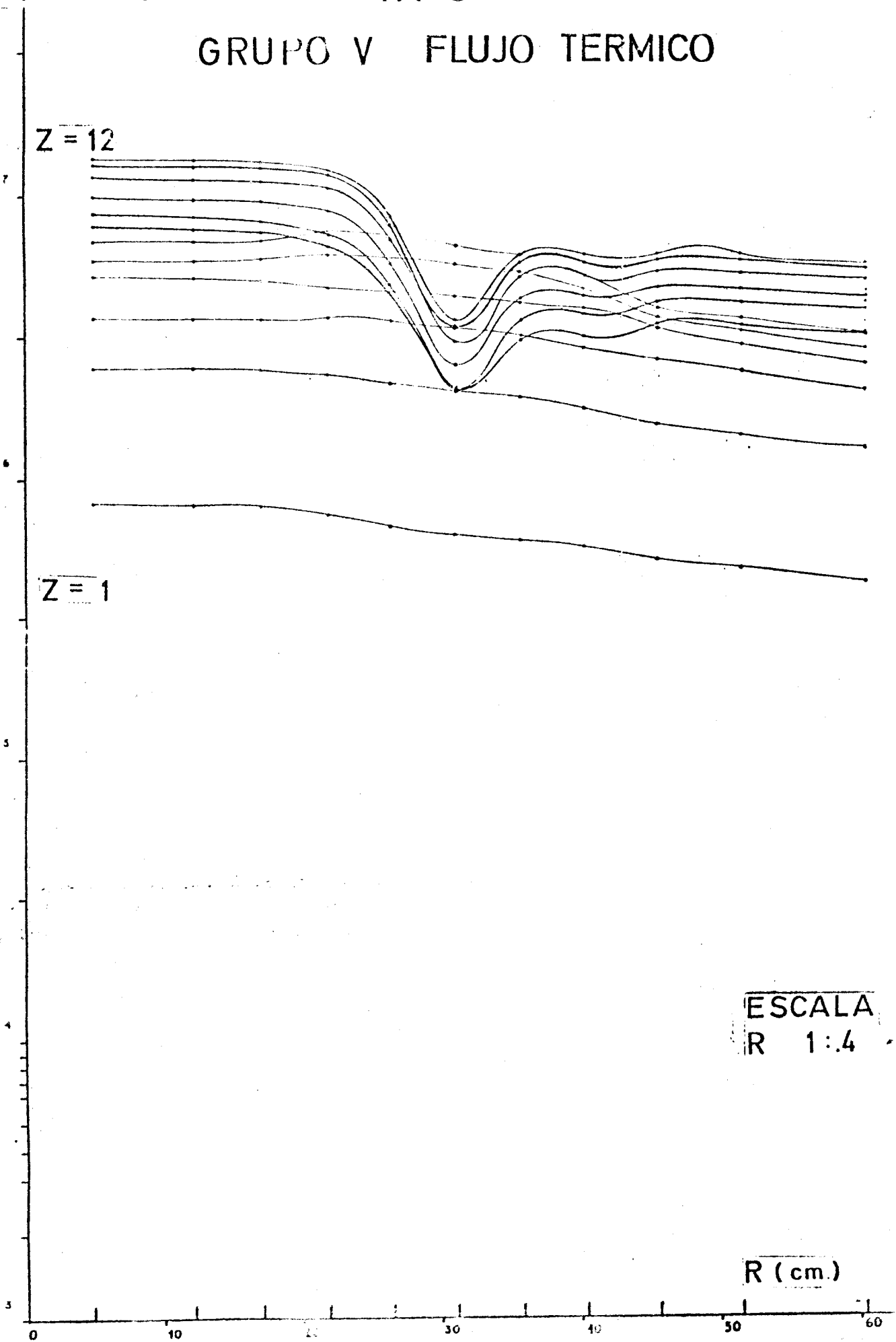
GRUPO V FLUJO TERMICO

Z = 12

Z = 1

ESCALA  
R 1:4

R (cm.)





$\Phi(n/cm^2 \cdot \text{seg})$

RPO

GRUPO V FLUJO TERMICO

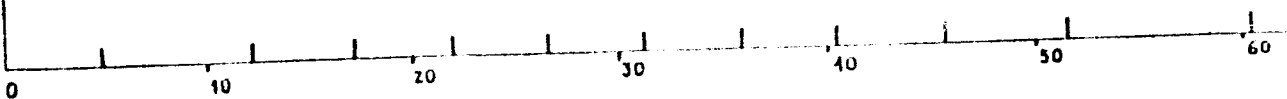
Z = 12

Z = 1

CONDICIONES DE CONTORNO  
INTERNAS

ESCALA  
R 1:4

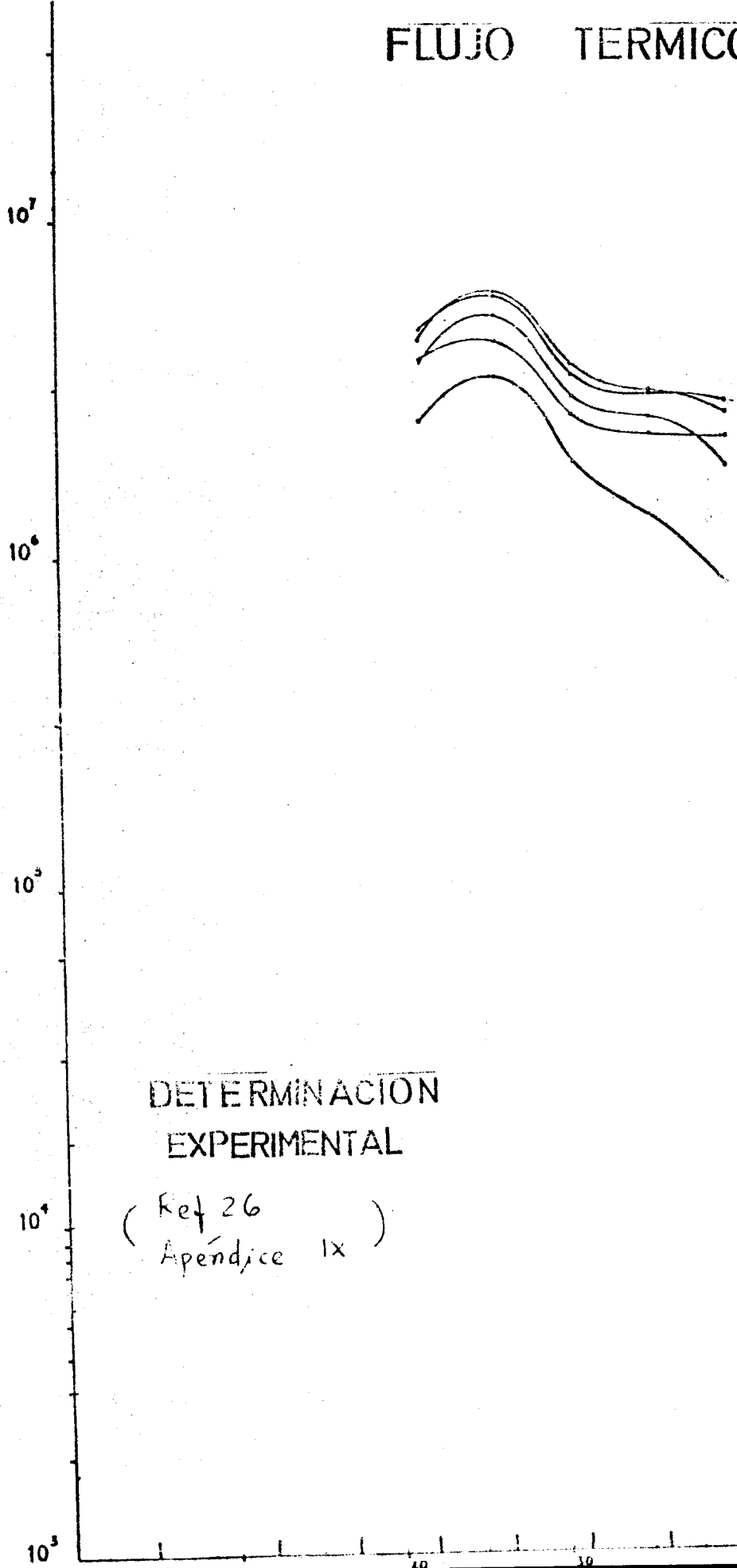
R (cm.)



$\phi$  (n/cm<sup>2</sup>seg)

RPO

FLUJO TERMICO



DETERMINACION  
EXPERIMENTAL

( Ref 26  
Apéndice 1x )

ESCALA  
R 1:4

R (cm.)

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES

#### 5.1. Introducción

Los cálculos de difusión multigrupo son analizados a la luz de la forma de los gráficos, valores de los flujos, factor de multiplicación, flujos medios, y factor de forma.

#### 5.2. Cálculo del reactor tipo piscina en el plano horizontal (X-Y)

En la tabla 4.4., observamos que es posible adoptar la malla 14 x 15 en vez de la 18 x 20 con error menor de .1 por ciento, lo que produciría una red de cálculo de unas  $14 \times 15 \times 32 = 6,720$  celdillas para la representación tridimensional del reactor. Esta representación permite un ahorro importante de memoria y tiempo de procesamiento ( Ver tabla 4.3.)

#### 5.3 Cálculo comparativo con EXTERMINATOR-II

En las Tablas 4.4 y 4.5 los gráficos y listados de distribución de flujo correspondientes permiten establecer la comparación con error menor del .01 % . Esta diferencia se debe probablemente a los

diferentes métodos numéricos utilizados y a que en el PUMA se calcula el valor del flujo en el centro de la red y en el EXTERMINATOR-II en una de las esquinas. Además a que el reticulado usado con EXTERMINATOR-II es ligeramente grueso.

#### 5.4. Cálculo del RP-0 en el plano vertical

Revisando las Tablas 4.10 y 4.11  
y las Figuras 4.17 a 4.25

de los casos correspondientes al cálculo completo y el caso con condiciones de contorno internas podemos afirmar que los casos son comparables con un error respecto al caso completo del orden de .001%

#### 5.5. Comparación de las distribuciones de flujo del RP0 calculados con distribución de flujo medida

( Apénd. IX , Ref (26) )

En las Tablas 4.10 y 4.13 y Fig. 4.25 se pueden observar las características de la distribución de flujo calculada.

Al hacer las comparaciones de las distribuciones de flujo radiales con las medidas en el rango térmico se nota lo siguiente : (Ver Fig. 4.26)

- 1o. Que la forma de los flujos coinciden en la zona intermedia del combustible.
- 2o. Que existen una distorsión en la zona próxima al borde del combus-

tible- reflector externo, esto es debido a la presencia de las placas de control ( de Cd) , el cual no es considerado en el cálculo.

30. Que existe otra distorsión en la zona del borde del combustible- reflector interno, esto es debido a que en esta zona (zona interior) sólo hay 18 elementos combustibles de los 32 que pueden haber, estos lugares vacíos son ocupados por agua, que es un material absorbente de neutrones térmicos, en comparación con el grafito. Esta zona no es considerada en el cálculo.

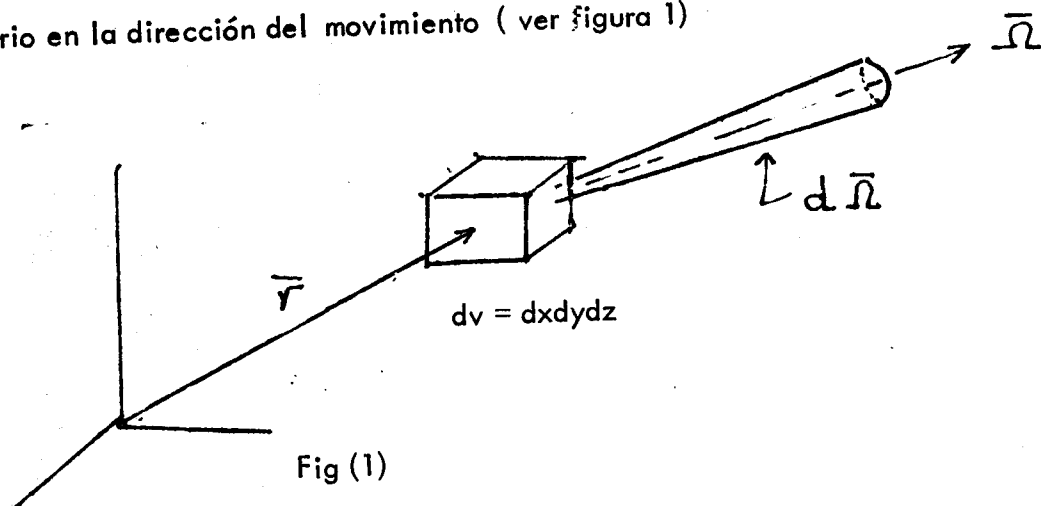
Se puede afirmar que en la zona donde se han hecho las mediciones se han obtenido resultados comparables con los predecibles con la Teoría de Difusión Multigrupo.

