

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 1	AÑO 1968

08-68.01

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
GERENCIA DE ENERGIA

VALIDEZ DEL ESQUEMA "PROCON" EN
CALCULOS DE REACTORES CON MODE-
RADOR AGUA LIVIANA O PESADA.

Roberto Solanilla

CNEA-Re-31

Diciembre 1968

DEPARTAMENTO DE REACTORES

VALIDEZ DEL ESQUEMA "PROCON" EN
CALCULOS DE REACTORES CON MODE-
RADOR AGUA LIVIANA O PESADA.

Roberto Solanilla

CNEA-Re-31

Diciembre 1968

VALIDITY OF "PROCON SCHEME" IN HEAVY AND LIGHT
WATER REACTOR CALCULATIONS.

Abstract:

The interpretation of 250 critical experiments and analysis methods are described. The simplified formulations involve multiple collision probabilities for the lattice parameters treatment. They correspond to a modified two-group theory generated by a condensation of a standard diffusion four-group. That condensation uses nuclear data, and cross sections adjusted from the methods of diffusion and transport multigroup.

A good agreement between experimental and calculated values is obtained, as we have:

- 1) The calculated k effective differs from 1 in less than 500 p. c. m.. The standard deviation is, in most of the cases, less than ²0.5%, and remains in all the others less than 1.
- 2) Lattice parameters were compared with their experimental value or with values obtained, through other methods. They showed very good agreement (differences are not greater than 3%).

The PROCON scheme has three different versions. The last one, written for BULL G.E. 625 has some features useful in design problems for heavy water pressure reactors.

VALIDEZ DEL ESQUEMA PROCON EN CALCULOS DE
REACTORES CON MODERADOR AGUA LIVIANA O
PESADA

RESUMEN

El empleo de la teoría a dos grupos de difusión, con el grupo rápido creado por condensación de las ecuaciones correspondientes al modelo "standard" a tres grupos rápidos y secciones eficaces correspondientes ajustadas a partir de los resultados del método a multigrupos de difusión y datos nucleares, y el térmico (0ev-0.625ev), con secciones eficaces promedias ^{que} incluyen efectos de termalización y corrimiento espectral por absorción, conjuntamente con el uso de tratamientos simples para evaluar las correcciones por heterogeneidad en las fisiones rápidas y capturas resonantes de ²U-238, espectro de neutrones térmicos y coeficiente de difusión en la celda cilíndrica equivalente, ha permitido construir un método de cálculo sintético para el análisis de reactores moderados con agua liviana, el cual conserva las ventajas de los métodos de diseño con formulismo a multigrupos y permite, al mismo tiempo, cálculos rápidos y accesibles, en el caso extremo, a máquinas de calcular tipo "escritorio".

Este artículo comprende también la generalización del método a reactores con moderador agua pesada y fraccionamiento de combustible (reticulados contubos), incluyendo, en particular, un tratamiento espacial del flujo de neutrones para los cuatro grupos de base por medio de técnicas de probabilidades de colisión múltiples y el estudio, desde un punto de vista global, de la validez del método ("esquema PROCON") (el cual presenta algunos rasgos comunes con el desarrollado en Winfrith por el Dr. Hicks) por medio del análisis de experiencias críticas o exponencias^{2a} con moderador líquido basado en el cómputo de la multiplicación efectiva a partir de la laplaciana observada, de un vasto conjunto de experimentos los cuales incluyen los correspondientes a reticulados tipo tubo a presión, moderador y refrigerante agua pesada, reticulados regulares tipo recipiente a presión (agua liviana y pesada) y el núcleo del reactor Argentino de experimentación RA-3 (en este caso se computa la constante de decaimiento de la densidad de neutrones para cuando el sistema, subcrítico, es excitado con una fuente pulsada). Además se analizan experiencias con combustible enriquecido con Plutonio (reticulados regulares con barras plenas) y se comparan las características, de funcionamiento calculados con las suministradas por técnicas experimentales del reactor de potencia YANKEE.

