

08.63.04

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1963

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
GERENCIA DE ENERGIA

AGUA LIVIANA Y CORRELACION EXPERIMENTAL

Ing^o.ROBERTO SOLANILLA

CNEA-Re-6

PROGRAMA DE REACTORES

CALCULOS NUCLEARES DE REACTORES MODERADOS A
AGUA LIVIANA Y CORRELACION EXPERIMENTAL
Ing^o.ROBERTO SOLANILLA

ENEA - Re - 6

INTRODUCCION

Es usual en el estudio de reactores moderados a agua liviana adoptar la representación a multigrupos de difusión para la distribución de neutrones en energía.

El empleo del hidrógeno como moderador conduce a diseños de núcleos compactos y exige de la aproximación teórica ciertas condiciones, tales como:

- Buen tratamiento del proceso de moderación en hidrógeno.
- Buenas evaluaciones de las fisiones epitermales del U-235, de las capturas resonantes del U-238 y del escape de neutrones rápidos.
- Buena representación del espectro de neutrones "térmicos".

Se pueden citar los siguientes tratamientos para la obtención de las constantes neutrónicas de los grupos de difusión que contemplen las condiciones apuntadas más arriba:

- 1) - Deutsch ⁻¹⁻, despreciando las fisiones epitermales del U-235, presenta un conjunto de rutinas para tres grupos de difusión que permite analizar con marcado éxito, experiencias críticas de $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ con uranio levemente enriquecido.
- 2) - Wehmeyer-Roach ⁻²⁻, calculan para el modelo a dos grupos modificados las constantes de difusión por expresiones semi-empíricas y estudian la condición crítica de un conjunto de sistemas, mostrando la correlación resultados satisfactorios.

///

- 3) - El grupo Westinghouse calcula las constantes para tres grupos rápidos y uno térmico, computando el espectro de moderación y térmico en un reactor, empleando para ello los códigos MUFT ⁻³⁻⁴⁻ y SOFOCATE ⁻⁵⁻ escritos para la computadora digital IBM; consigue una buena correlación experimental en las condiciones críticas, como así también en los parámetros del reticulado. ⁻⁶⁻⁷⁻
- 4) - Empleando los códigos MUFT-SOFOCATE, Ombrellaro ⁻⁸⁻⁹⁻ y Amster ⁻¹⁰⁻ presentan tablas de secciones eficaces promedias para algunos isótopos, para ser utilizados en el modelo a cuatro grupos de difusión, lo cual evita recurrir a la computadora IBM.

En el presente trabajo se hace uso de las tablas de Ombrellaro-Amster de secciones eficaces promedias y del procedimiento de Ombrellaro ⁻⁸⁻ de reducción de cuatro grupos a dos grupos de difusión, para **calcular** las constantes de difusión del modelo a dos grupos modificados.

Esto permite prever las características de funcionamiento de núcleos limpios, al menos en los casos estudiados, los cuales comprenden un vasto conjunto de experiencias críticas y exponenciales.

El método elegido, mencionado ya por Hicks ⁻⁷⁻, ha resultado del compromiso entre los métodos modernos de computación de reactores hidrogenados y las facilidades de computación de que se dispone.

A - METODO DE CALCULO

A-1: Ecuaciones de difusión para el modelo a dos grupos modificado de neutrones.-

El modelo a dos grupos modificado de neutrones considera las fisiones rápidas del U-238 y epitermales del U-235. Las ecuaciones de difusión correspondientes son:

$$\begin{aligned} & - D_r \nabla^2 \phi_r + (\Sigma_{ar} + \Sigma_t) \phi_r = \frac{(\nu \Sigma_f)_r}{\lambda} \phi_r + \frac{(\nu \Sigma_f)_T}{\lambda} \phi_T \\ 1) & - D_r \nabla^2 \phi_r + \Sigma_{ar} \phi_r = \Sigma_t \phi_r \end{aligned}$$

siendo D_r coeficiente de difusión, secciones eficaces macroscópicas de absorción y fisión respectivamente, Σ_t sección eficaz macroscópica de transferencia del grupo rápido al termal, λ el autovalor que muestra el alejamiento del sistema de su estado crítico ($\lambda \neq k_{efec.}$) y los índices "r" y "T" designan el grupo rápido (definido entre E 10 Mev a E 0.625 ev) y térmico (entre E=0.625 ev a E=0 ev).

Mientras que en reactores grandes la teoría de dos grupos: uno rápido y uno térmico, permite reproducir sus características en forma apropiada, ellos no bastan en el caso de reactores hidrogenados donde las fugas de neutrones rápidos exige una subdivisión del grupo rápido en varios grupos, de modo que las constantes de difusión sean independientes del tamaño del reactor. En este trabajo, a pesar de conservar un solo grupo rápido, se ha tenido en cuenta esa limitación y se ha introducido una

///

modificación en las constantes del grupo rápido haciéndolas derivar de los valores que se tendrían de haber considerado una subdivisión en más grupos, lo cual implica tener presente las fugas antes mencionadas. Para este fin se ha seguido el procedimiento de Ombrellaro ⁻⁸⁻, cuyas expresiones son:

$$\begin{aligned} D_r &= \frac{\Gamma_1 D_1 + \Gamma_2 D_2 + \Gamma_3 D_3}{\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3} \\ 2) \quad \Sigma_{ar} &= \frac{\Sigma a_1 \Gamma_1 + \Sigma a_2 \Gamma_2 + \Sigma a_3 \Gamma_3}{\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3} \\ (\nu \Sigma_f)_r &= \frac{(\nu \Sigma_f)_1 \Gamma_1 + (\nu \Sigma_f)_2 \Gamma_2 + (\nu \Sigma_f)_3 \Gamma_3}{\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3} \\ \Sigma t &= \frac{\Sigma t_3 \Gamma_3}{\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3} \end{aligned}$$

Los flujos promedios de cada grupo vienen definidos, para el caso de reactor desnudo de laplaciana B^2 y fuente unitaria, por las fórmulas siguientes:

$$\begin{aligned} 3) \quad \Gamma_1 &= \frac{X_1}{B^2 D_1 + \Sigma a_1 + \Sigma t_1} \\ \Gamma_2 &= \frac{X_2 + \Sigma t_1 \Gamma_1}{B^2 D_2 + \Sigma a_2 + \Sigma t_2} \\ \Gamma_3 &= \frac{\Sigma t_2 \Gamma_2}{B^2 D_3 + \Sigma a_3 + \Sigma t_3} \end{aligned}$$

donde x_i es la proporción de neutrones que nace en el grupo "i".

Ombrellaro adopta los siguientes intervalos en energía para cada grupo:

Grupo 1: $E = 10$ Mev a $E = 0.821$ Mev

Grupo 2: $E = 0.821$ Mev a $E = 5.5$ Kev

Grupo 3: $E = 5.5$ Kev a $E = 0.625$ ev

///

En este caso

$$x_1 = 0,75178$$

$$x_2 = 0,24822$$

El cálculo de las constantes del grupo térmico que contemplen el "endurecimiento" del espectro, se realiza a través de las secciones eficaces promedias obtenidas de las tablas de Amster -10-

Poniendo $\nabla^2 \phi = -B^2 \phi$ en las ecuaciones (1) resulta:

$$4) \quad \lambda = \frac{K_r}{1 + L_s^2 B^2} + \frac{K_r}{(1 + L_s^2 B^2)(1 + L_s^2 B_2^2)}$$

siendo

$$K_r = \frac{(\nu \Sigma_f)(1-\rho)}{\Sigma_{ar}} : \text{constante rápida de multiplicación para medio infinito.}$$

$$K_r = \frac{(\nu \Sigma_f)_T P}{\Sigma_{ar}} : \text{constante térmica de multiplicación para medio infinito.}$$

$$P = \frac{\Sigma_t}{\Sigma_{ar} + \Sigma_t} : \text{probabilidad de escape del grupo rápido.}$$

$$L_s^2 = \frac{D_r}{\Sigma_{ar} + \Sigma_t} : \text{área de moderación}$$

$$L_s^2 = \frac{D_r}{\Sigma_{ar}} : \text{área de difusión termal.}$$

En un sistema crítico, si B^2 es la laplaciana medida, λ es el valor estimado de la constante de multiplicación efectiva (K_{efec}). La desviación de λ de la unidad es una indicación directa del error en reactividad inherente al esquema de cálculo.