APENDICE IDEFINICIONES Y NOTACIONDensidad Neutrónica y Flujo

La posición de un neutrón en un sistema de referencia se describe por el vector  $\vec{r}$  y su velocidad por el vector  $\vec{v}$ . El vector  $\vec{v}$  se representa usualmente por

$$\vec{v} = v \bar{\Omega}$$

donde  $v = |\vec{v}|$  es la velocidad del neutrón y  $\bar{\Omega}$  es un vector unitario en la dirección del movimiento (ver figura 1)



La población de neutrones puede describirse con la cantidad denominada densidad angular de neutrones y se representa por  $N(\vec{r}, \bar{\Omega}, E, t)$

$N(\vec{r}, \bar{\Omega}, E, t) dv d\bar{\Omega} dE$  es el número de neutrones en el elemento de volumen  $dv$  alrededor de  $\vec{r}$ , con direcciones dentro de

$d\bar{\Omega}$  alrededor de  $\bar{\Omega}$ , y energías  $dE$  alrededor de  $E$ , en el instante  $t$ .

La integral de la densidad angular sobre todas las direcciones es la densidad neutrónica.

$$n(\bar{r}, E, t) = \int_{4\pi} N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E, t) d\bar{\Omega}$$

El producto de  $\bar{v}$  por la densidad angular se denomina flujo vector (o corriente angular),

$$\text{flujo vector} = \bar{v} N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E, t)$$

Su magnitud es el flujo angular,  $\bar{\Phi}(\bar{r}, \bar{\Omega}, E, t)$

$$\bar{\Phi}(\bar{r}, \bar{\Omega}, E, t) = v N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E, t)$$

La integral del flujo angular sobre todas las direcciones es el flujo total o flujo escalar  $\phi(\bar{r}, E, t)$

$$\phi(\bar{r}, E, t) = v n(\bar{r}, E, t) = \int_{4\pi} \bar{\Phi}(\bar{r}, \bar{\Omega}, E, t) d\bar{\Omega}$$

Se puede tener una idea del significado físico del flujo escalar de la siguiente manera. Interpretando el flujo angular como el número de neutrones que atraviesa un disco de  $1 \text{ cm}^2$  de superficie en la dirección perpendicular a la misma, la integración sobre  $4\pi$  genera una esfera de sección  $1 \text{ cm}^2$  y área  $4 \text{ cm}^2$ . Puede entonces definirse el flujo escalar  $\phi(\bar{r}, E, t)$  como el número de neutrones de energía  $E$  que penetran por unidad de tiempo

desde todas direcciones en una esfera de sección unitaria, con centro en  
(ver Figura 1.1)

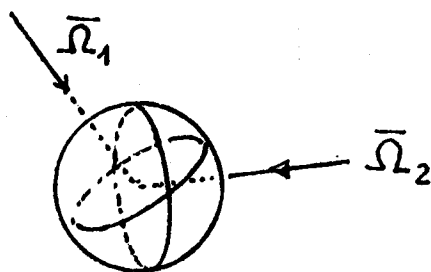


Figura 1.1 Interpretación de  $\phi(\bar{r}, E, t)$

Sección eficaz microscópica ( $\sigma$  micros) de un nucleído es una medida de la probabilidad de que un neutrón interaccione con dicho nucleído. Esta magnitud tiene unidades de área y puede visualizarse como la sección transversal de una esfera centrada en el núcleo blanco y que debe ser atravesada por el neutrón para que se produzca la interacción.

Sección eficaz macroscópica ( $\Sigma$ ) está relacionada con la probabilidad de interacción con un conjunto de nucleídos que constituyen el medio que atraviesa el neutrón. Podemos definirla como la probabilidad de que un neutrón interaccione con los nucleídos del medio por unidad de distancia recorrida, y tiene dimensiones de inversa de longitud. Sección eficaz de interacción de un neutrón en la posición  $\bar{r}$  y energía  $E$  (en el sistema laboratorio) se expresa como  $\Sigma(\bar{r}, E)$



### Camino libre medio ( $\lambda$ )

La distancia promedio que recorre un neutrón en un medio homogéneo antes de sufrir una interacción; o sea es la inversa de la sección eficaz macroscópica ( $\Sigma$ )

Cada tipo de reacción posible tiene su sección eficaz:  $\sigma_a$  (absorción),  $\sigma_s$  (dispersión),  $\sigma_f$  (fisión).

### La sección eficaz diferencial para la reacción i

$$\sigma_i(\bar{r}; \bar{\Omega}', E' \rightarrow \bar{\Omega}, E) = \sigma_i(\bar{r}, E') f_i(\bar{r}; \bar{\Omega}', E' \rightarrow \bar{\Omega}, E)$$

es la sección eficaz correspondiente a un neutrón de energía inicial  $E$ , con dirección inicial  $\bar{\Omega}'$ , que emerge de la interacción de tipo  $i$  con energía  $E'$  alrededor de  $E$  y dirección  $d\bar{\Omega}$  alrededor de  $\bar{\Omega}$

$f_i(\bar{r}; \bar{\Omega}', E' \rightarrow \bar{\Omega}, E)$  es la probabilidad de que si un neutrón con dirección  $\bar{\Omega}'$  y energía  $E'$  tiene una colisión de tipo  $i$ , emerge un neutrón con dirección en  $d\bar{\Omega}$  alrededor de  $\bar{\Omega}$  y energía  $dE$  alrededor de  $E$ .

En el caso de fisión, es una buena aproximación suponer que los neutrones son emitidos en forma isotrópica (en el sistema de laboratorio) por lo que puede escribirse:

$$f_f(\bar{r}; \bar{\Omega}', E' \rightarrow \bar{\Omega}, E) = \frac{1}{4\pi} \nu(\bar{r}, E' \rightarrow E)$$

En general se hace

$$\nu(\bar{r}, E' \rightarrow E) = \nu(\bar{r}) \chi(E)$$

donde  $\nu$  es el número medio de neutrones por fisión y  $\chi(E)$  lo que se conoce como espectro de fisión (normalizado a 1).

### Tasa de reacción

Si  $v$  es la velocidad del neutrón,  $\sigma_i$  es la correspondiente probabilidad de un neutrón sufra una reacción, indicada por  $i$ , por unidad de tiempo. Si  $N$  es la densidad angular de neutrones, el número de interacciones por unidad de tiempo está dado por  $v \sigma_i N$ . Integrando sobre todas las direcciones se obtiene el número de interacciones por unidad de volumen, por unidad de energía y por unidad de tiempo, como  $v \sigma_i n$ , cantidad que se denomina tasa de reacción. Siendo

$$\phi = v n, \text{ resulta que}$$

$$\text{tasa de reacción tipo } i = \sigma_i \phi$$

### Definición de corriente

Si  $\hat{n}$  es el vector unitario normal a una superficie  $dA$  (Ver figura 1.2)  $\hat{n} dA \cdot \bar{v} N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$  es

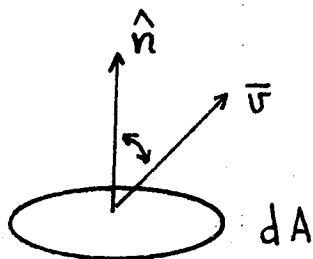


Figura 1.2

el número de neutrones con velocidad  $\bar{v}$  que atraviesa  $dA$  por unidad de ángulo sólido, de energía y de tiempo.

Integrando sobre todas las direcciones, se obtiene el número neto de neutrones que atraviesan por unidad de energía y de tiempo el área  $dA$ , es decir :

$$\begin{aligned} \text{Número neto de neutrones que atraviesan } dA &= \hat{n} \, dA \cdot \int_{4\pi} \bar{v} N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) \, d\bar{\Omega} \\ &= \hat{n} \, dA \cdot \int_{4\pi} \bar{\Omega} \phi(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) \, d\bar{\Omega} = \hat{n} \, dA \cdot \bar{J} \end{aligned} \quad (4.9)$$

$\bar{J}$  es la llamada corriente de neutrones, en función del flujo angular

$$\bar{J}(\bar{r}, E) = \int_{4\pi} \bar{\Omega} \phi(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) \, d\bar{\Omega}$$

La corriente es entonces un vector que tiene por componente en cualquier dirección el número neto de neutrones que atraviesa la unidad de área perpendicular a dicha dirección, por unidad de energía y de tiempo, para valores dados de la energía, de la posición y del tiempo.

## APENDICE II

### LEY DE FICK Y VALIDEZ DE LA LEY DE FICK

#### Ley de Fick

Esta ley relaciona  $\bar{J}(\bar{r}, E)$  a  $\nabla\phi(\bar{r}, E)$  mediante la ecuación

$$\bar{J}(\bar{r}, E) = -D(\bar{r}, E) \nabla\phi(\bar{r}, E) \quad (\text{II.1})$$

donde  $D(\bar{r}, E)$  es la constante de difusión.

La relación (II.1) establece que la corriente neta, de neutrones con energías en  $dE$ , a través de una superficie es proporcional a la tasa de decrecimiento de la densidad de neutrones de  $dE$  a través de la superficie. Además la dirección de la corriente neta es la dirección en la cual  $\eta(\bar{r}, E)$  está decreciendo a su máxima velocidad.

#### Validez de la ley de Fick

La Ley de Fick puede ser derivada de muchas maneras, cada una de las cuales da un valor ligeramente diferente para  $D(\bar{r}, E)$  en términos de las secciones eficaces del medio. La forma más exacta, y convincente de estas derivaciones está basada en encontrar una expresión aproximada para  $N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$  y luego, en efecto, relacionando la corriente neta al gradiente del flujo computándolos cada uno directamente de la aproximación para  $N$ , usando las defi-

$$\text{niciones } J \equiv \int \bar{\Omega} \sigma N d\bar{\Omega} \quad , \quad \phi \equiv \int \sigma N d\bar{\Omega}$$

Este método es uno de los más frecuentemente usados.

La expresión aproximada para  $N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$  tiene la forma

$$N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) = F(\bar{r}, E) + \bar{\Omega} \cdot \bar{V}(\bar{r}, E) \quad (\text{II.2})$$

donde  $F(\bar{r}, E)$  y  $\bar{V}(\bar{r}, E)$  son funciones escalar y vectorial de la posición y de la energía (pero no de la dirección  $\bar{\Omega}$ )

Para comprender la naturaleza de esta aproximación, suponer que las tres componentes de  $\bar{V}$  son cero:

(II.2) se reduce a  $N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) = F(\bar{r}, E)$ . Por lo tanto el número de neutrones en  $dVdEd\bar{\Omega}$  es el mismo para todas las direcciones  $\bar{\Omega}$ . La densidad neutrónica en el espacio de fases en  $\bar{r}$  y  $E$  es por lo tanto isotrópica en la dirección del movimiento de neutrones, y la representación polar de  $N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$  para la magnitud de  $N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$  en varias direcciones da una esfera. (Ver Fig. II.1(a))

Si, en vez,  $F$  y  $V_x$  son positivos (con  $V_x < F$ ) mientras que  $V_y = V_z = 0$ , una representación polar de  $N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$  da una figura como la mostrada en Fig. II.1(b), donde la longitud de los vectores



Fig. II.1 Gráficos polares de la densidad neutrónica en el espacio de fase.

representan las magnitudes de  $N(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  en las direcciones de las flechas. En este caso, existe un apilamiento neto de neutrones en la dirección  $+X$ . Si-  
 milarmente, valores finitos de  $V_y$  y  $V_z$  implican un amontonamiento neto en  
 las direcciones  $Y$  y  $Z$ . La distribución de neutrones descrita por (11.2) con  
 $V \neq 0$  es denominada linealmente anisotrópica.

El valor absoluto de  $V$  debe ser menor o igual a  $F$ ; de otro modo  
 $N(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  tomará valores no físicamente interpretables (negativos) para  
 ciertas direcciones.

Por lo tanto la Ley de Fick se espera que sea una aproximación gruesa  
 cuando la distribución angular de los neutrones es grande en una dirección prefe-  
 rente. Esto puede suceder cerca de una interfase entre dos medios si la sección  
 eficaz de dispersión y/o la sección eficaz de absorción cambian bruscamente.