VALIDEZ DEL ESQUEMA PROCON EN CALCULO DE REACTORES CON MODERADOR AGUA LIVIANA O PESADA

Introducción

Las investigaciones en otros países muestran esencialmente dos tipos de aproximaciones para el cálculo neutrónico de reactores con moderador líquido (agua pesada o liviana):

- Esquemas de correlación basados en teorías simples (teoría a dos grupos y formula de los cuatro factores), con o sin parámetros de ajuste obtenidos a partir de la comparación con resultados experimentales "integrales" (Desarrollado y utilizado intensivamente en los reactores moderados con agua pesada)¹⁻³
- Métodos de diseños basados en teorías más exactas (derivadas en general a partir de la ecuación de transporte y formulación en multigrupos del espectro en energía) y datos nucleares fundamentales (Desarrollo en U.S.A. para los reactores moderados en agua liviana)⁴⁻⁶

A partir de los datos nucleares fundamentales y códigos multigrupos es posible por procedimientos de condensación y ajuste generar una teoría a dos grupos de difusión, la cual

conservando las ventajas del formulismo a multigrupos evita el empleo de dichos códigos y permite, además, disponer de un esquema de cálculo simple, rápido y accesible a computadoras pequeñas, cualidades todas estas de gran importancia en problemas de cálculo preliminar de diseño u optimización de reactores de potencia.

Este procedimiento para generar constantes neutrónicas es denominado "esquema PROCON" pues los programas fueron llamados PROCON I (barras plenas) PROCON II (con inclusión del cálculo del BURNUP) y PROCON III (combustible fraccionado).

La descripción del método propuesto, el cual conserva las características fundamentales del desarrollado por el Dr. Hicks en Winfrith⁷⁻¹⁰, y la aplicación a diferentes tipos de reticulados y condiciones de funcionamiento, es el objetivo de la primera parte de este trabajo, mientras que en la segunda se analiza un vasto conjunto de experimentos los cuales incluyen reactores (potencia cero) con reticulados tipo recipiente y tubo a presión, núcleo del reactor Argentino de investigación RA-3, como así también las características de funcionamiento del núcleo del reactor de potencia YANKEE.

A) METODO DE CALCULO

A-1) Reticulados regulares tipo recipiente a presión

Llamando ν número de neutrones producido por fisión, Σ_f , $\emptyset$ sección eficaz macroscópica de fisión y flujo correspondientes a la celda, la multiplicación efectiva viene dada, para una división en cuatro grupos del espectro en energía, por:

$$\lambda = \sum_{i=1}^4 (\nu \Sigma)_i \emptyset_i$$

Si ϕ es solución de la ecuación de difusión correspondiente al esquema a pocos grupos con $\nabla^2 \phi = -k \phi$, la expresión de k queda reducida a :

$$k = \frac{(\eta f) - \rho}{(L^2 + L_T^2 + L_R^2) + \frac{(\eta f) - \rho}{k}} + \frac{(\eta f) - \rho}{L^2 + L_T^2 + L_R^2}$$

Siendo (ηf) número de neutrones de fisión producidos por absorción en la celda, ρ : fracción de neutrones no absorbidos durante el proceso de moderación, L^2 , L_T^2 , L_R^2 área de moderación y difusión e índices T y R indican grupos térmicos y rápidos respectivamente.

En la búsqueda de los siete parámetros que entran en (1), es usual el empleo de los códigos MUTF IV¹¹ y SOFOCATE¹² los cuales proveen secciones eficaces macroscópicas de absorción, fisión, transferencia y coeficientes de los grupos rápidos y térmicos para el medio homogéneo equivalente. Los efectos de heterogeneidad del grupo térmico son introducidos corrigiendo las densidades atómicas con factores de desventaja y para el grupo resonante o grupo 3 por medio del factor de blindaje "L".

Sin embargo, el uso de las tablas compiladas de Amster¹³ de secciones eficaces térmicas obtenidas de SOFOCATE y la biblioteca de secciones eficaces efectivas para el modelo a tres grupos rápidos generados por procedimiento de ajuste con resultados de MUTF IV para UO₂-H₂O^{*} por Hicks¹⁴, permiten obviar el empleo de dichos códigos y construir así un esquema de cálculo condensado y simple sin perder necesariamente las cualidades del esquema MUTF-SOFOCATE. Este método, básicamente desarrollado por el Dr. Hicks para reticulados regulares tipo recipiente a presión, admite sin embargo mejoras, las cuales

* Con un tratamiento mejorado para el Deuterio y adaptado a MUTF, Hicks¹⁴ ha mostrado que las secciones eficaces efectivas ajustadas para H₂O permiten cálculos correctos para moderador D₂O.

han sido incorporadas en nuestros cálculos y que se han de enumerar a continuación.

a) Heterogeneidad en las fisiones rápidas.