///

La laplaciana material del sistema se obtiene de (4) para $\lambda = 1$

$$5) B^2 = \frac{1}{2} \left\{ -\left(\frac{1}{\bar{G}} + \frac{1}{L^2}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\bar{G}} + \frac{1}{L^2}\right)^2 + \frac{4(K'-1)}{L^2 \bar{G}}} \right\}$$

$$\text{con: } \bar{G} = \frac{1 - \frac{2}{3}}{1 - K_r}$$

$$K' = \frac{K_r}{1 - K_i}$$

A-2.- Cálculo de las constantes de difusión de los grupos 1,2,y 3

Ombrellaro ⁻⁸⁻⁹⁻ ha definido las constantes de difusión para el modelo a tres grupos rápidos en función de secciones eficaces ajustadas, computadas a partir de las constantes obtenidas con MUFT IV ⁻⁴⁻ para mezclas binarias de metal-agua, aproximación P-I, $B^2 = 0.0025 \text{ cm}^{-2}$ y diferentes relaciones volumétricas. ⁻⁹⁻ Así ha obtenido, para algunos isótopos la sección eficaz de transporte ($\bar{\sigma}_{tr}$), la sección eficaz de transferencia ($\bar{\sigma}_t$) la sección eficaz de absorción ($\bar{\sigma}_a$) y la sección eficaz de fisión ($\bar{\sigma}_f$) que permiten expresar las constantes de cada grupo por:

$$6) \quad \begin{aligned} D_i &= \left\{ \sum_j N_j V_j \bar{\sigma}_{tr,j} \right\} / \sum_j V_j & i=1,2,3 \\ \Sigma_{ai} &= \left(\sum_j N_j V_j \bar{\sigma}_{a,j,i} \right) / \sum_j V_j & i=1,2 \\ (\nu \Sigma_f)_i &= \left(\sum_j N_j V_j \nu_i \Sigma_{f,j,i} \right) / \sum_j V_j & i=1,2,3 \\ \Sigma_{ti} &= \left(\sum_j N_j V_j \bar{\sigma}_{t,j,i} \right) / \sum_j V_j & i=1,2 \end{aligned}$$

N_j : Átomos por cm^3 del isótopo "j".

///

V_j : Volumen geométrico donde se encuentra el isótopo "j".

Pero la perturbación del espectro en $1/E$ por las resonancias del U-238, exige una formulación distinta para $\sum_a$ y $\sum_t$ del grupo epitermal (grupo 3 en el modelo a tres grupos rápidos); Hicks⁻⁷⁻ apoyándose en la aproximación lineal del flujo epitérmico en la zona de resonancia (propuesta por el mismo Ombrellaro), deriva la expresión siguiente para la sección eficaz macroscópica de transferencia del grupo epitermal:

$$\Sigma_{t3} = \left(\sum_j N_j V_j \bar{\sigma}_{tj3} \right) / \sum_j V_j - \frac{a}{1+a} \Sigma_{a3}$$

siendo "a" una constante empírica que tiene presente la distorsión del espectro en $1/E$ ($a = 0.867$ para el caso de combustible a base de UO_2 ⁻⁷⁻ y $a = 0.67$ para cuando el combustible es uranio metálico⁻⁸⁻) $\bar{\sigma}_{t3}$ es la sección eficaz de transferencia computada por Ombrellaro para cuando el U-238 no está presente, y Σ_{a3} la sección eficaz de absorción del grupo que incluye la absorción efectiva total del U-238.

Los cálculos en el presente trabajo han sido efectuados con Σ_{a3} definida por:

$$7) \Sigma_{a3} = \left(\sum_j N_j V_j \bar{\sigma}_{aj3} \right) / \sum_j V_j + \frac{N_{238} V_{238}}{\sum_j V_j} \frac{1_{eff}^{238} - 0.31221 \ln\left(\frac{8.21}{5.5}\right)}{\ln\left(\frac{5500}{0.625}\right)}$$

donde 0.31221 es la sección eficaz de absorción del U-238 del grupo 2^x, $\bar{\sigma}_{a3}$ es la sección eficaz de absorción no resonante del grupo 3, ambas determinadas a partir del

///

esquema de ajuste de Ombrellaro, y $I_{\text{efec.}}^{238}$ es la integral de resonancia efectiva del U-238 (excluida la absorción en $1/V$ del U-238), computada por las fórmulas siguientes para el caso que el combustible se presente en barras cilíndricas de radio r_0 y temperatura $T = 293 \text{ } ^\circ\text{K}$:
-11-

$$\text{Oxido (UO}_2\text{)} \quad I_{\text{efec.}}^{238} = 4.15 + 26.6 \left(\chi S / M_o \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$8) \quad \frac{S}{M} = \frac{2}{\ell_o r_o} ; \ell_o : \text{densidad del óxido}$$

$$\text{Metal: I} \quad I_{\text{efec.}}^{238} = 2.85 + 24.7 \left(\chi S / M_u \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{S}{M_u} = \frac{2}{\ell_u r_o} \ell_u : \text{densidad del U-metal}$$

siendo χ la corrección por "efecto Dancoff" dada por: (aproximación de Bell -12-)

$$\chi = \left[1 + \frac{1}{2r_o \left(\frac{V_m}{V_c} \sum_m + \sum_v \frac{V_v}{V_c} \right)} \right]^{-1}$$

m, v, c : Sub-índices que caracterizan al moderador, vaina y combustible, respectivamente.

V, Σ : Volumen y sección eficaz macroscópica total.

Estas fórmulas han sido deducidas del cálculo de la absorción resonante del U-238 (aproximaciones NR o NRIM)

x La dependencia de la sección eficaz de absorción del grupo 2 con (S/M) es despreciable -11-.

///

que incluye el efecto Doppler, la interferencia entre dispersión resonante - potencial y el efecto de fluctuaciones en la zona estadística (a partir de 1000ev), tratados con la aproximación racional de Wigner para la probabilidad de colisión y el agregado de la corrección por el empleo de dicha aproximación como así de las contribuciones por "psscattering" y capturas rápidas, estimadas estas últimas en 0,8 barn.

En la figura 1 se ha tratado de comparar los valores de I_{efec}^{238} obtenidos de la fórmulas (8) con los valores derivados de medidas experimentales realizadas por varios autores -13-14-15-. El examen de la figura 1 muestra que los valores calculados para el caso de U-metal están de acuerdo con los experimentales mientras que para el caso de óxido el cálculo presenta dispersiones del orden de $\pm 6\%$ respecto a los valores de Bettis⁻¹³ (medidos por técnica de activación) y -6% respecto a las medidas de Moore, Pattenden y Tattersall⁻¹⁴⁻ (utilizando la técnica del oscilador de pila), en el caso más desfavorable del fango de (S/M) $\frac{1}{2}$ donde se ubican las experiencias a analizar más adelante.

La definición de $\sum_{\alpha\beta}$ puede resultar no del todo comprensible, especialmente por la inclusión en el primer término, de la absorción no resonante del U-238 del esquema de Ombrellaro. No obstante queda justificada por los resultados de la correlación experimental, como se muestra en la sección B.

Finalmente en la Tabla 1 se ha reproducido la tabla de Ombrellaro⁻⁹⁻ de secciones eficaces microscópicas ajustadas para el modelo a 3 grupos rápidos del H, O, C, U-238, U-235, Zr, Fe, con el agregado del Al, obtenidas a partir de las constan

///

tes neutrónicas de difusión calculadas con MUFT IV (para mezclas de Al-H₂O, aproximación B-1 y tres relaciones volumétricas) en la bibliografía disponible⁻¹⁶⁻, que permitirán, junto con las fórmulas (8) el cálculo de las constantes de difusión de los grupos 1, 2 y 3, válidas al menos en reactores con laplaciana no muy distintas de $25 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$, a ser empleadas en las fórmulas (2).