Como un ejemplo consideremos  $N(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  para valores de cer-  
 ca de la interfase en la Figura 11.2

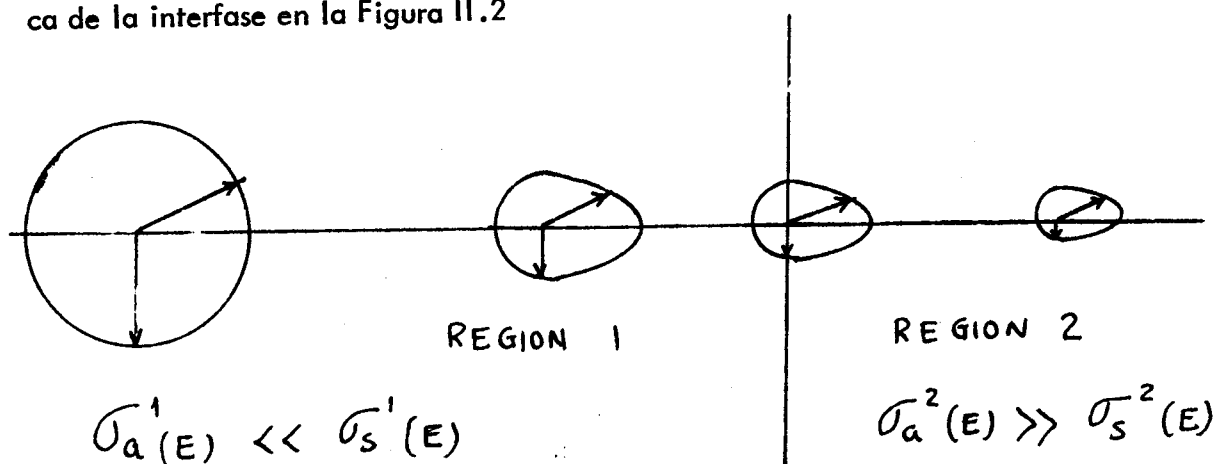


Figura 11.2 .Gráfico polar de  $N(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  cerca de una interfase entre un  
 medio.

Si

$$\sigma_a^2(E) \gg \sigma_s^2(E), \quad \sigma_a^1(E) \ll \sigma_s^1(E), \quad \text{y} \quad \sigma_a^2(E) \gg \sigma_a^1(E)$$

los neutrones en la Región 2 serán fuertemente absorbidos. Luego pocos neutrones de la región 2 ingresarán a la región 1, mientras que muchos pasarán de la región 1 a la 2. Por lo tanto cerca de la interfase,  $N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$  será grande para direcciones de  $\bar{\Omega}$  apuntando de 1 a 2 y será pequeño para direcciones apuntando de 2 a 1.

La ecuación (11.2) no puede describir bien tal distribución, y la Ley de Fick será una gruesa aproximación. Además será una gruesa aproximación en los puntos interiores de la regiones 2; dado que, con

$\sigma_a^2(E) \gg \sigma_s^2(E)$ ,  $N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$  continuará decreciendo rápidamente según que se aleje de la interfase. Por lo tanto la corriente de neutrones moviéndose a la derecha continuará siendo mucho mayor que la corriente moviéndose a la izquierda (aunque, debido a la fuerte absorción, ambas corrientes llegan a ser muy pequeñas).

A la izquierda de la interfase, sin embargo, la dependencia de  $N(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$  sobre  $\bar{\Omega}$  llega a ser mucho más suave. Con

$\sigma_s^1(E) \gg \sigma_a^1(E)$  la distribución de neutrones como haz no puede existir. Debido a la dispersión, los neutrones se comportarán como

en una difusión gaseosa a través de un tapón poroso. Existirá un apilamiento neto de neutrones, pero su distribución en dirección puede ser representado por (11.2). Por lo tanto, a unos pocos caminos libres medios de dispersión lejos del borde, la Ley de Fick es una buena aproximación.

Un argumento similar muestran que la Ley de Fick falla cerca del borde si la región 2 está fuera del reactor, donde  $\sigma_a^2$  y  $\sigma_s^2$  son muy pequeños y son usualmente considerados iguales a cero.

Se puede concluir que (11.2) será válida a unos pocos caminos libres medios dentro de regiones en las cuales  $\sigma_s(\bar{r}, E)$  y  $\sigma_a(\bar{r}, E)$  no varían rápidamente como una función de la posición y en la cual

$\sigma_s(\bar{r}, E) \gg \sigma_a(\bar{r}, E)$ . Se espera que falle cerca de la superficie exterior de un reactor y cerca (o dentro) de absorbedores fuertes.



## APENDICE III

### DETERMINACION DE LAS SECCIONES EFICACES MULTIGRUPO

Pueden distinguirse dos etapas básicas para la obtención de secciones eficaces de grupo. En primer lugar, es necesario conocer las secciones eficaces microscópicas en función de la energía para todos los isótopos que intervienen en un lado problema y para las reacciones neutrónicas de interés. Estos datos se obtienen de mediciones o cálculos teóricos. Existen en la actualidad bibliotecas con estos datos básicos, llamadas usualmente bibliotecas puntuales, evaluados de manera de obtener a partir de mediciones y cálculos teóricos provenientes de diversos laboratorios los valores que se consideran más precisos. Podemos mencionar como ejemplos la biblioteca ENDF/B (Evaluated Neutron Data Files) originada en Estados Unidos, y la biblioteca UKNDL (UKAEA Nuclear Data Library) de origen inglés. Los datos están grabados en cintas magnéticas que son procesados por programas de computadora.

La segunda etapa consiste en la obtención de las secciones eficaces de grupo, para lo cual es necesario conocer, la dependencia en energía y espacio de los componentes de Legendre del flujo angular. Por lo general se utiliza una estimación del espectro de energías para pesar las secciones eficaces puntuales y obtener bibliotecas, llamadas intermedias de constantes a grupos finos - (aproximadamente de 100 a 200 grupos). En el rango rápido ( $E > 1 \text{ Mev}$ ) se utiliza el espectro de fisión, en el rango epitérmico ( $1 \text{ eV} < E < 1 \text{ Mev}$ ) un espectro de la forma  $1/E$  (realizándose tratamientos especiales en zonas con

resonancias) y en el rango térmico se pesa con el espectro de Maxwell. No se considera en este nivel la dependencia espacial del flujo.

Si se desean obtener secciones eficaces a pocos grupos ( típicamente 2 a 10 grupos), se realizan cálculos del espectro en un medio infinito homogéneo (si el problema a estudiar es heterogéneo se homogeniza pesando las distintas secciones eficaces microscópicas con las densidades atómicas de los respectivos materiales) o suponiendo una distribución espacial aproximada del flujo. De esta manera se obtiene un espectro de peso más cercano al real y con el mismo se pesan constantes a grupos finos para obtener las correspondientes a pocos grupos ( o grupos gruesos). Un procedimiento más refinado para la obtención de constantes a pocos grupos consiste en dividir el reticulado de elementos combustibles que constituye el núcleo del reactor en "celdas" formadas por un elemento combustible y una porción de moderador. Se realiza un cálculo detallado de la distribución espacial del flujo en la celda para todos los grupos finos, con tratamientos especiales en la zona resonante. Con el flujo calculado se promedian las secciones eficaces en espacio y energía, obteniendo secciones eficaces a pocos grupos para la celda, que luego se utilizan en cálculo de difusión o transporte, suponiendo zonas homogéneas. Los programas que realizan los cálculos de flujo en una celda, usualmente con métodos de probabilidades de colisión o de ordenadas discretas ( $S_n$ ), son conocidos como programas de celda.

En resumen, podemos decir que normalmente, por razones de practicidad en el manipuleo de los datos, la obtención de constantes a pocos grupos para -

cálculos de difusión o de transporte a partir de bibliotecas puntuales, se realiza pasando por una etapa intermedia que consiste en el cálculo de una biblioteca de grupos finos de aplicación relativamente general. La condensación a pocos grupos se realiza con un espectro más específico del sistema a resolver.

APENDICE IVMATRICES DE RESPUESTA

Relación entre el flujo y la corriente en los bordes de medios no multiplicati

vos

La ecuación de difusión multigrupo para el caso estacionario toma la

forma :

$$D_g \nabla^2 \phi_g - \sigma_{Tg} \phi_g + \sum_{g' \neq g}^G \sigma_{g'g} \phi_{g'} = 0$$

equivalente :

$$\nabla^2 \phi_g = \frac{\sigma_{Tg}}{D_g} \phi_g - \sum_{g' \neq g} \frac{\sigma_{g'g}}{D_g} \phi_{g'}$$

en forma matricial

$$\nabla^2 \phi = \left[ \text{diag} \left( \frac{\sigma_{T1}}{D_1}, \dots, \frac{\sigma_{TG}}{D_G} \right) - \left\{ \frac{\sigma_{g'g}}{D_g} \right\} \left\{ (1 - \delta_{gg'}) \right\} \right] \phi$$

$$\nabla^2 \phi = Q \phi$$

donde:  $\phi = \text{col} [\phi_1, \dots, \phi_G]$

$Q$ , matriz de  $G \times G$

Es posible mostrar que si diagonalizamos la matriz  $Q$ , obtenemos un

sistema :

$$\nabla^2 \psi = \text{diag} [\lambda_1, \dots, \lambda_G] \psi$$

donde  $\lambda_1, \dots, \lambda_G$  son los autovalores de  $Q$  y además  $\phi = T\Psi$ , donde  $T$  es una matriz cuyas columnas son los autovectores de  $Q$ .

para el caso del problema de dos grupos

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_{T_1}/D_1 & -\sigma_{21}/D_1 \\ -\sigma_{12}/D_2 & \sigma_{T_2}/D_2 \end{bmatrix}$$

la diagonalización se realiza exigiendo que :

$$\det(Q - \lambda I) = 0$$

esto es,

$$\left(\frac{\sigma_{T_1}}{D_1} - \lambda\right) \left(\frac{\sigma_{T_2}}{D_2} - \lambda\right) - \frac{\sigma_{21}}{D_1} \frac{\sigma_{12}}{D_2} = 0$$

se deduce que :

$$\lambda = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_{T_1}}{D_1} + \frac{\sigma_{T_2}}{D_2} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{\sigma_{T_1}}{D_1} - \frac{\sigma_{T_2}}{D_2} \right)^2 + 4 \frac{\sigma_{21}}{D_1} \frac{\sigma_{12}}{D_2}}$$

$$\lambda_1 = \omega_1^2 \quad , \text{para la primera raíz}$$

para la segunda raíz es posible suponer que también es positiva (para medios no multiplicativos):

$$\lambda_2 = \omega_2^2$$

Además :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\sigma_{21}/D_1}{\omega_1^2 - \sigma_{T1}/D_1} \\ -\frac{\sigma_{12}/D_2}{\omega_2^2 - \sigma_{T2}/D_2} & 1 \end{bmatrix}$$

luego :

$$\nabla^2 \psi = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2) \psi$$

Es posible generalizar este resultado, para medios no multiplicativos

(como agua, grafito, etc) :

$$\lambda_1 = \omega_1^2, \dots, \lambda_G = \omega_G^2$$

$$\nabla^2 \psi = \text{diag}(\omega_1^2, \dots, \omega_G^2) \psi \quad (\text{IV.1})$$

donde los autovalores y autovectores se pueden obtener por el método de Danilevsky.

El sistema IV.1 que resulta es posible de resolver analíticamente para geometrías rectangular o cilíndrica.

En el caso de geometría rectangular consideremos el caso unidimensional en el eje X .