Las fisiones rápidas del Uranio 238 en el grupo 1 presentan un efecto de heterogeneidad, tanto ^{mas} grande cuanto mayor es el radio de barra, que puede ser fácilmente evaluado a partir de la teoría monocinética aplicada al grupo 1 y probabilidades de colisión en un reticulado regular compuesto de dos zonas. (combustible (u) moderador (m)) Suponiendo generación uniforme e isotrópica en el combustible para las colisiones sucesivas y adoptando el formulismo de Sauer¹⁵ para evaluar las probabilidades en reticulado, tendremos: $\bar{\nu}_{23}^{23} = \bar{\nu}_{23}^{23} \times L_1(B^2)$ siendo $\bar{\nu}_{23}^{23}$ el factor de fisión rápido correspondiente a un block de dimensiones infinitas, L_1 el término de no fuga del grupo y J' un parámetro de equivalencia definido por:

$$J' = \frac{l_u}{(\Sigma_{2u}^1 + \Sigma_{2u}^2 - \lambda_1 \bar{\nu}_{23}^{23} \Sigma_f^1)^{-1} + l_u}$$

con l_u cuerda media modificada e igual a

$$l_u = r_u (G + H_m) + \frac{r_u \lambda_m^{(1)}}{V_m}$$

siendo:

λ_1 : fracción de neutrones vírgenes de fisión en el grupo (0.752).

$\bar{\nu}_{23}^{23}$: número de neutrones producidos por fisión en el U-238.

r_u : cuerda media en el combustible e igual al diámetro en geometría cilíndrica.

H_m : función de Sauer referida a la transmisión en el moderador y computada con el método de Sauer¹⁶.

ζ : factor geométrico que permite mejorar la aproximación racional, tomado igual a 2/3 (geometría cilíndrica) para radios pequeños. Para radios grandes viene evaluado por el método de Bonalumi¹⁷.

λ_m : libre camino medio del moderador correspondiente al grupo l .

V_m/V_v : relación entre volúmenes del moderador al del combustible.

$\Sigma_{av}^{-1}, \Sigma_{tv}^{-1}, \Sigma_f^{-28}$: secciones eficaces macroscópicas de absorción, transferencia y fisión del combustible correspondiente al grupo.

b) Absorción resonante y transferencia del grupo epitermal para combustible U metal.

El blindaje en la captura y fisión resonante encontrado en la región epitermal o grupo 3, es evaluado utilizando el principio de equivalencia en la absorción resonante de Dressner¹⁴ y el método Sauer-Levine¹³ para la reducción de superficie de pasaje en reticulado. Así, por ejemplo, la sección eficaz de absorción de un isótopo "j" viene dada por

$$\Sigma_{aj}^{(3)} = \left[A_j + B_j \left(\frac{\sigma_p^*}{\sigma_p^* + C_j} \right)^{1/2} \right] G_j(P_3)$$

con A_j, B_j, C_j ; coeficientes ajustados por comparación con resultados experimentales de integral de resonancia efectiva o calculados a partir de la biblioteca de datos nucleares del MUFT. $G_j(P_3)$ función de interacción introducida por Hicks^{8,14} para mejorar^{el} acuerdo con mezclas con más de un isótopo resonante, función de la probabilidad de escape del grupo (P_3) y σ_p^* sección eficaz que permite establecer equivalencia entre medios homogéneos, heterogéneos y con distintos diluentes, dada por (notación

usual)

$$\sigma_{fj}^* = \sigma_{fj} + \frac{\Sigma_m}{N_j} + \frac{(S_{a/c}/S)}{N_j r_a}$$

$$S_{a/c}/S = 1.27 \frac{1-c}{1+c/c}$$

Para isótopos con alta concentración, por ejemplo U-238 con U natural o levemente enriquecido, la fórmula utilizada es la misma que surge de la correlación experimental de integral de resonancia efectiva, es decir una ley del tipo $a+b$ (Sefect. $/M)^{1/2}$, con a y b ajustadas a partir de los valores de Hellestrand para U metal y UO₂, con inclusión de la captura en $1/v$. Para el cálculo de la sección de transferencia del grupo epitermal se sigue la prescripción de Hicks^{3.14}