A-3.- Cálculo de las constantes de difusión térmicas.

Las absorciones térmicas relativamente altas que presentan los núcleos de los reactores moderados a agua liviana, exige un tratamiento especial para la representación del espectro de neutrones térmicos. El método seguido es el que utiliza el código SOFOCATE⁻⁵⁻, el cual computa el espectro de termalización en mezclas de hidrógeno con otros absorbentes no moderadores, de acuerdo al modelo de Wigner-Wilking⁻¹⁷⁻. Utilizando el código SOFOCATE para mezclas hidrogenadas homogéneas y suponiendo nulo el escape de neutrones térmicos, Amster⁻¹⁰⁻ ha tabulado para varios isótopos secciones eficaces microscópicas promedio, en función de:

T: Temperatura del moderador en °K.

X: Absorción en l/V por átomo de hidrógeno.

Y: Átomos de U-235 por átomo de hidrógeno.

Z: Átomos de Pu-239 por átomo de hidrógeno.

A los fines prácticos, ciertas secciones eficaces tabuladas por Amster (la de transporte del hidrógeno, las de absorción y de fisión del U-235 y la de absorción para los

///

cuerpos que siguen la ley en $1/V$ con $(\sqrt{V}=2.200 \text{ m}^3/\text{s}=1 \text{ barn})$ han sido aproximados por los polinomios de interpolación siguientes^x (para T 293°K y Z 0):

$$\begin{aligned} \bar{V}_{f,r} &= 29.49 - 1.165x - \frac{u}{2} \{ 9.71 - 1.285x \} + \frac{u^2}{2} \{ 2.57 - 0.465x \} \\ 9) \bar{V}_{a,r}^{V-235} &= 481.8 - 20.25x - \frac{u}{2} \{ 170.4 - 22.85x \} + \frac{u^2}{2} \{ 45.6 - 8.35x \} \\ \bar{V}_{f,r}^{V-235} &= 411.5 - 17.55x - \frac{u}{2} \{ 147.5 - 19.80x \} + \frac{u^2}{2} \{ 39.5 - 7.3x \} \\ U_7 &= 0.7365 - 0.02835x - \frac{u}{2} \{ 0.2373 - 0.03706x \} + \frac{u^2}{2} \{ 0.0631 - 0.03696x \} \\ -1 \leq u = \frac{V - 0.005}{0.005} \leq 1 & \quad 0 \leq x \leq 2 \end{aligned}$$

El empleo de estos polinomios (o las tablas de Amster) y el método expuesto por Hicks para el tratamiento de la dependencia espacial del espectro térmico en una celda elemental del reticulado, permite definir las constantes neutrónicas del grupo de difusión termal por:

$$\begin{aligned} D_T &= \left[\sum_j N_j V_j F_j \bar{V}_{f,r,j,T} \right]^{-1} \\ 10) \quad \Sigma_{a,r} &= \sum_j N_j V_j F_j \bar{V}_{a,j,T} \\ \Sigma_{f,r} &= \sum_j N_j V_j F_j \bar{V}_{f,j,T} \\ \beta_T^{235} &= 2.43 \end{aligned}$$

con: $F_j = \frac{\bar{\phi}_j}{\sum_j V_j \phi_j}$

siendo: $\bar{\phi}_j, V_j$: Flujo térmico medio y volumen del medio geométrico donde se encuentra el isótopo "j".

^x-Válidos para la mayoría de los casos estudiados en la sección B.-

///

Las secciones eficaces microscópicas promedias que entran en las fórmulas (10) son calculadas por medio de los polinomios (9) con:

$$X = \left[\sum_j N_j V_j F_j \bar{\sigma}_{aj} \right] / N_H \bar{\sigma}_{aH} V_H F_H$$

j isótopos para los cuales $\bar{\sigma}_a'$ sigue la ley $1/V$

$$Y = \frac{N_{235} F_{235} V_{235}}{N_H F_H V_H}$$

en donde las $\bar{\sigma}_{aj}$ y F_j a su vez fueron determinadas a partir de las secciones eficaces calculadas por (9) pero con X estimado con secciones eficaces maxwellianas.

En la celda elemental de los núcleos típicos que se han examinado, se puede en general distinguir tres medios geométricos diferentes: zona cilíndrica del combustible, zona anular de la vaina del elemento combustible (que eventualmente incluye el espacio de aire entre combustible y vaina) y zona anular del moderador.

En estos casos la relación de flujo medio térmico en el combustible a flujo medio térmico en el moderador ha sido calculada por la fórmula de Ameyal-Benoist⁻¹⁸⁻, que emplea teoría de difusión en el moderador y condición de transporte en la superficie del combustible. Despreciando la absorción de la vaina se tiene:

///

$$\frac{\bar{\phi}_{mT}}{\phi_c} = G + f_0 \sum_{act} \left(1 - \frac{f_0}{f_0'}\right) + \frac{3}{2} \left(r_0 - r_0'\right) \frac{f_0^2}{f_0'} \sum_{act} \sum_{t,mT} + \frac{f_0}{V_m} \frac{\sum_{act} X_1}{\sum_{amT}}$$

$$11) \quad G = 1 + \frac{\sum_{act}}{\sum_{to,cr}} A \left[1 + \alpha \frac{\sum_{scT}}{\sum_{to,cr}} + \beta \left(\frac{\sum_{scT}}{\sum_{to,cr}} \right)^2 \right]$$

$$X_1 = 3 \sum_{to,mT} \sum_{amT} \sqrt{2} \left[\frac{f_0^2}{f_1} + \frac{\sqrt{2} - \sqrt{1}}{f_1} \sum_{amT} \left(\frac{3}{2} \lambda \sum_{to,mT} - 1 \right) \right]$$

$$b = \frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{1}^2 / \sqrt{2}^2}{\sqrt{1}^2 / \sqrt{2}^2 - 1} \ln \frac{f_1}{f_2} - \frac{3}{4} + \frac{f_2^2}{4 f_1} \right]$$

$A, \alpha, \beta, \lambda \sum_{t,mT}$ dadas por tablas y curvas en

la referencia-18-, aproximadas por:

$$A = \frac{V_0 \sum_{to,cr} - V_0 \sum_{to,cr}}{V_0 \sum_{to,cr} + m/2} \quad \begin{matrix} m = 27 & V_0 \sum_{to,cr} \leq 0.2 \\ m = 22.5 & 0.2 \leq \sum_{to,cr} \leq 0.5 \\ m = 2.0 & V_0 \sum_{to,cr} > 0.5 \end{matrix}$$

$$\alpha = 0.06525 (V_0 \sum_{to,cr}) - 0.00175 (V_0 \sum_{to,cr})^2$$

$$\beta = 0.04016 (V_0 \sum_{to,cr}) - 0.01416 (V_0 \sum_{to,cr})^2$$

$$\lambda \sum_{to,mT} = 0.62 e^{-.9917 \cdot V_0 \sum_{to,mT}} + 0.71$$

siendo:

r_0 : radio combustible

r_0' : radio interno de la vaina

r_1 : radio externo de la vaina

r_2 : radio de la celda: d^2/π reticulado cuadrado.

$$= \frac{0.866 \cdot d^2}{\pi} \text{ reticulado hexagonal}$$

d : paso del reticulado

$\sum_{act}$: sección eficaz macroscópica de absorción del combustible.

$\sum_{scT}$: sección eficaz macroscópica de dispersión del combustible.

$\sum_{to,cr}$: sección eficaz macroscópica total del combustible.

$\sum_{amT}$: sección eficaz macroscópica de absorción del moderador.