Para cada componente :

$$\frac{d^2 \psi_k}{dx^2} = \omega_k^2 \psi_k \rightarrow \psi_k = A_k e^{-\omega_k x} + B_k e^{\omega_k x}$$

luego :

$$\Psi = \text{diag} [e^{-\omega_1 x}, \dots, e^{-\omega_G x}] A + \text{diag} [e^{\omega_1 x}, \dots, e^{\omega_G x}] B$$

Si definimos :

$$U = \text{diag} [e^{-\omega_1 x}, \dots, e^{-\omega_G x}]$$

$$V = \text{diag} [e^{\omega_1 x}, \dots, e^{\omega_G x}]$$

Resulta que :

$$\Psi = UA + VB$$

$$\phi = T\Psi = TUA + TVB$$

Aplicando la Ley de Fick para calcular el vector corriente :

$$J = -D \nabla \phi, \text{ donde } D = \text{diag} [D_1, \dots, D_G]$$

$$J = -DT(VU)A - DT(VV)B$$

Pero :

$$\nabla U = \frac{d}{dx} \text{diag} [e^{-\omega_1 x}, \dots, e^{-\omega_G x}]$$

$$= -\text{diag} (\omega_1, \dots, \omega_G) U = -WU$$

$$\nabla U = -WU$$

análogamente

$$\nabla V = WV$$

$$\text{donde : } W = \text{diag} (\omega_1, \dots, \omega_G)$$

Se sigue que :

$$J = DTW ( U A - V B )$$

$$O = T ( U A + V B )$$

Considerando dos regiones contiguas :

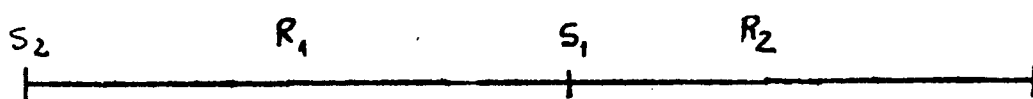


Figura IV.1

dados el flujo y la corriente en \$S\_1\$ es \$\phi\_1, J\_1\$ podemos determinar los flujos y corrientes \$S\_2\$. Suponemos además que está dada la matriz \$M\_1\$ en \$S\_1\$ que

relaciona :  $J_1 = M_1 \phi_1$  y el problema es determinar la matriz \$M\_2\$

que relaciona :  $J_2 = M_2 \phi_2$

Aplicando condiciones de contorno en \$S\_1\$ :

$$T ( U (1) A + V (1) B ) = \phi_1$$

$$DTW ( U(1) A - V(1) B ) = M_1 \phi_1$$

con este par de ecuaciones podemos obtener \$A, B\$ :

$$A = \left\{ \frac{1}{2} V(1) T^{(-1)} + \frac{1}{2} V(1) (DTW)^{-1} M_1 \right\} \phi_1 \quad (IV.2)$$

$$B = \left\{ \frac{1}{2} V(1) T^{-1} - \frac{1}{2} V(1) (DTW)^{-1} M_1 \right\} \phi_1$$



Que podemos expresar como

$$\begin{aligned} A &= P(1) \phi_1 \\ B &= R(1) \phi_1 \end{aligned} \quad (IV.3)$$

donde P y R son las matrices indicadas en llaves en IV.2, evaluadas en  $S_1$

Aplicando las condiciones contorno en  $S_2$

$$\begin{aligned} \phi(2) &= T(U(2)A + V(2)B) \\ J(2) &= DTW(U(2)A - V(2)B) \end{aligned} \quad (IV.4)$$

Reemplazando IV.3 en IV.4

$$\begin{aligned} \phi(2) &= T(U(2)P(1) + V(2)R(1)) \phi(1) \\ J(2) &= DTW(U(2)P(1) - V(2)R(1)) \phi(1) \end{aligned} \quad (IV.5)$$

De las IV.5 deducimos :

$$J(2) = DTW(U(2)P(1) - V(2)R(1)) (U(2)P(1) + V(2)R(1))^{-1} T^{-1} \phi(2)$$

Por lo tanto :

$$M(2) = DTW(U(2)P(1) - V(2)R(1)) (U(2)P(1) + V(2)R(1))^{-1} T^{-1}$$

y

$$J(2) = M(2) \phi(2)$$

Un proceso análogo se sigue para hallar la matriz de respuesta  $M(2)$  es el caso de geometría cilíndrica.

## APENDICE V

### PROBLEMAS QUE SE PLANTEAN EN LA SIMULACION DEL FUNCIONAMIENTO DE REACTORES NUCLEARES

Tres tipos de problemas :

a) Transitorios cortos o evolución cinética del reactor.

Los tiempos se miden en segundos o fracción de segundos.

Este es el caso de cálculo de accidentes o del análisis del control del reactor.

En esta simulación se resuelven en cada instante las ecuaciones cinéticas espaciales acopladas con los parámetros adicionales por medio de los modelos físico-matemáticos acoplados y no se toman en cuenta las variaciones temporales de quemado y Xenón. Se parte siempre de un estado inicial en el que se pone estacionario a todo el sistema, buscando o no criticidad. Resulta de este cálculo un  $K_{e0}$  ( que será igual a 1 si se buscó criticidad ) que dividirá siempre a las fuentes en la evolución no estacionaria, en la que se varían los parámetros independientes en función del tiempo según una función dada o mediante perturbaciones y los parámetros acoplados por medio de los modelos correspondientes.

b) Transitorios largos o evolución a mediano plazo :

Los tiempos se miden en horas y en general no se tiene en cuenta la variación de quemado.

En esta simulación se calculan sucesivos estados estacionarios (buscando criticidad o no) tomando sólo en cuenta la variación no estacionaria de las concentraciones de isótopos que tienen fuerte influencia sobre las secciones eficaces y de períodos de horas tales como el  $X_e - 135$

Este tipo de cálculo se realizan para simular los ciclos de potencia de los reactores de potencia. Se parte de un estado inicial en el que se pone todo el sistema en estado estacionario incluyendo el Xenón.

c) Evolución del reactor a largo plazo :

Los tiempos se miden en días y se calcula para cada tiempo  $T_p$  las nuevas distribuciones de quemado. Los estados del reactor son todos estacionarios, pudiendo buscarse o no criticidad. Si se incluyen las operaciones de recambio de combustible se trata de cálculos para la gestión de combustible.

Puesta del reactor en estado estacionario : Lógica de cálculo

Podemos ver que en los tres casos (a, b y c) se parte de un estado estacionario en los que puede buscarse o no criticidad (diagrama VI.1) Puede suponerse conocida o no la distribución de potencia al comienzo del cálculo. En caso afirmativo los parámetros adicionales acoplados pueden ser calculados inmediatamente (distribución de Xenón, lodo, Temperatura de combustible, densidad del refrigerante, etc) fijando previamente los valores de los parámetros independientes (temperatura de entrada del refrigerante, caudales,

etc). En caso negativo se fija una distribución espacial constante para los parámetros acoplados. Con la distribución de estos se calculan las secciones eficaces, y luego los flujos y potencias específicas. A partir de éstos se hallan las nuevas distribuciones de los parámetros acoplados y se sigue el proceso normalmente.

### Lógica de cálculo de los tránsitos Cortos :

Los transitorios cortos están descritos en el diagrama VI.2. Se parte siempre de un estado estacionario y luego se aumenta el tiempo sucesivamente

$$\text{en pasos } \Delta t_p = t_{p+1} - t_p$$

Para cada valor  $T_p$  se hallan los parámetros independientes mediante valores dados en función del tiempo que pueden luego ser perturbados o no. Suponiendo además que los flujos y las potencias específicas para  $T_p$  no varían y conociendo los valores de los parámetros adicionales acoplados para ese instante pueden calcularse sus valores para el instante  $T_{p+1}$  resolviendo las ecuaciones físico matemáticas en estado no estacionario. Además, los parámetros utilizados para poner a crítico el reactor en su puesta en estado estacionario inicial se fijan en esa oportunidad, lo mismo que el  $K_{e_0}$  que dividirá siempre a las fuentes, y no se los vuelva a alterar.

Con estos elementos se calculan las secciones eficaces los que se suponen constante en el intervalo  $t_p, t_{p+1}$  y conociendo el flujo para  $T_p$  se calcula, mediante la resolución de las ecuaciones cinéticas espaciales por cual

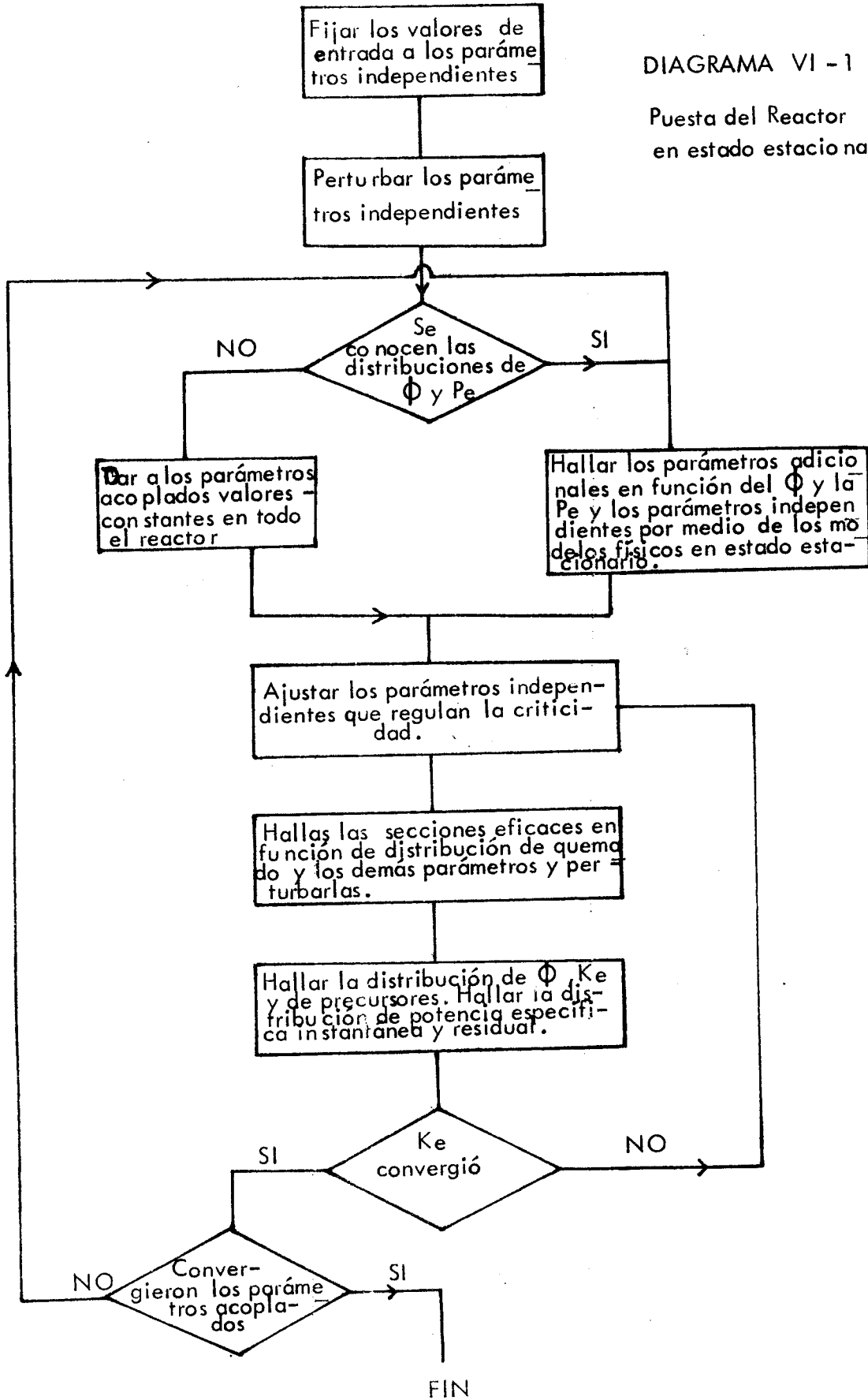
quier método al flujo en  $t = t_{p+1}$ . El proceso es continuado hasta que se la interrumpe por medio de algún criterio.

### Lógica de cálculo para la simulación de la gestión de combustible y ciclos de potencia

Puede verse en los diagramas VI. 4 y VI.3 respectivamente. En el primer caso se incluyen los criterios de recambio de combustible y se recalcula en cada paso la distribución de quemado. El  $K_e$  no suele ser fijo (no se busca criticidad), pues se utiliza para fijar los criterios para mover combustible. En el segundo caso la puesta del reactor en estado estacionario durante su evolución se realiza sin tomar en cuenta a los parámetros de períodos largos (Xenón, Iodo Samario, etc) para los que se toma en cuenta su variación estacionaria en función del tiempo.