$$\Sigma_t^{(3)} = H(p_3) \Sigma_t^{(13)}$$

siendo $\Sigma_t^{(13)}$ la sección eficaz de transferencia para medio sin absorción epitermal, obtenida de la biblioteca de secciones eficaces efectivas de transferencia y $H(p_3)$ un polinomio función de p_3 ajustado para combustible UO₂ por Hicks con resultados del MUTF IV que expresa la distorsión del espectro $1/E$ por capturas resonantes. Para combustible U metal se ha modificado el polinomio $H(p_3)$ por $H'(p_3)$ definido por

$$H'(p_3) = \frac{1 + 0.4644 (1-p_3)/p_3}{1 + 0.325 (1-p_3)/p_3} \cdot H(p_3)$$

Para p_3 grande $H'(p_3)$ es igual a $(1 + 0.325 \frac{1-p_3}{p_3})^{-1}$. La introducción de $a=0.325$ permite buenos acuerdos experimentales.

c) Cálculo del grupo térmico

La utilización del código THERMOS²¹ (modelo Nelkin para la ley "scattering" del H₂O, ecuación de transporte integral, isotropía en la dispersión, multigrupos en el grupo térmico), ha permitido a Honeck ajustar un formulismo para el cál-

culo de secciones eficaces promedios para un grupo térmico²² que tiene en cuenta las características de termalización del moderador (segundo momento de la sección eficaz de transferencia del dispersante: M_2) y heterogeneidad del espectro de neutrones (velocidad media en el combustible $\bar{v}_u$ diferente a la del moderador $\bar{v}_m$) para reticulados con moderador H₂O y combustible con ley de absorción no muy diferente de la $1/v$, y sin diluentes livianos. Definiendo un parámetro θ (habilidad del moderador) por:

$$\theta = \frac{\sum_K \bar{\Sigma}_{aK} \phi_K V_K}{\sum_K M_{2K} \phi_K V_K}$$

siendo $\bar{\Sigma}_{aK}, V_K, \phi_K, M_{2K}$ sección eficaz macroscópica térmica de absorción, volúmen, flujo medio y segundo momento de la región k ($K=u$ combustible, $k=v$ vaina, $k=m$ moderador), se calcula la velocidad media del moderador, vaina y combustible, por:

$$\begin{aligned}\bar{v}_m &= 1.128 (1 + b\theta)^{1/2} \\ \bar{v}_u &= \bar{v}_m + 0.366 \bar{\Sigma}_a(\sigma_0) \bar{v}_u / 2 \\ \bar{v}_v &= (\bar{v}_u + \bar{v}_m) / 2\end{aligned}$$

siendo $b=8.1$ un parámetro de ajuste, $\bar{\Sigma}_a(\sigma_0)$ sección eficaz de absorción de combustible para $v=2200\text{m/s}$. La utilización del modelo Nelkin ($M_2=3.34$) permite calcular espectros más "endurecidos" que con el modelo de gas libre monoatómico ($M_2=3.85$), y así acercarse al espectro real en H₂O ($M_2=3.07$). Las secciones eficaces del grupo térmico vienen dadas por:

$$\text{ley } 1/v \quad \bar{\sigma} = \sigma_0 / \bar{v}$$

$$\text{ley distinta de } 1/v \quad \bar{\sigma} = \sigma_0 g(\bar{v}) / \bar{v}$$

Honeck ajusta las funciones $g(v)$ para U-235 y la sección eficaz de transporte del Hidrógeno ligado a la molécula de H₂O con errores menores del ~~1.21~~ 2%.

Suponiendo espectro maxwelliano y adoptando la fórmula

de Amouyal-Benoist²³ para los factores de desventaja, se empieza calculando un primer valor de $\theta^{(0)}$ el cual permite mejorar el cómputo de las secciones eficaces térmicas y por tanto definir un nuevo $\theta^{(1)}$. La iteración se continúa hasta que $\theta^{(i)} - \theta^{(i-1)}$ sea menor que una cantidad establecida.