$\sum_{to,mT}$: sección eficaz macroscópica total del moderador.-

El factor de desventaja de la vaina está
 dado por:

$$12) \quad \frac{\bar{\phi}_v}{\bar{\phi}_c} = \frac{1 + \frac{\phi_m}{\bar{\phi}_c}}{2}$$

El formulismo adoptado para la definición de las constantes neutrónicas de difusión del grupo térmico constituye una primera aproximación del tratamiento de dicho grupo, lo cual se justifica cuando el énfasis se pone en el balance neutrónico (cálculo de k_{efectivo}), y no en el estudio de picos localizados del flujo térmico pues éstos dependen en mayor medida de L^2 (y por tanto del espectro térmico y definición del coeficiente de difusión D_T).

A-4.-: Cálculo del radio crítico, economía de reflectores y distribución de flujo.

El programa "Cilindro"-19- escrito en AUTO-CODE para la computadora Mercury-Ferranti, utilizando el procedimiento de iteración en la laplaciana, resuelve las ecuaciones de difusión para dos grupos de **neutrones** (ecuaciones (1) con $\lambda = 1$) para el caso de un cilindro finito totalmente reflejado y calcula, suponiendo conocida la altura del cilindro, el radio crítico, las economías de los reflectores axiales y radiales respectivamente, y la distribución de flujo rápido y térmico.

En sistemas heterogéneos con reflector de agua liviana, las constantes de difusión para el agua liviana que

///

dan valores consistentes con las economías medidas, son las siguientes:

$$\begin{aligned} D_T &= 0.1435 \text{ cm.} & D_r &= 1.143 \text{ cm} \\ L^2 &= 7.513 \text{ cm}^2 & L_s^2 &= 31.0 \text{ cm}^2 & P &= 0.990 \end{aligned}$$

La laplaciana geométrica para un cilindro es:

$$13) \quad B^2 = \left(\frac{2.405}{R + \delta_r} \right)^2 \left(\frac{\pi}{H + \delta_a} \right)$$

siendo:

R, H: radio y altura geométrica del cilindro respectivamente.

δ_r, δ_a : economía radial y axial respectivamente.

En los sistemas homogéneos se supone la economía constante sobre un gran rango de la relación entre concentración de U-235 y concentración de hidrógeno e igual a: ⁻²⁻

$$\delta_r = 7 \text{ cm} \quad \delta_a = 2 \delta_r$$

Para estos sistemas el radio crítico se determina de (13) con B^2 calculada por (5) y altura del combustible conocida.

La distribución de flujo para sistemas críticos compuestos de varias regiones es calculada por medio del código francés RIFIFI⁻²⁰⁻, escrito en binario para Mercury-Ferranti el cual resuelve las ecuaciones de difusión a dos grupos de neutrones y una dimensión en la geometría cilíndrica y lineal, teniendo en cuenta altura y radios extrapolados respectivamente.

///

B- Correlación experimental:

Un gran número de experimentos críticos y exponenciales con núcleos limpios, moderados y reflejados totalmente por agua liviana, ha sido recopilado y analizado empleando teoría a dos grupos modificada. Estos experimentos incluyen:

- a) Bajo enriquecimiento en U-235, alto enriquecimiento en U-235.
- b) Mezclas homogéneas, reticulados de uranio metálico y óxido de uranio (UO_2).
- c) Vaina de acero (18% Cr, 8% Ni), vaina de aluminio, sin vaina.
- d) Distintas relaciones de volumen de agua a uranio (W/U)^x o, para los casos de mezclas homogéneas, distintas relaciones de números de átomos de hidrógeno a átomos de U-235 (H/X).

El cálculo de las constantes de difusión de finidas en la sección A ha sido programado para la computadora digital Mercury-Ferranti (Anexo 1).

La correlación comprende esencialmente el cálculo de las dimensiones críticas y laplacianas correspondientes, y en los casos en que se dispone de información experimental, ésta se extiende al cómputo de la distribución de flujo térmico y parámetros intensivos del reticulado, tales como -6- :

$$\begin{aligned} f &= \text{Factor de utilización térmica} \\ \bar{\phi}_m / \bar{\phi}_c &= \text{Factor de desventaja} \end{aligned}$$

^x Para el caso óxido de uranio, esta relación se define como cociente entre el volumen de agua y el volumen de uranio metálico de igual masa que el uranio contenido en el óxido.

$$\rho^{238} = \frac{\text{Captura epi-cadmio del U-238}}{\text{Captura sub-cadmio del U-238}}$$

$$\int^{235} = \frac{\text{Fisión epi-cadmio del U-235}}{\text{Fisión sub-cadmio del U-235}}$$

$$\int^{238} = \frac{\text{Fisión rápida del U-238}}{\text{Fisión total del U-235}}$$

Los parámetros ρ^{238} , $\int^{238}$ y $\int^{235}$ son calculados a partir de las secciones eficaces promedias para cuatro grupos de Ombrellaro-Amster, y con una corrección para ρ^{238} y $\int^{235}$ que tiene presente la no coincidencia de la energía de corte del cadmio (supuesta igual a 0.45 ev) con el límite superior del grupo térmico⁻⁷⁻. Adoptando la representación de Westcott⁻²⁸ para el espectro térmico, la corrección para ρ^{238} resulta despreciable, mientras que la correspondiente a $\int^{235}$ puede llegar a representar el 10% del valor sin corregir.

En la tabla II se comparan los valores calculados con los valores medidos de: radio crítico, economía radial y axial del reflector de agua liviana, laplaciana crítica y multiplicación efectiva (calculadas estas dos últimas por las fórmulas (13) y (4) respectivamente), y en la tabla III se presenta la comparación de los parámetros de reticulados correspondientes, para los reticulados estudiados experimentalmente por los grupos Bettis⁻²¹⁻ y Yanques⁻²²⁻, los cuales consisten en uranio metálico y UO₂ (envainado en aluminio y acero) con bajo enriquecimiento y relaciones de W/U que cubren

el rango 1,5 - 5,0. Las constantes de difusión de los grupos rápidos 1,2 y 3, cuando la vaina es de acero, se calculan suponiendo las mismas secciones eficaces microscópicas para el Cr y Ni que las correspondientes a las ajustadas del Fe.

El examen de la tabla II muestra que el empleo de la teoría a dos grupos modificada prevé la condición crítica con errores menores del 2%, y en la mayoría de los casos menores del 1%, determinados por el alejamiento de la unidad de K_{efec} . Estos errores están dentro del orden de los obtenidos con otros métodos^{-1,6-}.

La dispersión del valor calculado de $\bar{\phi}_c/\bar{\phi}_m$ respecto al medido, es menor que el 4%, excepto para el caso de U-metal con radio $r_0 = 0,76$ cm., la cual aumenta cuando W/U disminuye, como es previsible por las limitaciones de la fórmula adoptada⁻¹⁸⁻.

En las figuras 2,3 y 4 el cómputo de ρ^{238}_{18} y ρ^{235} (línea llena) es comparado con los resultados experimentales como así también con los valores que resultan del cálculo con 4 grupos de difusión empleando los códigos MUFT IV - SOFOCATE, y MUFT III - SOFOCATE para reticulados de óxido de uranio⁻⁷⁻ y uranio metálico⁻⁶⁻ respectivamente (línea punteada), mostrando en ese caso, la comparación menores dispersiones. Se trató de disminuir la sobreestimación sistemática que presenta el cálculo de ρ^{238} para el UO_2 (acentuada para cuando éste tiene un enriquecimiento de 2.7% y está envainado en acero) empleando la fórmula de Hellstrand para el cóm-

puto de la integral de resonancia efectiva del U-238, (Ver figura 1), pero se obtuvo así una desviación respecto a la unidad en K_{efec} más grande que la mostrada en la tabla II. Igual tendencia se obtiene si en el primer término de la fórmula (7) que define la sección eficaz de absorción del grupo 3, se omite la sección eficaz de absorción no resonante del U-238 del esquema de Ombrellaro correspondiente al grupo 3, y se agrega en la integral de resonancia efectiva del U-238 la contribución por captura en $1/V$ del U-238^x (aproximadamente 1.1. barn), lo que confirma la importancia de las constantes de difusión del grupo 3 en el balance neutrónico de reticulados a agua liviana y uranio a bajo enriquecimiento.