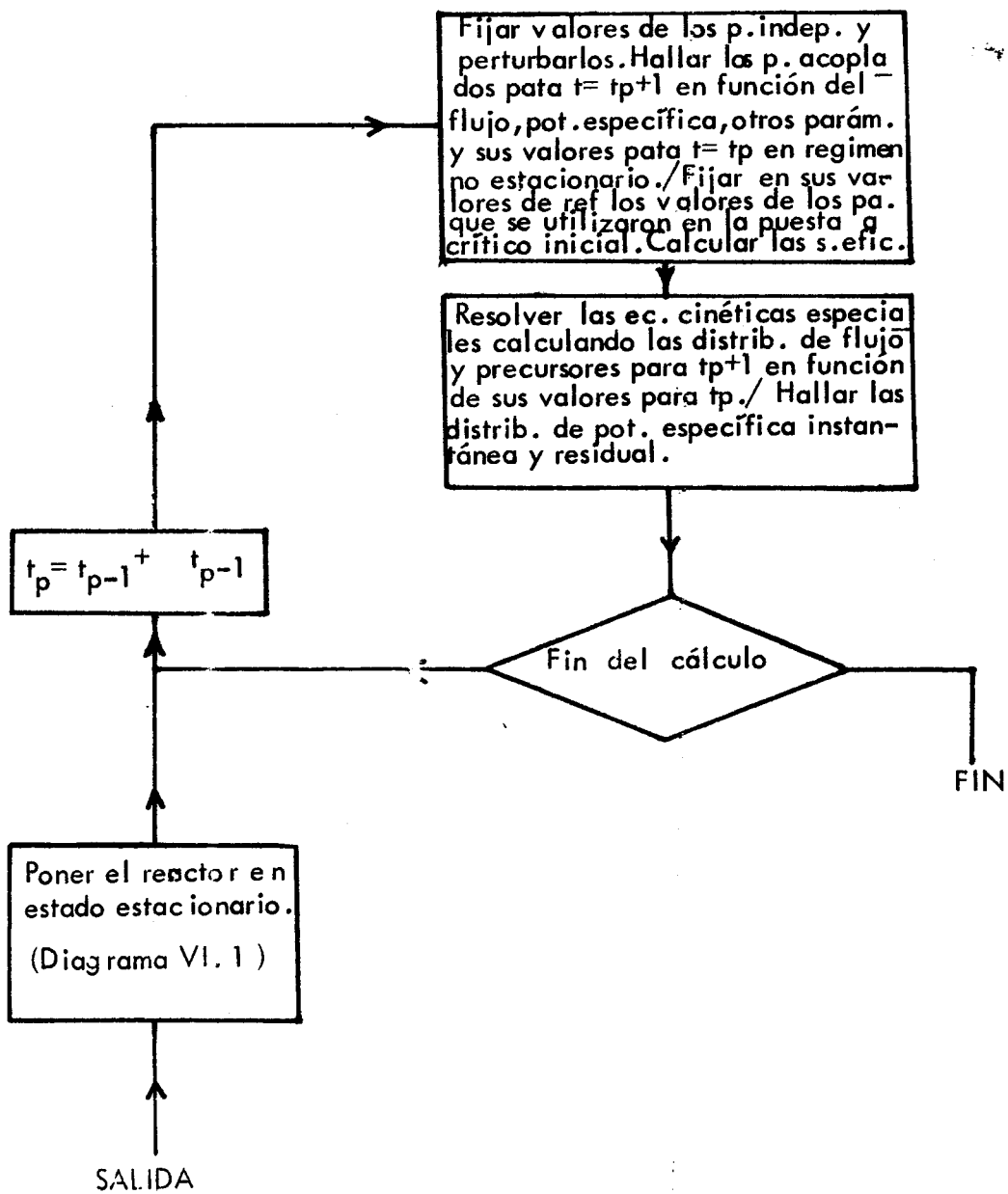
DIAGRAMA VI - 1

Puesta del Reactor en estado estacionario

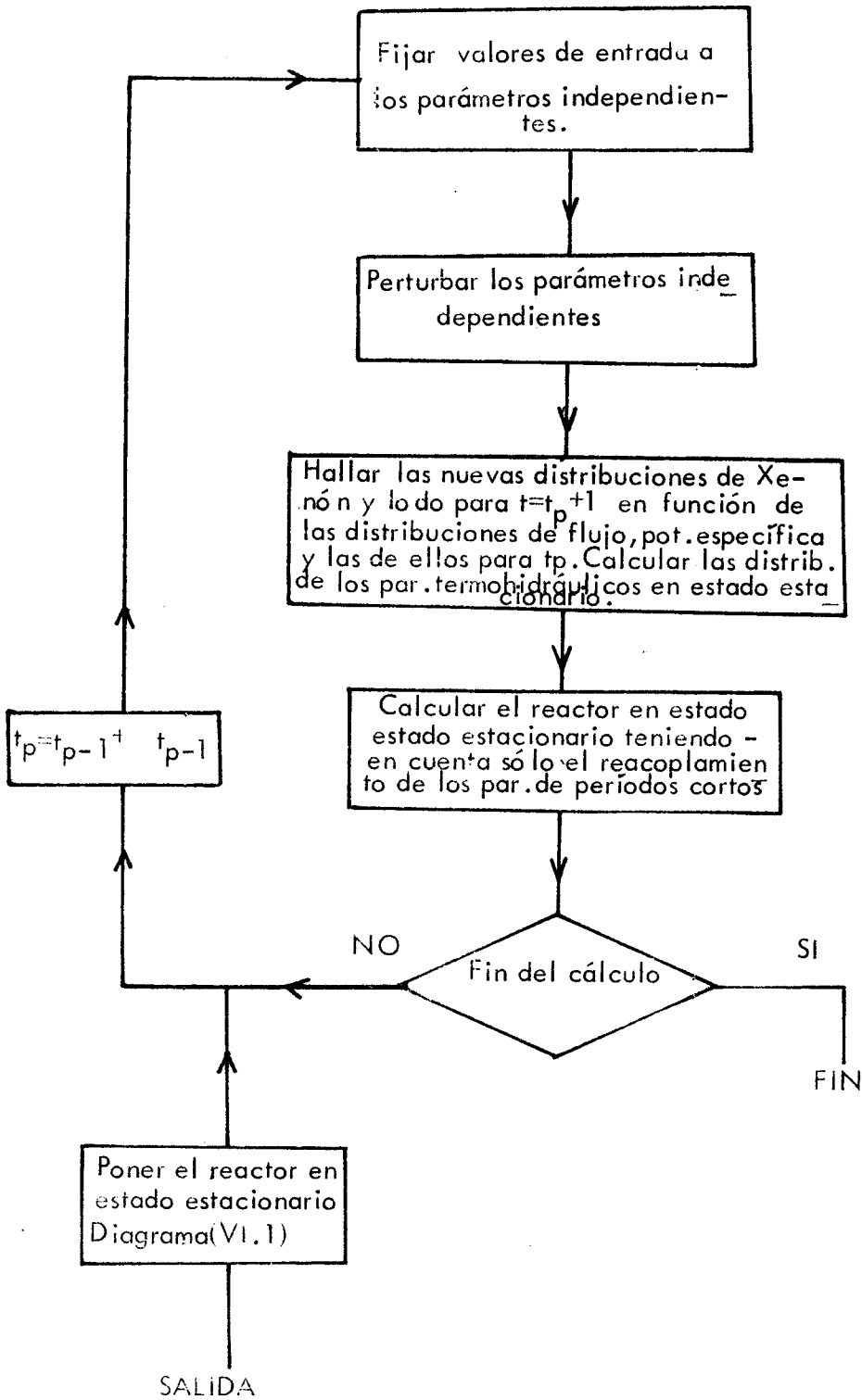


## DIAGRAMA VI.2

Transitorios Cortos .

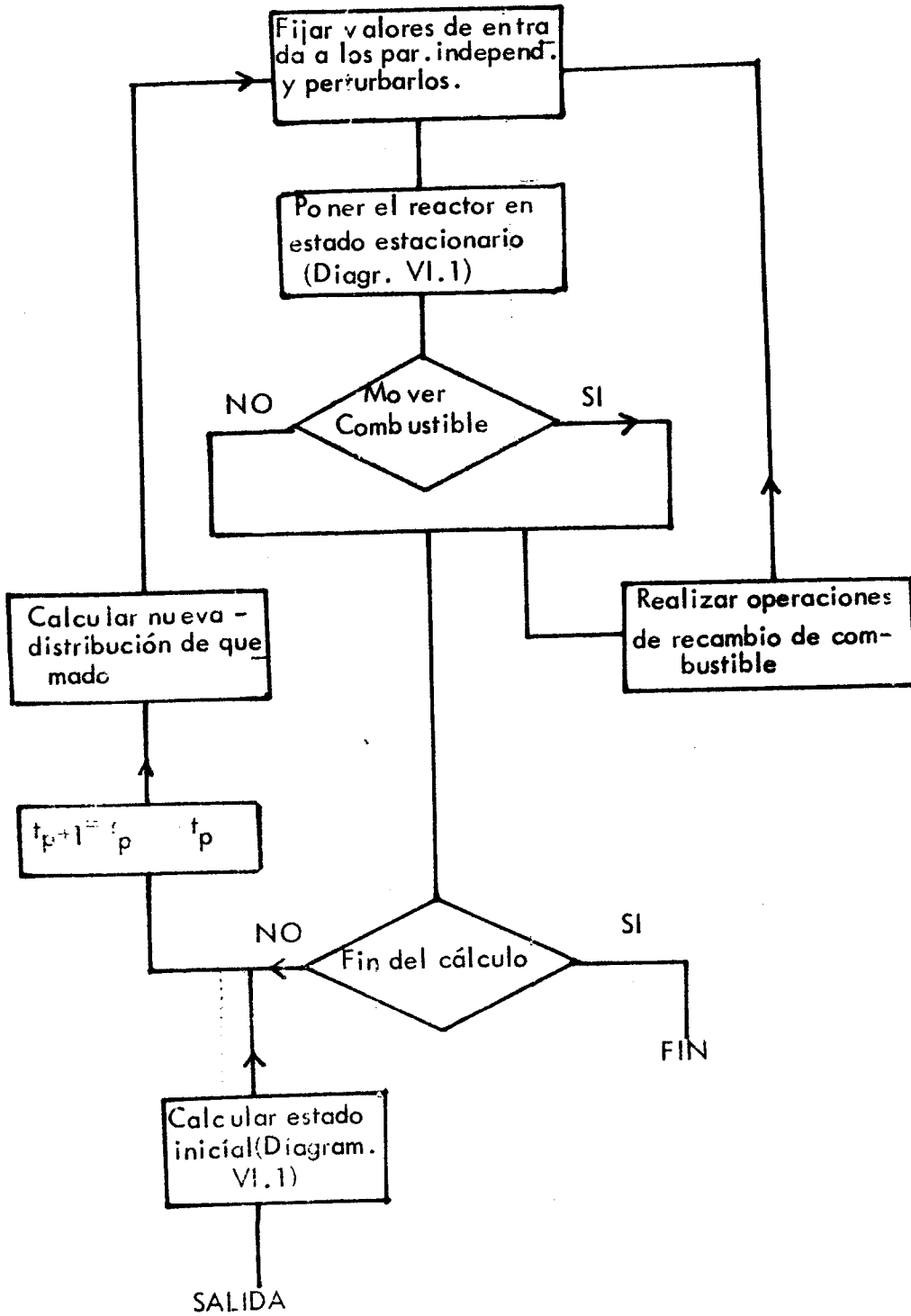


Transitorios Largos o Ciclos de Potencia





Evolución a largo plazo. Gestión de Combustible



## APENDICE VI

### BASES PARA LA SIMULACION TRIDIMENSIONAL DEL NUCLEO DE UN REACTOR TIPO PISCINA \*\*\*

C. GRANT\* y M. LAZO \*\*

- \* CNEA, Dto. de Reactores Nucleares
- \*\* Instituto Peruano de Energía Nuclear

Se trata de simular el núcleo de un reactor tipo piscina (RA3, RP-10, etc.) para el cálculo tridimensional de difusión a dos grupos mediante el código "PUMA"

Con este propósito se realizaron ensayos: con este mismo código con diferentes pasos de red, llegando a la conclusión de que es suficiente adoptar para éstos un valor cercano a los 4 cm, lo que nos produciría, incluyendo alrededor del núcleo una corona de grafito y/o cajas de irradiación, una red de cálculos de unas 7000 celdillas aproximadamente para la representación tridimensional del reactor. No se incluye en la red el reflector externo de agua, que se representa con condiciones de contorno dadas por una matriz de respuesta que relaciona las corrientes neutrónicas con los flujos en el borde exterior de la corona de grafito. Esto permite un ahorro muy importante de memoria y tiempo de procesamiento, pues de otra manera la tarea aquí planteada sería excesivamente costosa.

\*\*\* copia del resumen presentado en el 2do Encuentro Latino Americano de - Tecnología Nuclear.

## APENDICE VII

### ESQUEMA DE UN CALCULO DE REACTOR POR EL METODO DE MULTIGRUPO

En la Figura VII.1 se muestra un esquema de un cálculo de reactor por el método multigrupo. En la actualidad, todos los cálculos son llevados a cabo más o menos automáticamente por una computadora, empezando con los datos de entrada y la especificación del problema, de acuerdo con las instrucciones fijadas en un programa.