Este formulismo presenta una gran simplicidad sin pérdida de exactitud como fue demostrado por Honeck. La extensión a otro moderador no presenta dificultad si se supone que la relación entre el cuadrado de la velocidad media y θ se conserva (Honeck demuestra para moderador H₂O la independencia de b con el modelo del dispersante). Esta hipótesis fue introducida para nuestros cálculos con agua pesada definiendo el segundo momento a partir de la relación entre M_2 para D₂O y H₂O que surge de la fórmula de gas monoatómico libre (0.146). La tendencia a subestimar $\overline{N_m}$ que tendría el cálculo así efectuado viene compensado por la de sentido contrario que presenta la fórmula de $\overline{N_u} \cdot \overline{N_m}$ para radios de barra grande (reticulado con agua pesada), como lo muestra los resultados del código SPECTROX III modificado. En efecto, utilizando el código SPECTROX III²⁴, pero modificando el tratamiento en el moderador por la introducción de la condición de contorno efectiva (método de Amouyal-Benoist²³) e igualando la función de Horowitz (f) del modelo primario usado en SPECTROX por la inversa de la función G_0 definida por Caldiha²⁵ (con la introducción de G_0 y si la ley de captura es $1/v$ el modelo primario o gas generalizado coincide con el secundario²⁶) y calculada por Soule²⁷ para D₂O utilizando el modelo de Butler, resulta: $M_2 = 0.362 \text{ cm}^{-1}$ mientras que el supuesto es $0.146 \times 3.34 = 0.488 \text{ cm}^{-1}$. Además la corrección calculada con SPECTROX III modificado, da para el rango

0.8-2.2 cm de radio de barra un coeficiente (0.270) disminuido en 26% respecto al de Honeck²², mientras que para radios menores que 0.8 cm y relación de volúmenes menores que 2 SPECTROX III-modificado reproduce el valor 0.366 de Honeck (SPECTROX III-modificado muestra una dependencia con la relación volumétrica mayor que la consignada por Honeck).

b) Calculo del coeficiente de difusión en la celda

El cálculo del coeficiente de difusión de la celda exige adoptar un criterio de ponderación en cada zona geométrica; para medios de dimensiones grandes frente al libre camino medio (l.c.m.) lo que aparece mas acertado es promediar los l.c.m. de transporte; para el caso extremo el promedio con la sección eficaz de transporte es lo correcto. La teoría de BENOIST²⁸, desarrollado para el calculo de la anisotropía en la migración de neutrones por efecto de canales de aire, permite fijar un criterio de ponderación para situaciones intermedias a la citadas. Despreciando la correlación angular y adoptando la combinación aproximación racional-Bell²⁹ ^{para el} ~~computo~~ de las probabilidades de colisión, con el coeficiente de difusión de la celda para el grupo "1" y dos zonas (zona 1: combustible y vaina, zona 2: moderador) viene dada por

$$\frac{SD^1}{\lambda_2^1} = 1 + \frac{\psi_2^1}{\psi^1} \frac{V_2}{V} \left(1 - \frac{\lambda_2^1}{\lambda_1^1}\right) - P_{11} \frac{V_1}{V} \frac{\psi_2^1}{\psi^1} \left(1 - \frac{\lambda_1^1}{\lambda_2^1}\right) \left(\frac{\psi_1^1}{\psi_2^1} - \frac{\lambda_2^1}{\lambda_1^1}\right)$$

siendo

$$P_{11} = \frac{Q \bar{r}_1 / \lambda_1^{(1)} + V_1 \lambda_2^1 / (V_2 \lambda_1^{(1)})}{1 + Q \bar{r}_1 / \lambda_1^{(1)} + V_1 \lambda_2^1 / (V_2 \lambda_1^{(1)})}$$

ψ_k : flujo medio en la zona "k"

ψ : flujo medio de la celda

λ : l.c.m. de transporte $\approx 1/\Sigma$

$\bar{\tau}$: cuerda media de la región "k"

Los criterios extremos mencionados más arriba son casos límites de la fórmula recién citada. Para situaciones intermedias el coeficiente de difusión está comprendido entre el obtenido con la aproximación de difusión y el correspondiente a la ponderación con sección eficaz de transporte. La mayor diferencia se obtiene para $\lambda \gg \lambda_0$ o viceversa.