El otro conjunto de sistemas heterogéneos estudiados, que comprenden reticulados del UO₂ y uranio metal a bajo enriquecimiento, como así también los sistemas homogéneos a alto enriquecimiento, la información experimental disponible consiste en el radio crítico, determinados en algunos casos por extrapolación a crítico. La tabla IV y V indican las características principales y los valores calculados y medidos de radio crítico y laplacianas correspondientes a los casos heterogéneos y homogéneos respectivamente. La laplaciana medida que se presenta en dichas tablas resulta del cálculo

^x La contribución en K_{efec}^{238} por absorción no resonante, evaluada a partir del esquema de Ombrellaro, no es igual a la contribución por captura en $1/V$.

con el radio y altura medidas y economías computadas como se indicó en la sección A-4. Los sistemas homogéneos son computados de igual forma que los heterogéneos (Anexo 1), pero con:

$$\bar{\phi}_v / \bar{\phi}_m = \bar{\phi}_v / \bar{\phi}_c = 1; I_{e/cr.}^{238} = 3.8 \left(\frac{\sum s}{N_{238} U_{238}} \right)^{0.42}; de [29]$$

El examen de las tablas IV y V, muestra que la correlación experimental en el radio crítico es buena (o al menos tan buena como la obtenida por Wehmeyer-Roach⁻²⁻ empleando el modelo a dos grupos modificado), con desviaciones entre laplacianas calculadas^x y medidas que no exceden el 20% y menores del 16% en la mayoría de los casos. El acuerdo para los casos homogéneos de baja relación H/X es excelente, consiguiéndose para ellos dispersiones en la laplaciana que no exceden el 5%.

En algunas de las experiencias críticas analizadas, se dispone también de información sobre la distribución de flujo térmico. Esta viene dada por la activación medida en diferentes puntos del reactor, empleando: 1) Detectores de hojas de uranio de igual enriquecimiento que el combustible⁻⁶⁻, 2) Barras de combustible iguales que las del reticulado⁻²²⁻, 3) Detectores de manganeso bajo Cadmio⁻²⁷⁻. En los dos primeros casos, la comparación con la distribución de flujo térmico calculada en teoría a dos grupos, será válida para zonas asintóticas, donde la distribución de la activación térmica medida no se ve alterada por las fisiones no termale del detector de uranio utilizado.

x La laplaciana, en estos casos, es mayor que la utilizada en el esquema de ajuste de secciones eficaces microscópicas, para el modelo a tres grupos rápidos, por Ombrellaro (Sección A-2).

Empleando el código RIFIFI para geometría cilíndrica se ha computado la distribución de flujo térmico para cuando el núcleo está compuesto de un reticulado interno de H_2O-UO_2 (densidad: 10.53 gr/cm^3 , enriquecimiento: 1.3 % y W/U 4.9) con 91 elementos de combustible, y otro externo de H_2O-U (radio combustible: 0.4915 cm., enriquecimiento: 1.3% y W/U 2.4) con 37 elementos de combustible (figura 5), mientras que en la figura 6 el cálculo se refiere a un reticulado de H_2O-UO_2 (densidad: 10.2 gr/cm^3 , enriquecimiento: 2.7% y W/U 2.2) en donde la fila central de elementos combustibles, perpendicular a la dirección de la distribución de flujo representada, ha sido removida. Las constantes térmicas del canal central de agua se calculan suponiendo un espectro térmico "endurecido" por la absorción del agua, por medio de la tabla de Amster.

Las distribuciones de flujo térmico, computadas con RIFIFI para geometría lineal, correspondientes a un núcleo altamente enriquecido (consignado en último lugar en la tabla V) y al reflector de agua lateral, están representadas en la figuras 7 y 8 respectivamente. La figura 7 muestra la distribución para el núcleo pleno reflejado, mientras que la figura 8 corresponde al mismo núcleo pero con un canal central de 1.1 cm. de agua. Las constantes del agua empleadas para el reflector y canal central, resultan de las secciones eficaces de Ombrellaro-Amster, utilizando para la reducción a dos grupos, una laplaciana de $B^2 = 0.01 \text{ cm}^{-2}$.

///

El exámen cualitativo de las figuras 5,6,7 y 8 dentro de las limitaciones impuestas por el modelo a dos grupos para la interpretación teórica de las medidas experimentales, muestra resultados satisfactorios, salvo en las zonas donde el flujo alcanza un máximo (reflector y canal central), las cuales requieren un tratamiento más riguroso en el cálculo de las constantes de difusión térmica.

La relación entre la actividad medida en dos medios diferentes es mayor que la relación de flujos calculados en ellos (figuras 5, 7 y 8). Una primera explicación se encuentra observando que la constante de proporcionalidad entre actividad térmica medida y flujo térmico correspondiente depende del espectro en forma tal, que en el medio donde hay menos absorción térmica la constante de proporcionalidad es mayor que la correspondiente al medio en el cual el espectro es más "endurecido".

C - CONCLUSION:

Empleando teoría a dos grupos modificados con constantes computadas a partir del esquema a cuatro grupos de Ombrellaro-Amster, el análisis de 53 experiencias muestra las desviaciones siguientes entre laplacianas calculadas y medidas

- 8 casos: desviación entre el 15% y 21%
- 21 casos: desviación entre el 7% y 15%
- 21 casos: desviación menor del 7%

///

Exceptuando entonces los 8 casos indicados primeramente, los cuales corresponden en su mayoría a UO_2 envasado en acero con 3% y 4% de enriquecimiento, (ver anexo 2), la correlación obtenida es razonablemente satisfactoria, Además, de los 53 casos estudiados, el cálculo sobreestima la laplaciana en 47 casos, lo cual puede ser explicado observando que la edad en agua pura calculada a partir de las secciones eficaces microscópicas del esquema de ajuste de Ombrellaro ($L_s^2 = 25 \text{ cm}^2$) es menor que la que muestran los últimos resultados experimentales⁻³⁰⁻, (L_s^2 (hasta 1,4 ev) $\approx 27.3 \text{ cm}^2$).

Las distribuciones de flujo térmico calculadas en el núcleo concuerdan con las activaciones medidas fuera de las interfases entre medios diferentes, por el contrario, el acuerdo es pobre para el flujo máximo calculado en el reflector o canal central de agua.

El cálculo teórico de los parámetros del reticulado, en general no concuerdan satisfactoriamente con los experimentales, según se ve en la tabla III y figuras 2,3 y 4. No obstante, la comparación de esos resultados teóricos con los obtenidos por métodos de cálculo perfeccionados (MUFT-SOFOCATE), muestran una mejor concordancia.

Los estudios en curso, orientados a aumentar la precisión del método de cálculo⁻³¹⁻, permitirán el análisis de conjuntos críticos moderados por agua liviana con dispersiones menores que los encontrados en el presente estudio.