Aunque la evaluación de las secciones eficaces de grupo se incluyen en el esquema en la Figura VII.1 estos cálculos se hacen en otro programa, esto es, sin embargo un detalle operacional.

En general los datos de entrada al programa incluyen tres aspectos principales: Son:

- (1) Los datos necesarios para generar los constantes de grupo;
- (2) Ciertas cantidades que sirven tanto como entrada y como factores que determinan la elección del programa; y
- (3) La especificación del problema para el cual se busca la solución

La generación de las constantes de grupo requiere de las secciones eficaces microscópicas como una función de la energía, junto con las especificaciones de los grupos de energía, es decir, el número y los rangos individuales de

energía, y la geometría y composición del sistema bajo consideración. De esta información, las constantes de grupo son evaluadas, por ejemplo, por el método BN. Si todo el rango de energía es dividido en un número moderadamente grande de grupos, puede algunas veces ser usado directamente, las secciones eficaces de grupo tabuladas para un núcleo, independiente de la geometría y composición.

Las cantidades que representan datos de entrada y también determinan el programa a ser usado son la geometría del sistema y la aproximación a la distribución angular del flujo. La geometría puede ser unidimensional, o puede ser bi o tridimensional. Diferentes programas son usados de acuerdo a la dimensión espacial del sistema. La naturaleza de la aproximación a la distribución angular del flujo, es decir,  $P_1$ ,  $P_3$ , etc., es parte del programa; en cálculos multigrupo para todos los reactores, las aproximaciones  $P_1$ , difusión, y la aproximación difusividad son comúnmente usadas.

Finalmente, entre las especificaciones que definen el problema para el que se busca la solución son :

- a) Las condiciones de contorno, es decir, superficie libre, periódica, etc., y
- b) Si el sistema incluye fuente de neutrones independiente o si se busca un autovalor. Para un sistema subcrítico con una fuente independiente, la magnitud de esta fuente puede ser especificado. En un problema de autovalores, la solución requerida puede tener como un autovalor al factor de multiplicación efectiva, es decir,  $K$ , la concentra

ción de material fisible requerido para criticidad en una región, o el espesor del reflector, etc. Esto es que, la naturaleza del autovalor debe ser especificada. Si es  $K$ , está automáticamente incluido en fuente de fisión estimada. De otro modo, si otro autovalor es requerido un estimado debe hacerse de su magnitud.

### Cómputo de un problema de autovalores

En lo que sigue se asume que un problema de autovalores es resuelto, por ejemplo, para el propósito de determinar el factor de multiplicación o las condiciones de criticidad en un sistema dado. A la vez que las constantes de grupo son definidas, junto con la geometría y composición del sistema y la naturaleza del problema a ser resuelto, se da un estimado de la fuente de fisión. La distribución espacial del flujo total en el primer grupo ( $g = 1$ ) puede ser computado, directamente para un sistema unidimensional, o usando iteraciones internas. Una vez que el flujo para el primer grupo es conocido, el cálculo prosigue con el siguiente ( $g = 2$ ) grupo, con la fuente de fisión estimada, y así para todos los  $G$  grupos. Si alguno de los grupos incluye up-scattering, se requerirán iteraciones separadas a menos que se utilicen métodos especiales.

Cuando todos los flujos por grupos son conocidos, la solución es sometida a una prueba de convergencia. Si no ha convergido, se sigue

con las iteraciones exteriores hasta que  $K^{(n)}$  esté muy próximo a  $K^{(n-1)}$ . Si el autovalor  $K$  es hallado, junto con la autofunción asociada, es decir, la distribución de flujo, se completa el cálculo. Sin embargo, todavía hay una valiosa verificación, determinar si los flujos por grupo calculados son más o menos consistentes con los flujos usados al generar las constantes de grupo si existe una significativa inconsistencia, puede ser necesario redeterminar las constantes de grupo y retirar el proceso hasta que se obtenga la convergencia.

Supongamos que se desea determinar las condiciones para criticidad; el valor de  $K$  derivado en la manera descrita debe ser 1. Si no es así, las dimensiones o composición (o ambos) del sistema son cambiados. Todo el cálculo, incluyendo las de las constantes de grupo, es repetido hasta que  $K$  converge a 1.

Varios métodos son usados comunmente para acelerar la convergencia de las iteraciones internas y externas.

Dado que los cálculos descritos dan la distribución de flujo en espacio y energía, el programa puede incluir instrucciones para determinar cantidades relacionadas con la sección eficaz y distribución de flujo, como la densidad de fisión (o potencia) como función de la posición, la potencia total generada, el quemado de combustible, etc. Finalmente, el programa puede ser confeccionado para computar flu -

ios adjuntos. Esto puede ser utilizado para determinar las constantes de grupo en una manera auto consistente.

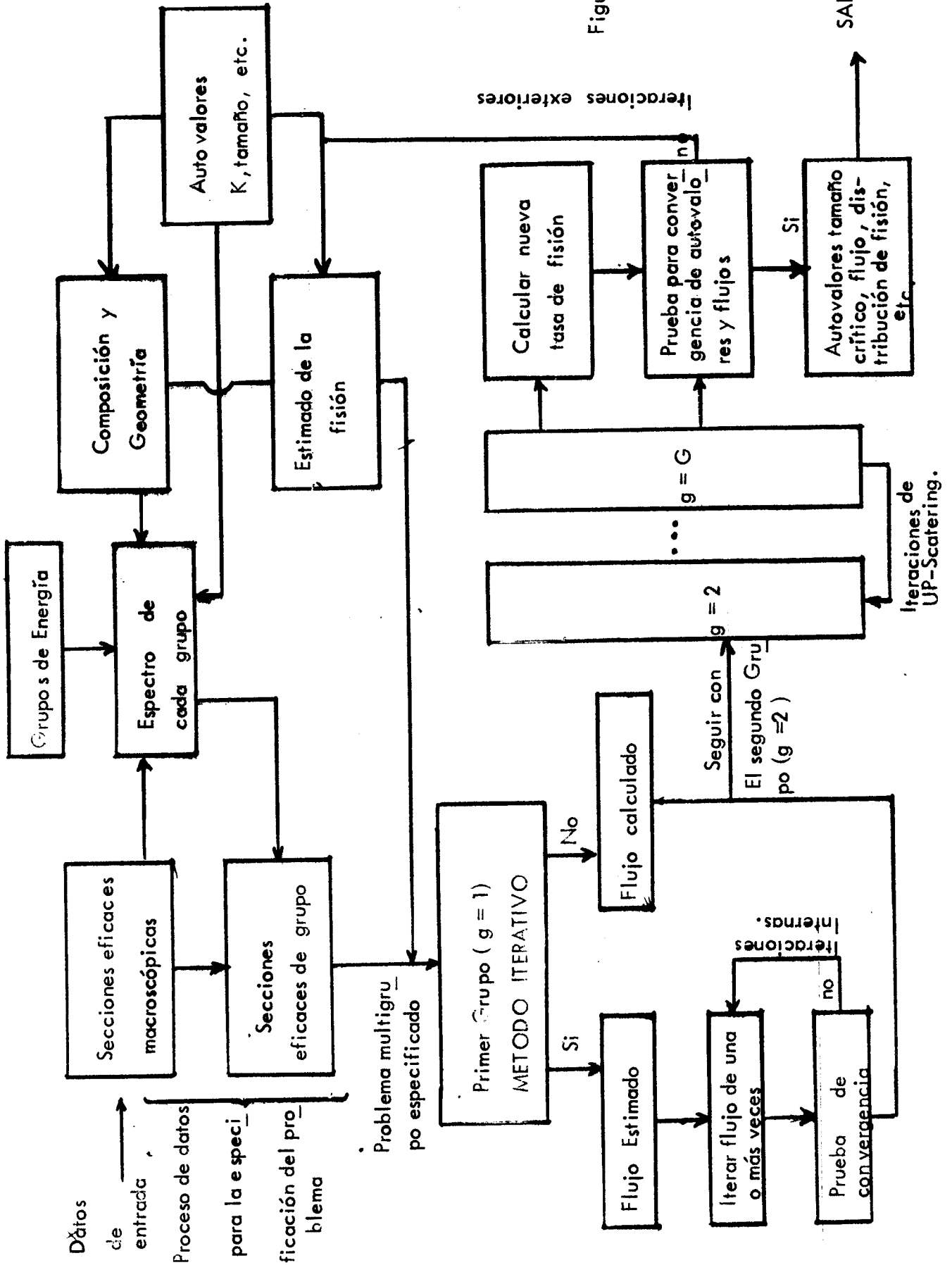


Figura (VII.1)



## APENDICE VIII

### RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE AUTOVALORES

El método más usual para obtener el valor de  $K$  y las auto funciones  $\phi_g$  consiste en pensar a  $K$  como la relación entre el número de neutrones en sucesivas generaciones, siendo la fisión el evento que da origen a una generación de neutrones. Si el sistema es crítico, la población de sucesivas generaciones es constante y por lo tanto  $K = 1$ . Si el sistema es supercrítico, un neutrón de una generación da lugar a más de un neutrón y en consecuencia  $K > 1$ . Lo contrario sucede en un sistema subcrítico. De esta manera, podemos plantear un esquema iterativo de la forma :

$$-\nabla \cdot D_g \nabla \phi_g^{(n)} + \sigma_{Tg} \phi_g^{(n)} = \sum_{g' \neq g}^G \sigma_{g'g} \phi_{g'}^{(n-1)} + \frac{\chi_{Eg}}{K_e^{(n-1)}} \sum_{g'=1}^G \nu \sigma_{fg'} \phi_{g'}^{(n-1)} = 0 \quad (\text{VIII.1})$$

Observamos que el término de fisión en (VIII.1) se calcula con el flujo obtenido en la iteración anterior. La cantidad  $K^{(n-1)}$  es la estimación de  $K$  obtenida luego de  $(n-1)$  iteraciones, y

$$\max \left| \frac{\phi_g^{(n)} - \phi_g^{(n-1)}}{\phi_g^{(n-1)}} \right| < \epsilon_1$$

donde  $\epsilon_1$  es nuevamente un número pequeño y el máximo se determina sobre los puntos de la red ubicados en una determinada región de interés, pudiendo seleccionarse también un conjunto de grupos de interés.

También se establecen criterios de tipo integral es decir

$$\left| \frac{\int_V (\phi_g^{(n)} - \phi_g^{(n-1)}) dv}{\int_V \phi_g^{(n-1)} dv} \right| < \epsilon_1$$

donde la integral se realiza sobre un volumen  $V$  de interés. Vemos entonces que en la estrategia general para resolver el problema del autovalor  $K$  pueden diferenciarse dos problemas diferentes. Uno es la resolución de la distribución espacial a partir de ecuaciones a un grupo con fuente conocida, que puede obtenerse en forma y un nuevo término de fuente, similar a (VIII.5)

$$\frac{1}{K^{(1)}} \sum_{g'=1}^G \nu \sigma_{fg'} \phi_{g'} \quad (\text{VIII.7})$$

Resolviendo nuevamente (VIII.1) se obtiene  $\phi_g^{(z)}$ . Se continúa el proceso hasta que se considera que ha convergido, para lo cual se establecen criterios de diverso tipo. Por ejemplo puede considerarse que el cálculo ha convergido si

$$\left| \frac{K^{(n)} - K^{(n-1)}}{K^{(n-1)}} \right| < \epsilon \quad (\text{VIII.8})$$

donde  $\epsilon$  es un valor predeterminado del orden de  $10^{-4}$ . Dado que usualmente

$K$  converge más rápidamente que la distribución espacial del flujo, se establecen a veces criterios sobre el flujo. Pueden ser del tipo puntual: puede calcularse como la relación entre el número total de neutrones originales en las fisiones producidas por el flujo de la generación  $(n-1)$  ( $\phi^{(n-1)}$ ) y la fuente utilizada para su cálculo, es decir el número total de neutrones originados en las fisiones producidas por el flujo de la generación  $(n-2)$  ( $\phi^{(n-2)}$ ). Es decir que:

$$K^{(n-1)} = \frac{\nu_F^{(n-1)}}{\nu_F^{(n-2)} / K^{(n-2)}} \quad (\text{VIII.2})$$

donde:

$$\nu_F^{(n-1)} = \int \sum_{g'=1}^G \nu \sigma_{f,g'} \phi_{g'} dV$$

De (VIII.2) resulta que la integral de la fuente fisión, es decir  $\nu_F^{(n)} / K^{(n)}$ , es independiente de  $n$ . En consecuencia, también  $K^{(n)}$  convergerá a un valor independiente. Por lo tanto suponiendo que el proceso iterativo converge, resulta que:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} K^{(n)} = 1 \quad (\text{VIII.3})$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \phi^{(n)} = \phi \quad (\text{VIII.4})$$

donde  $\phi$  es una solución de la ecuación de autovalores. Puede demostrarse teóricamente en algunos casos particulares y en general es resultado de la práctica, que el proceso iterativo descrito converge a los valores correctos de  $K$  y  $\phi$ . En

la práctica, el proceso se inicia haciendo una estimación de la fuente de fisión

de la forma

$$\frac{1}{K^{(0)}} \sum_{g'=1}^G \nu \sigma_{fg'} \phi_{g'}^{(0)} \quad (\text{VIII.5})$$

donde  $\phi_{g'}^{(0)}$  es una estimación inicial del flujo en el sistema, que muchas veces se toma igual a 1, es decir constante en espacio y energía.