///

AGRADECIMIENTOS:

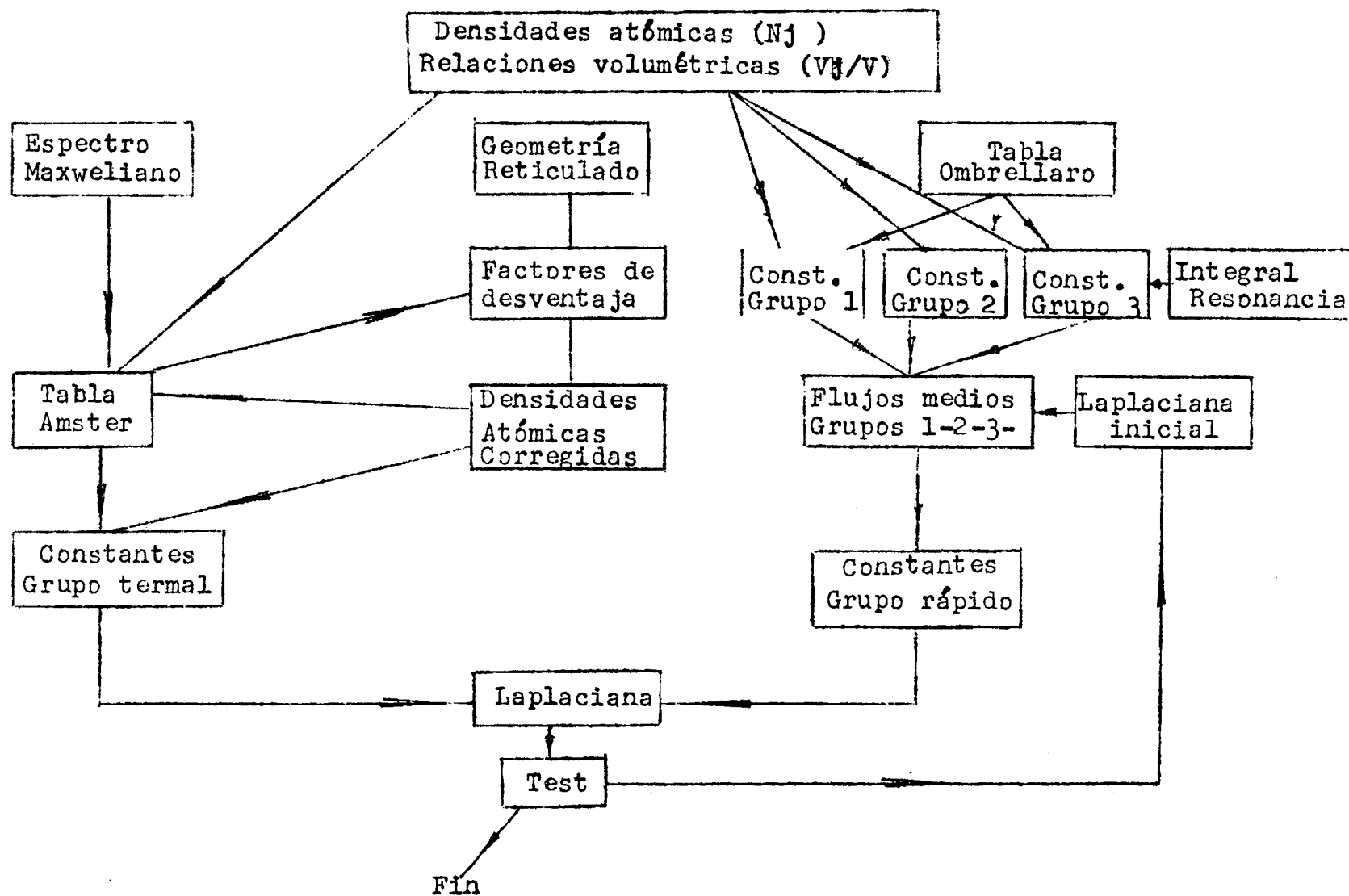
El autor desea agradecer al Instituto del Cálculo de la Universidad Nacional de Buenos Aires, en cuya computadora MERCURY-FERRANTI se realizaron los cálculos: a la srta. M. Calandria y Lic. C. Mattei por las discusiones fructíferas y la colaboración en la computación.-

Junio de 1963.-

-.--0--.-

A N E X O - I -

Diagrama en bloque del programa de constantes para el modelo a dos grupos modificado



Las desviaciones de los valores calculados de la-
placiana, respecto a los medidos, que presentan los reticulados
de H_2O-UO_2 con vaina de acero y enriquecimiento de 3% y 4% res-
pectivamente (tabla IV), pueden ser disminuidos si se adopta
una sección eficaz de absorción microscópica epitermal (grupo
3 en el modelo a tres grupos rápidos) para el acero no nula e
igual a $\sigma_{a_3} = 0.30446$ barn (correspondiente a una integral
de resonancia efectiva del acero de $2.75^{(2)}$) como se indica en
la tabla VI. En la misma tabla se consignan los valores calcu-
lados de K_{efec} , para los reticulados de H_2O-UO_2 con vaina de
acero y 2.7%, 3% y 4% de enriquecimiento en U-235 respectiva-
mente, los cuales muestran que el efecto de la inclusión de la
absorción epitérmica del acero permite estimar la condición crí-
tica con errores menores, en general, del 2%.

Referencias Bibliográficas

- 1 : Deutsch, R.S. and T. (J.N.E.) 1961, Vol.14, 168.
- 2 : Wehmeyer-Roach, R.S. and T. (J.N.E.) 1961. Vol.14, 189.
- 3 : MUFT III, WAPD - TM - 4. 1956.
- 4 : MUFT IV, WAPD - TM - 72, 1957.
- 5 : SOFOCATE, WAPD - TM - 39
- 6 : KOUTS y otros, A/Conf. 15/P/1841. 1958
- 7 : HICKS, AEEW - R/64. 1961.
- 8 : OMBRELLARO, WAPD - TM-63. 1957
- 9 : OMBRELLARO, KAPL - M - PAG. 1 1961
- 10 : AMSTER, WAPD - 185. 1958
- 11 : MOUGEY - SOLANILLA, Rapport S.P.M. Nº 705. 1961 (Saclay, :
- 12 : BELL, N.S.E.5, 139. 1959
- 13 : HARDY, SMITH y KLEIN, N.S.E. 14, 358. 1962.
- 14 : MOORE, PATTENDEN y TATTERSAL, R.S. and T.(J/N/E) Vol.16, 335, 1962.
- 15 : HELLESTRAND-LUNDGREN, N.S. and E. 12, 435. 1962
- 16 : BREGGEON, JOATTON y LEROUGE, S.P.M. Nº 679 (Saclay,Francia)
- 17 : WIGNER, WILKING, AECD - 2275. 1944
- 18 : AMOUYAL-BENOIST. Rapport C.E.A. Nº 571 y rapport S/P/M/305
- 19 : MATTEI y otros, Proyecto R.A.E.P. Libro V. CNEA (Argentina)
- 20 : RIFIFI: Amouyal y otros, Rapport C.E.A. Nº 1398 1960
- 21 : KLEIN y otros, N.S.E. 3, 403 (1958)
- 22 : YANQUEE CRITICAL EXPERIMENTS, YAEC-94 (1959)
- 23 : HARDY, KLEIN y SMITH, N.S.E. 14 366 (1962)
- 24 : MACKINNEY, BALL, Trans.Amer.Nucl.Soc., 3 Nº 1 (1960)
- 25 : LLOYD, SMITH y CLAYTON, Trans.Amer.Nucl.Soc., 2 Nº 1 (1962)
- 26 : BECK y otros, K-242, Part.III (1949); o:ANL 5800 Pag.247 (1958)

- 27 : McFARLAND y VOORHIS, WAPD-169 (1957)
- 28 : WESTCOTT, CRRP-680 (1957)
- 29 : DRESNER, N.S.E. 1, 68 (1956)
- 30 : LOMBARD-BLANCHARD ; N.S.E. 7,448 (1960)
- 31 : Informe"Grupo Neutronico" -1963-

-.--.-.-

Secciones eficaces microscópicas ajustadas para el modelo a tres grupos rápidos.- (barn).-

Hidrógeno (H)

Grupo 1	1.5926	1.4978	.00004
Grupo 2	2.5622	1.1754	.00019
Grupo 3	6.2954	2.2148	.01397

Oxígeno (O)

Grupo 1	1.7268	.2920	.03139
Grupo 2	4.1283	.0521	.00000
Grupo 3	4.1101	.0540	.00029

Zirconio (Zr)

Grupo 1	3.8770	.6465	.05724
Grupo 2	7.7160	.0006	.01353
Grupo 3	6.5222	.0000	.00764

Hierro (Fe)

Grupo 1	2.4181	.5066	.00122
Grupo 2	3.6801	1.4484	.00000
Grupo 3	9.6803	.0632	.00000

Aluminio (Al)

Grupo 1	2.274	.6135	.0033
Grupo 2	4.1420	.6675	.0010
Grupo 3	1.7249	.03426	.0195

Uranio 238 (U-238)

Grupo 1	7.3542	3.0557	.49760	.44705	1.2096	2.71
Grupo 2	9.4440	.0000	.31221	.00000	.0000	.0000
Grupo 3	9.1632	.0000	.32535	.00000	.0000	.0000

Uranio 235 (U-235)

Grupo 1	4.1681	.0627	1.1073	1.3044	3.6395	2.79
Grupo 2	7.2699	.0000	2.4066	1.8911	4.6923	2.48
Grupo 3	20.8293	.0000	35.9504	24.7885	60.9799	2.46

Carbón (C)

Grupo 1	1.7131	.2379	.00010
Grupo 2	3.8666	.1181	.00000
Grupo 3	4.8154	.0740	.00000

T A B L A II. Comparación de parámetros críticos calculados y medidos de sistemas heterogéneos con reflector de agua II/IIAIIA.

	Altura Combustible (cm)	W/U	Radio crítica (cm)		Economía Radial (cm)		Economía Axial (cm)		Laplaciana $\times 10^4$ (cm ⁻²)		K efect.	Referencia
			Calc.	Medido	Calc.	Medido	Calc.	Medido	Calc.	Medido		
UO ₂ $\rho = 10.539 \text{ gr/cm}^3$ $x = 1.311 \%$ $\rho_0 = 0.4665 \text{ cm}$ Vaino AL.	121.92	2.9	38.85	32.12	7.73	7.86 $\pm$.12	14.00	15.27 $\pm$.41	32.19	32.59 $\pm$.15	0.99873	Bettis [21]
	121.92	3.6	35.46	36.37	7.51	7.41 $\pm$.13	14.84	14.69 $\pm$.43	36.60	35.47 $\pm$.18	1.00350	"
	121.92	4.9	35.94	37.62	7.27	7.10 $\pm$.10	14.00	14.52 $\pm$.17	36.32	34.22 $\pm$.13	1.00626	"
UO ₂ $\rho = 7.539 \text{ gr/cm}^3$ $x = 1.31 \%$ $\rho_0 = 0.7635 \text{ cm}$ Vaino AL.	121.92	3.048	39.31	41.26	8.79	8.55 $\pm$.08	16.81	17.82 $\pm$.23	30.13	28.37 $\pm$.06	1.00776	"
	121.92	4.0	36.95	39.71	8.33	8.36 $\pm$.06	16.14	16.72 $\pm$.19	33.39	30.17 $\pm$.06	1.01217	"
	121.92	5.0	39.35	41.44	6.83	7.92 $\pm$.07	15.64	15.96 $\pm$.22	32.33	29.06 $\pm$.07	1.01174	"
UO ₂ $\rho = 7.529 \text{ gr/cm}^3$ $x = 1.381 \%$ $\rho_0 = 0.4930 \text{ cm}$ Vaino AL.	121.92	3.95	44.93	45.70	8.67	8.47 $\pm$.12	16.62	17.06 $\pm$.51	25.27	25.28 $\pm$.10	0.99998	"
	121.92	4.94	44.60	45.70	8.30	8.08 $\pm$.12	16.09	15.37 $\pm$.26	25.85	25.21 $\pm$.10	1.00240	"
UO ₂ $\rho = 10.20 \text{ gr/cm}^3$ $x = 2.7 \%$ $\rho_0 = 0.3810 \text{ cm}$ Vaino acero	121.90	2.19	30.31	32.01	7.81	8.45 $\pm$.15	15.37	13.00 $\pm$.12	45.05	40.70 $\pm$.40	1.01264	Yankee [22]
	121.90	2.9	24.96	26.82	7.55	7.96 $\pm$.3	14.81	13.00 $\pm$.12	60.00	53.20 $\pm$.70	1.01866	"
	121.90	3.8	22.49	24.27	7.35	7.35 $\pm$.14	14.00	13.00 $\pm$.12	70.33	63.30 $\pm$.40	1.01844	"
U-metal $x = 1.3 \%$ $\rho_0 = 0.4915 \text{ cm}$ Vaino AL.	121.92	2.024	28.37	27.24	7.17	7.40 $\pm$.17	14.00	14.07 $\pm$.71	51.10	53.55 $\pm$.48	0.99415	Bettis [21]
	121.92	3.018	25.46	25.85	6.87	7.22 $\pm$.31	14.00	14.23 $\pm$.82	60.67	58.20 $\pm$.100	1.00580	"
U-metal $x = 1.294 \%$ $\rho_0 = 0.7620 \text{ cm}$ Vaino AL.	121.92	1.515	30.42	27.61	7.14		14.00		48.33	53.23 $\pm$	0.93400	"
	121.92	2.017	25.56	25.14	6.86		13.40		60.41	61.86 $\pm$	0.99800	"
	121.92	3.011	24.72	25.60	6.62		12.88		64.33	61.16 $\pm$	1.00780	"
U-metal $x = 1.145 \%$ $\rho_0 = 0.7620 \text{ cm}$ Vaino AL.	121.92	2.017	31.06	29.56	6.89		14.00		45.50	48.86 $\pm$	0.99260	"
	121.92	3.011	30.20	30.60	6.66		13.06		47.98	47.07 $\pm$	1.00270	"

+ determinada a partir del radio experimental y economías calculadas.

ρ : densidad

x : enriquecimiento en U-235 — ρ_0 : radio combustible.

Comparación de parámetros de reticulados regulares medidos y calculados.

	W/U	Integral Resonancia U^{238} (barn)	ρ^{238}		σ^{238}		σ^{235}		$\frac{f_m}{f_c}$		f	
			Cálculo	Medida	Cálculo	Medida	Cálculo	Medida	Cálculo	Medida	Cálculo	Medida
UO ₂ $\rho = 10.53 \text{ gr/cm}^3$ $x = 1.311\%$ $\rho_0 = 0.48250 \text{ cm}$ Vaina AL.	2.9	18.09	1.50	$1.43 \pm .07$	0.072	$0.073 \pm .004$	0.085	$0.089 \pm .004$	1.09	$1.10 \pm .01$	0.871	$0.874 \pm .004$
	3.6	18.57	1.24	$1.15 \pm .07$	0.062	$0.070 \pm .004$	0.069	$0.072 \pm .007$	1.10	$1.13 \pm .01$	0.847	$0.848 \pm .004$
	4.9	19.15	0.970	$0.939 \pm .07$	0.050	$0.057 \pm .003$	0.053	$0.055 \pm .007$	1.11	$1.13 \pm .01$	0.808	$0.809 \pm .004$
UO ₂ $\rho = 7.53 \text{ gr/cm}^3$ $x = 1.311\%$ $\rho_0 = 0.7235 \text{ cm}$ Vaina AL.	3.048	16.70	1.33	$1.19 \pm .04$	0.070	$0.071 \pm .001$	0.080	$0.073 \pm .004$	1.10	$1.09 \pm .03$	0.868	$0.873 \pm .004$
	4.0	17.31	1.06	$0.994 \pm .01$	0.057	$0.059 \pm .001$	0.063	$0.073 \pm .006$	1.11	$1.14 \pm .03$	0.836	$0.837 \pm .005$
	5.0	17.77	0.890	$0.807 \pm .014$	0.049	$0.051 \pm .004$	0.051	$0.068 \pm .006$	1.12	$1.16 \pm .03$	0.804	$0.805 \pm .005$
UO ₂ $\rho = 7.529 \text{ gr/cm}^3$ $x = 1.311\%$ $\rho_0 = 0.47300 \text{ cm}$ Vaina AL.	3.75	20.39	1.23	$1.04 \pm .05$	0.058	$0.063 \pm .003$	0.064	$0.074 \pm .002$	1.06	$1.10 \pm .01$	0.836	$0.836 \pm .004$
	4.7	20.99	1.03	$0.901 \pm .07$	0.049	$0.054 \pm .003$	0.052	$0.059 \pm .006$	1.07	$1.10 \pm .01$	0.807	$0.807 \pm .004$
UO ₂ $\rho = 10.20 \text{ gr/cm}^3$ $x = 2.7\%$ $\rho_0 = 0.38100 \text{ cm}$ Vaina acero	2.19	18.70	4.00	$2.77 \pm .08$	0.083		0.083		1.104	$1.10 \pm .02$	0.8293	
	2.9	19.67	3.00	$2.22 \pm .05$	0.067	$0.072 \pm .002$	0.166	$0.150 \pm .01$	1.114		0.8162	
	3.8	20.35	2.37	$1.83 \pm .12$	0.055	$0.061 \pm .005$	0.125		1.126	$1.127 \pm .01$	0.8003	
U-metal $x = 1.294\%$ $\rho_0 = 0.4915 \text{ cm}$ Vaina AL.	2.024	13.42	1.66	$1.57 \pm .03$	0.099	$0.099 \pm .075$	1.20	$0.150 \pm .01$	1.20	$1.27 \pm .04$	0.901	$0.904 \pm .003$
	2.4	13.67	1.42	$1.37 \pm .03$	0.083	$0.103 \pm .005$	0.100	$0.104 \pm .004$	1.21	$1.24 \pm .02$	0.885	$0.889 \pm .003$
	3.018	13.93	1.14	$1.066 \pm .012$	0.075	$0.078 \pm .012$	0.081	$0.099 \pm .010$	1.23	$1.31 \pm .04$	0.860	$0.857 \pm .004$
U-metal $x = 1.294\%$ $\rho_0 = 0.7620 \text{ cm}$ Vaina AL.	1.515	11.59	2.00	$1.20 \pm .18$	0.121		0.161		1.29	$1.31 \pm .04$	0.9196	$0.918 \pm .004$
	2.017	11.86	1.52	$1.24 \pm .12$	0.100		0.120		1.33	$1.45 \pm .04$	0.895	$0.890 \pm .004$
	3.007	12.15	1.05	$0.89 \pm .09$	0.075		0.081		1.42	$1.49 \pm .04$	0.846	$0.842 \pm .003$
U-metal $x = 1.145\%$ $\rho_0 = 0.7620 \text{ cm}$ Vaina AL.	2.017	11.86	1.45	$1.20 \pm .03$	0.102	$0.104 \pm .015$	0.109		1.30	$1.45 \pm .04$	0.868	$0.831 \pm .004$
	3.011	12.15	0.970	$0.93 \pm .04$	0.077	$0.081 \pm .012$	0.076		1.38	$1.45 \pm .04$	0.837	$0.835 \pm .005$