Introduciendo (VIII.5) en (VIII.1), se obtiene un sistema de ecuaciones con fuente conocida. El sistema se resuelve para cada grupo, obteniéndose los flujos  $\phi_g^{(1)}$  para todos los grupos  $g$ . A partir de ellos, puede calcularse una nueva estimación de  $K$  a partir de (VIII.2):

$$K^{(1)} = \frac{\nu F^{(1)}}{\nu F^{(0)}/K^{(0)}} \quad (\text{VIII.6})$$

directa en una dimensión y en forma iterativa para dos y tres dimensiones ( usando el esquema de Gauss -Seidel por ejemplo),. En los dos últimos casos, el proceso de resolución se denomina de iteraciones interiores. El otro problema involucra la iteración de la fuente de fisión hasta que se obtiene convergencia, estas iteraciones se denominan exteriores ( o iteraciones de fuente o de potencia) para distinguir las de la iteraciones interiores destinadas a obtener los flujos dentro de un grupo.

## APENDICE IX

DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION DEL FLUJO  
NEUTRONICO EN EL RPE POR ACTIVACION DE  
HOJUELAS

Para este apéndice se ha extractado del Trabajo de Tesis (Ref. 26) las posiciones de irradiación, el flujo neutrónico según Westcott, los resultados, el gráfico de la distribución de flujo radial, y las conclusiones.

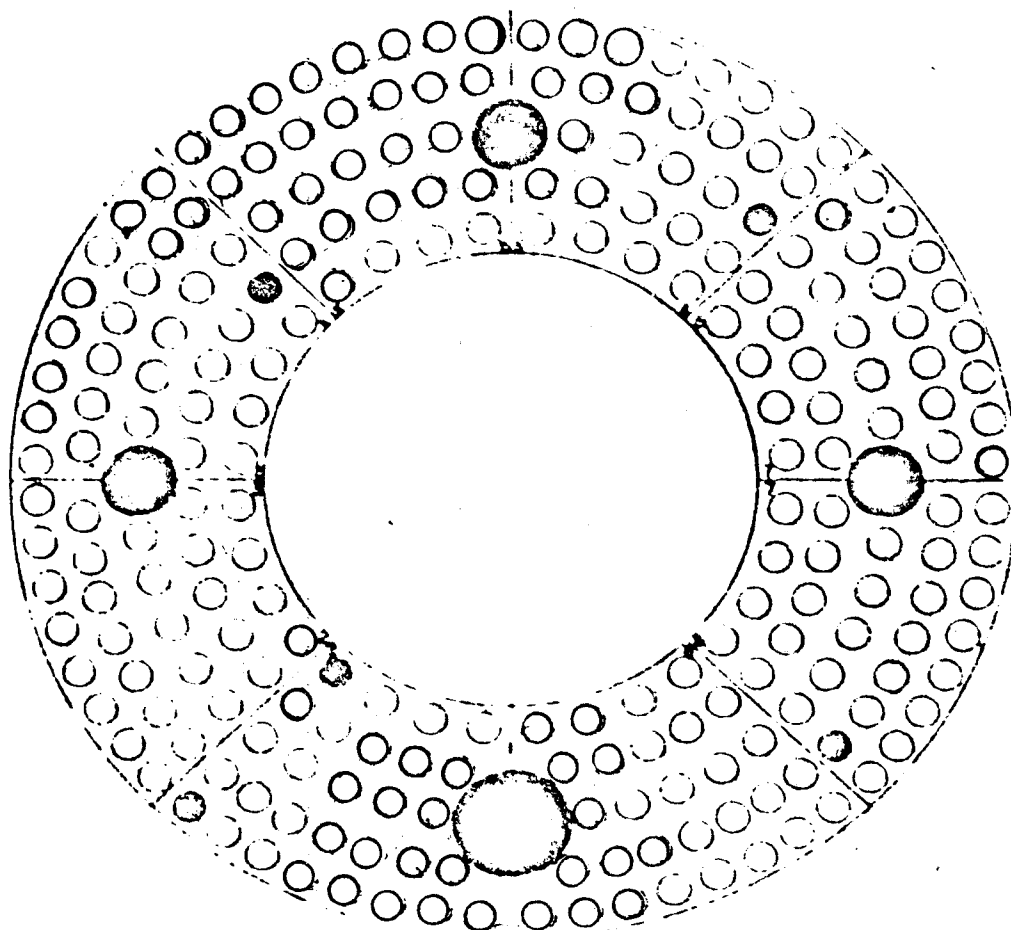


Fig. 3.1 DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES EN EL NUCLEO

I R P O		INSTITUTO PERUANO DE ENERGIA NUCLEAR	
CONFIGURACION DEL NUCLEO			
Nº. 25	FECHA 24-07-79	Nº DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES: 214	
MASA CRITICA (U 235)	OBSERVACIONES		
EXCESO DE REACTIVIDAD	○ POSICIONES DE IRRADIACION		

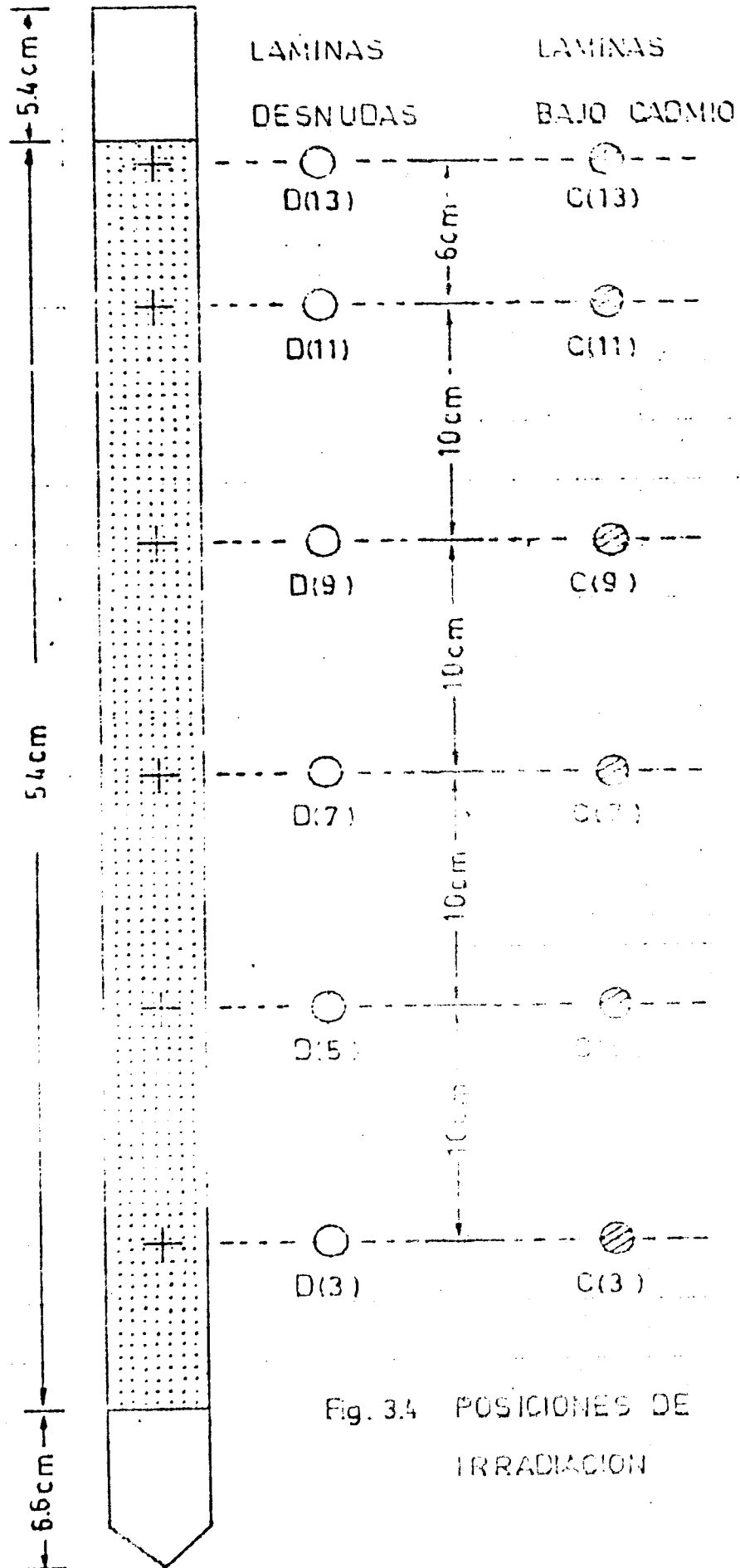


Fig. 3.4 POSICIONES DE IRRADIACION

### G. Flujo Neutrónico Térmico II (Westcott)

Método : Según las ecuaciones (2.89) y (2.100)

La técnica de la razón de cadmio nos permite determinar el índice espectral de Westcott ( $r$ ) y con ella la razón entre el flujo epitérmico y térmico. ( $\lambda = \phi_{epi} / \phi_{th}$ ) para cada posición axial de la hojuela, con estos datos y las constantes determinamos los flujos neutrónicos.

#### FLUJO NEUTRÓNICO TÉRMICO DE WESTCOTT

TABLA 3.6

POSICIÓN Z (cm)	CORONA 5 R=0.93cm		CORONA 4 R=2.79cm		CORONA 3 R=4.65cm		CORONA 2 R=6.51cm		CORONA 1 R=337cm.	
	$\phi$ (n/cm <sup>2</sup> .seg) x 10 <sup>8</sup>	$\lambda$	$\phi$ (n/cm <sup>2</sup> .seg) x 10 <sup>6</sup>	$\lambda$	$\phi$ (n/cm <sup>2</sup> .seg) x 10 <sup>6</sup>	$\lambda$	$\phi$ (n/cm <sup>2</sup> .seg) x 10 <sup>6</sup>	$\lambda$	$\phi$ (n/cm <sup>2</sup> .seg) x 10 <sup>6</sup>	$\lambda$
$\phi$ (3)	7	12.627	14.179		8.613		7.453		7.264	
$\phi$ (5)	17	15.293	19.253		11.224		9.884		9.201	
$\phi$ (7)	27	14.383	19.832		12.114		10.082		8.558	
$\phi$ (9)	37	12.393	16.929		9.651		8.403		5.910	
$\phi$ (11)	47	6.270	11.109		6.214		4.298		2.689	