± última medida, mencionada en referencia [23]

TABLA - IV -

Comparación del radio crítico calculado y medido de sistemas heterogéneos
con reflector de agua liviana.

	W/U	Altura Combust. (cm)	Radio Crítico (cm)		Laplaciana (cm ⁻²)		Referencias	
			Calc.	Medid.	Calc.	Medid.		
	2.6	168.9	18.81	21.70	0.00841	0.00690	(24)	
	3.5	168.9	16.93	19.30	0.00993	0.00830	"	
	8.0	168.9	16.30	18.60	0.01095	0.00928	"	
	10.1	168.9	17.87	19.80	0.00974	0.00918	"	
	2.6	168.9	23.63	26.70	0.00613	0.00508	"	
	3.5	168.9	20.80	23.80	0.00744	0.00600	"	
	8.0	168.9	20.79	24.20	0.00776	0.00690	"	
	1.89	40.6	15.65	16.90	0.01545	0.01420	(25)	
	1.89	61.0	14.17	15.50	0.01545	0.01385	"	
	2.29	40.6	15.37	17.00	0.01587	0.01420	"	
	2.72	40.6	15.57	17.40	0.01574	0.01393	"	
	2.72	61	14.13	15.90	0.01574	0.01361	"	
	3.17	40.6	16.13	18.10	0.01519	0.01338	"	
	3.89	40.6	17.61	20.20	0.01382	0.01190	"	
	3.89	61	15.80	18.10	0.01382	0.01166	"	
	3.41	40.6	14.65	15.80	0.01640	0.01511	"	
	5.00	40.6	15.04	16.10	0.01605	0.0149	"	
	6.84	40.6	16.48	17.60	0.01457	0.01357	"	
	8.92	40.6	18.86	20.30	0.01270	0.01165	"	

TABLA - V -

Comparación del radio crítico calculado y medido de sistemas homogéneos con reflector de agua liviana

	H/X	Altura Combust. (cm)	Radio crítico (cm)		Laplaciana (cm ⁻²)		Referencias	
			Cále.	Medid.	Calc.	Medid.		
Mezcla Homogénea de UO ₂ F ₂ -H ₂ O x = 93,4%	999	44,30	17.57	19.05	.0125	0.0114	(26)	
	755	27.10	16.54	19.05	.0163	0.0144	"	
	499	16.90	15.86	19.05	.0214	0.0189	"	
	499	35.20	11.26	12.70	.0214	0.0190	"	
	221	11.30	15.10	19.05	.0273	0.0239	"	
	119	52.60	8.02	8.26	.0279	0.0269	"	
	58.8	71.80	7.46	7.62	.0290	0.0285	"	
	58.8	20.50	9.71	10.16	.0290	0.0278	"	
	56.7	8.50	18.72	19.05	.0282	0.0280	"	
	56.7	40.40	8.24	8.26	.0282	0.0280	"	
	52.9	7.90	19.54	19.05	.0288	0.0291	"	
	52.9	13.40	12.21	12.70	.0288	0.0281	"	
	52.9	19.50	10.00	10.16	.0288	0.0284	"	
	52.9	39.20	8.13	8.26	.0288	0.0282	"	
	52.9	70.90	7.52	7.62	.0288	0.0285	"	
Mezcla homo- génea de U ₃ O ₈ -C-Zr- H ₂ O x = 90%	196	102,23	14,5	14,34	0.0131	0.0134	(27)	

Geometría "slab": 15,24 cm x 78,74 cm con radio cilindros equivalente calculado de la igualdad:

TABLA - VI

Efecto de la inclusión de la absorción epitérmica del acero

	$B^2 \times 10^4 \text{ (cm}^{-2}\text{)}$			$K_{\text{efec.}}$	
	Cálculo		Medido		
	$\sigma_{\text{acero}} = 0$	$\sigma_{\text{acero}}^* = 0,30446$		$\sigma_{\text{acero}}^* = 0$	$\sigma_{\text{acero}}^* = 0,30446$
$\rho = 10.20 \text{ gr/cm}^3$ $x = 2.7\%$ $r_0 = 0.3810 \text{ cm}$	45,05 60.00 70.33	33.08 50.21 62.27	40.70 $\pm$.40 53.20 $\pm$.70 63.30 $\pm$.40	1.0126 1.0186 1,0184	0.97810 0.99190 0.99730
$\rho = 8.45 \text{ gr/cm}^3$ $x = 4.05 \%$ $r_0 = 0.5640 \text{ cm.}$	84.10 99.30 109.50 97.40	73.12 90.36 104.80 93.92	69.00 83.00 92.80 91.80	1.0318 1.0362 1.0407 1.0135	1.01080 1.01260 1.02930 1.00500
$\rho = 9.45 \text{ gr/cm}^3$ $x = 3.05 \%$ $r_0 = 0.5640 \text{ cm.}$	61.30 74.40 77.60	58.83 65.60 73.08	50.80 60.00 69.00	1.0313 1.0402 1.0225	0.99930 1.01550 1.0109

* Suponiendo iguales secciones eficaces microscópicas rápidas para el Cr y Ni que las correspondientes a las ajustadas por Ombrellaro para el Fe.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Comparación de los valores calculados y experimentales de la integral de resonancia efectiva del U-238
- Figura 2: ρ^{238} versus W/U.-
- Figura 3: Σ^{235} versus W/U.-
- Figura 4: Σ^{238} versus W/U.-
- Figura 5: Distribución de flujo térmico en un reticulado a dos regiones..
- Figura 6: Distribución de flujo térmico con canal central de agua.
- Figura 7: Distribución de flujo térmico
- Figura 8: Distribución de flujo térmico con canal central de agua..