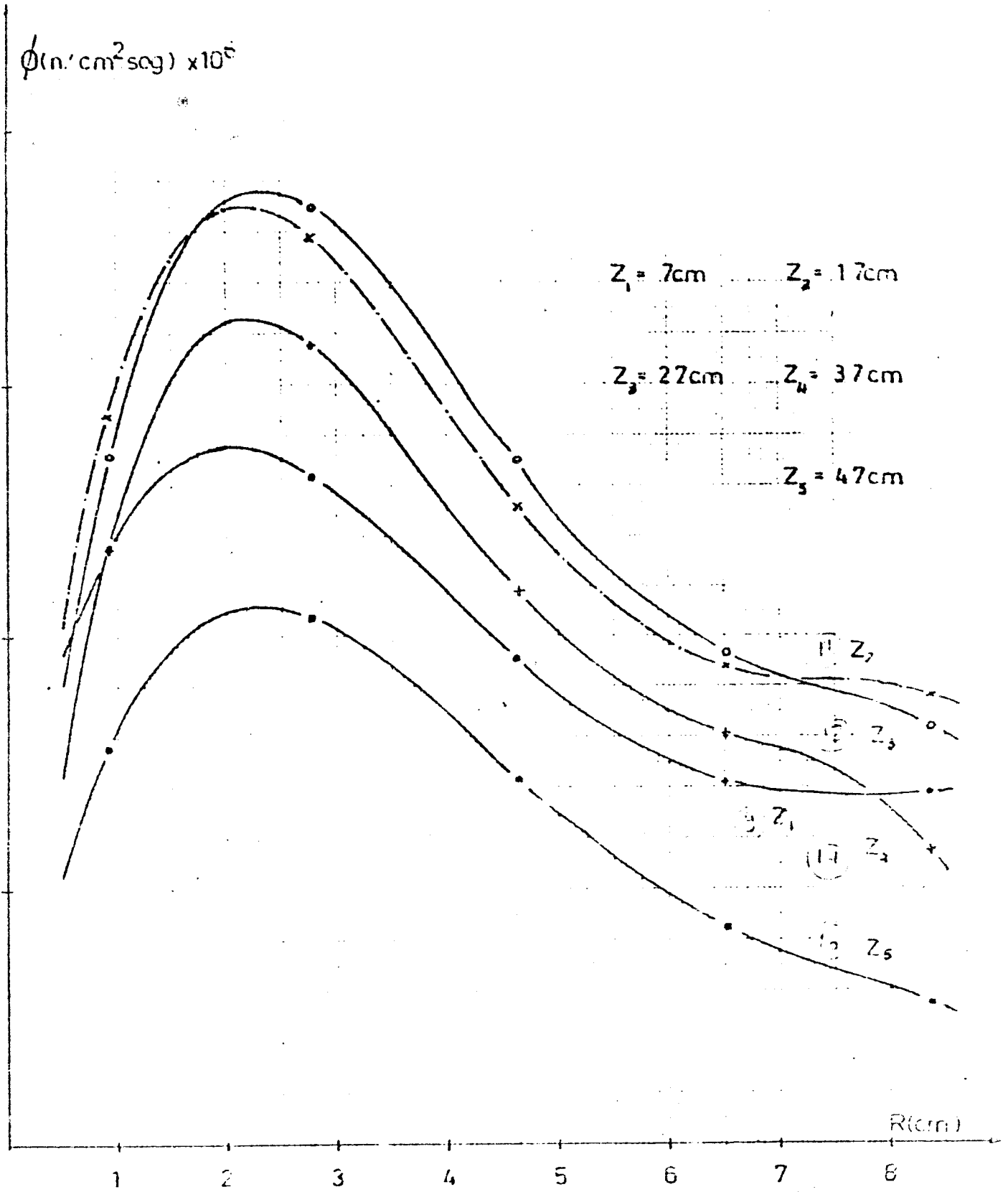


Fig. 42 DISTRIBUCION RADIAL DEL FLUJO NEUTRON CO

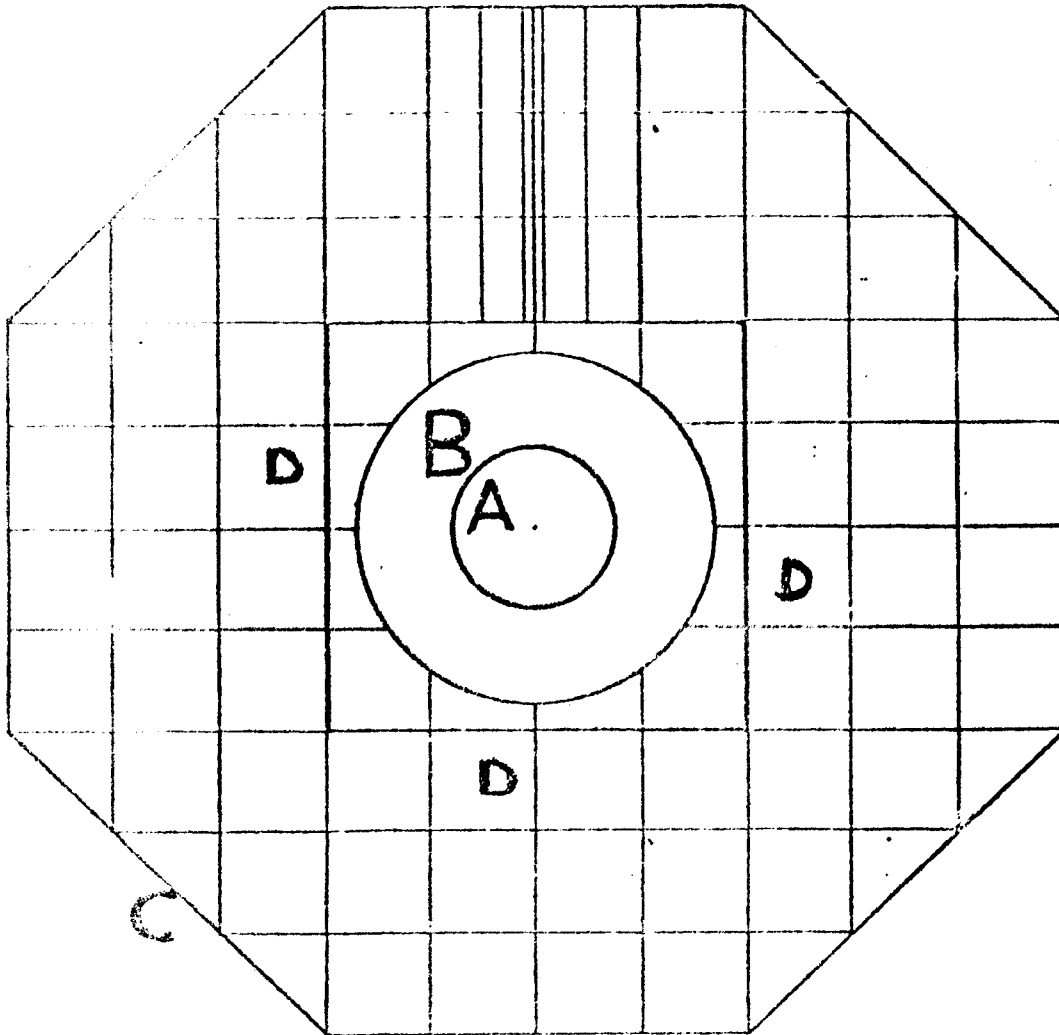
## V CONCLUSIONES

1. Siendo la eficiencia de un detector de  $\text{Ina(Tl)}$  función únicamente del tamaño del cristal y de la geometría del arreglo fuente detector, los resultados obtenidos y presentados en la Fig. 4-1, muestran correlación con otros resultados (bibliografía).
2. El flujo neutrónico térmico a lo largo de un elemento de combustible, muestra una depresión del flujo en las posiciones (7) y (9) (Fig. 4.3) esto es consecuencia de la influencia de las barras de control. Para elementos combustibles alejados de las barras de control la perturbación es mucho menor (Fig. 4.4).

La distribución del flujo en función de la posición de los elementos combustibles a través de un radio presentada en la Fig. 4.2 muestra un crecimiento conforme se acerca al reflector interno, luego el flujo disminuye muy cerca a ella. Puede explicarse esta situación debido a la influencia mucho mayor del reflector interno que la del reflector externo que refleja en una sola dirección.

El valor más alto del flujo se halló en la corona 4 (próxima al reflector interno del orden de  $2 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{seg}$ ) y el valor más pequeño está en la corona 5 próxima al reflector externo (del orden de  $2 \times 10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{seg}$ ).

Los resultados de las tablas 3.5 y 3.6 muestran valores para el flujo del mismo orden. Estos dos resultados determinados -- por métodos diferentes son entonces consistentes, las diferencias que pueden observarse se deben fundamentalmente a los valores de los factores de corrección utilizadas, muchas de ellas han sido tomadas de tablas dada la poca disponibilidad de material para determinarlos experimentalmente.



VISTA DE PLANTA DEL REACTOR

- A: REFLECTOR INTERNO
- B: GRILLA PARA LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES
- C: REFLECTOR EXTERNO
- D: UBICACION DE DETECTOR DE TRIFLUORURO DE BORO.

## REFERENCIAS

1. C. GRANT  
PUMA  
Sistema tridimensional para la simulación del funcionamiento de reactores nucleares. Fundamentos teóricos y utilización del programa  
Dic - 1979 - CNEA- Re  
( En manuscrito)
2. FOWLER  
EXTERMINATOR -II  
A Fortran IV code for solving multigroup neutron diffusion equation in two dimensions  
ORNL - 4078 ( 1967)
3. G. BELL y S. GLASSTONE  
"Nuclear Reactor Theory"  
Van Nostrand Reinhold Co. New York 1970
4. R. VARGA  
Matrix Iterative Analysis  
Prentice -Hall, Inc -Englewood Cliffs, New Jersey
5. ZIYA AKCASU  
Mathematical Methods in Nuclear Reactor Dynamics  
Academic Press
6. TOBIAS FOWLER  
The Equipoise Method  
A simple procedure for group diffusion calculations in two and three dimensions Nuc ,Sci. Eng. 12, 513 - 518 ( 1962)

7. A. WEINBERG y E. WIGNER  
"The Physical Theory of neutron chain Reactors"  
The University of Chicago Press. Chicago 1959
8. ARGONNE NATIONAL LABORATORY  
"Reactor Physics Constants "  
United States Atomic Energy Commission  
ANL -5800, 1963
9. M. CLARK ,R.F. HANSEN  
"Numerical Methods of Reactor Analysis"  
Academic Press , 1964
10. A. HENRY  
Nuclear -Reactor Analysis
11. W.M. STACEY, Jr  
"Space -Time Nuclear Reactor Kinetics"  
Academic Press
12. W.M. STACEY  
"Variational Methods in Nuclear Reactor Theory"  
Academic Press
13. R. LAMARSH  
"Introduction to Nuclear Reactor Theory"  
Addison Wesley Publishing Company Inc  
Reading Massachusetts ( 1966)
14. G.M. WEINBERG  
Programación PLII  
Ed.Limusa-Wiley, 1973

15. D.R. STOUTEMYER  
PL/I Programación para Ciencia e Ingeniería  
Prentice Hall, 1972
16. T.H. MOTT, S.R. ARTANDI, L. STRUMINGER  
Introduction to PL/I Programming for Library and Information Science  
Academic Press
17. IBM/ SC 33 0006  
OS PL/I OPTIMIZING COMPILER PROGRAMMER'S GUIDE
18. R.C. SCOTT, N.E. SONDAK  
PL/I FOR PROGRAMMERS
19. IBM/SC 330037  
OS PL/I OPTIMIZING COMPILER : CMS USER'S GUIDE
20. IBM/SC 330027  
OS PL/I OPTIMIZING COMPILER : MESSAGES
21. R.D. RICHTMYER, K.W. MORTON  
Difference Methods for Initial -Value Problems  
Interscience Publishers
22. G.I. MARCHUK  
Methods of Numerical Mathematics Springer -Verlag
23. G.D. SMITH  
Numerical Solution of Partial Differential Equation, Oxford University  
London, 1965
24. CNEA  
"Informe Preliminar de Seguridad del RP-0"  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Buenos Aires, 1978
- (25) C. GRANT y M. LAZO  
"BASES PARA LA SIMULACION TRIDIMENSIONAL DEL NUCLEO DE  
UN REACTOR TIPO PISCINA"  
Trabajo presentado en el 2do. Encuentro Latinoamericano de Tecnología Nuclear, Nov. 1979

26. M. POMA T.

"Determinación de la Distribución del Flujo Neutrónico en el RP-0  
por Activación de Hojuelas"

Trabajo presentado para optar el Título de Licenciado en Física  
Universidad Nacional Mayor de San Marcos  
Enero, 1980.

## INDICE DE TABLAS

TABLA 4.1.

Constantes Macroscópicas Reactor Tipo Piscina

TABLA 4.2.

Matriz de Respuesta Reactor Tipo Piscina

TABLA 4.3.

Tiempos y número de iteraciones Reactor Tipo Piscina

TABLA 4.4.

Flujos, Factor de Multiplicación, Factor de forma  
Reactor Tipo Piscina.

TABLA 4.5.

Cálculo comparativo con EXTERMINATOR-II

TABLA 4.6.

Distribución de flujo por puntos para las tres mallas del  
Reactor tipo Piscina

TABLA 4.7

Distribución de Flujo por puntos obtenida vía  
EXTERMINATOR -II

TABLA 4.8.

Constantes Macroscópicas para el RP-0

TABLA 4.9.

Matriz de respuesta para reflector exterior del RP-0



## TABLA 4.10

Distribución de flujo por puntos reactor con tres regiones.

## TABLA 4.11.

Distribución de flujo por puntos reactor con dos regiones.

## TABLA 4.12

Tiempos y número de iteraciones en el cálculo del RP-0

## TABLA 4.13

Factor de flujo, Factor de multiplicación, Factor de forma en el RP-0