c) Heterogeneidad del espectro de moderación en redes con D2O a gran paso

Ya la teoría de la edad para el caso de una fuente puntual en ^{un} medio de extensión infinita muestra que el flujo por unidad de letargia es una función creciente con la letargia para luego, a partir de la zona de los Key, decrecer. Este alejamiento de la ley $1/E$ del espectro de moderación por heterogeneidad lo encontraremos en reticulados en donde el paso o distancia entre "fuentes de neutrones rápidos" es grande. Este efecto repercute fundamentalmente en el incremento de la absorción resonante con la dimensión transversal de la celda a igualdad de S/M del combustible. Una manera simple de computar este efecto, es utilizando los resultados del método de Monte Carlo en D₂O, aplicado al problema de la moderación en una celda de dimensiones variables y con una ley de captura efectiva del U-238 en función de la energía para la región central conocida por el cálculo ^{31,32}. Los resultados mencionados dan, en función del área transversal del moderador y distintas relaciones S/M del combustible U natural, la relación entre el flujo superficie y flujo medio del moderador (ambos por unidad de letargia) en función de la letargia.

* Según ¹²⁵ ha sido observado que en situaciones prácticas es correcto emplear secciones eficaces de transporte $\Sigma = \Sigma_a + \Sigma_s(1-\mu)$ en la teoría con isotropía en la dispersión, para tener presente la anisotropía en la sección eficaz de dispersión + reflexión.

Este factor de desventaja presenta un máximo en la región de los Kev y es insensible con la relación S/M (como era de esperar, pues la dependencia con el efecto de blindaje de la absorción resonante esta concentrada en energía mucho más chicas (grupo epitermal)) y muestra una gran dependencia con el paso. Las secciones eficaces efectivas de absorción del U-238 del grupo 2 (0.821 Mev a 5.5 Kev) y 3 (5.5 Kev a 0.625 ev) se calcula ahora pesando e integrando en los límites de energía de cada grupo con los factores de desventaja del combustible, computados como se indicó anteriormente. Las expresiones que se obtienen, (lineales con V_m) son las siguientes (para $V_m > 200 \text{ cm}^2$).

$$(\sigma_{a \text{ U-238}}^{(3)})_{\text{corregida}} = \sigma_{a \text{ U-238}}^{(3)} [1.037 + 0.00223(V_m - 200)]$$

$$(\sigma_{a \text{ U-238}}^{(2)})_{\text{corregida}} = \sigma_{a \text{ U-238}}^{(2)} [1.000 + 0.00428(V_m - 200)]$$

Estas fórmulas se emplean en el análisis de reticulados regulares con moderador agua pesada y combustible a base de barras "plenas". Cuando hay fraccionamiento del combustible (reticulados con tubos) las características geometricas y físicas de estos reticulados se diferencian de las correspondientes a la configuración que sirvió de base para el estudio señalada más arriba. En esos casos, la forma de tener en cuenta el relevamiento del flujo resonante, como así también la depresión del flujo dentro del tubo (no incluido en las fórmulas de arriba) es diferente y está descripto en la sección denominada "Reticulados tipo tubo a presión".

A-2 RETICULADOS TIPO TUBOS A PRESION

El fraccionamiento del combustible en manojos de bar-

ritas cilíndricas y la separación física del combustible-refrigerante respecto al moderador por medio de tubos, características básicas de estos reticulados, introducen algunas variantes en el esquema de cálculo respecto al correspondiente a reticulados regulares tipo recipiente a presión con combustible sin fraccionar (barras plenas).

Estas variantes son:

- a) La heterogeneidad del espectro de neutrones térmicos en la celda debe tener en cuenta, además del endurecimiento por absorción concentrada, la retermalización asociada al refrigerante, la cual depende de las características de dispersión y temperatura del refrigerante.
- b) La superficie efectiva de pasaje de neutrones de resonancia del manojo debe incluir efectos de sombra interiores a la superficie exterior del manojo.
- c) Las dimensiones características de las zonas geométricas de estos reticulados exigirá introducir la variación espacial dentro de la celda en cada grupo.
- d) El cálculo de las fisiones rápidas del U-238 debe comprender la heterogeneidad y distribución no uniforme de la fuente de neutrones rápidos en la zona combustible y efectos de interacción entre manojos vecinos.

El análisis de las experiencias que se consignan más adelante ha sido realizado calculando los efectos mencionados de la siguiente forma:

- a) El empleo del código SPECTROX III ^{modificado} ~~modificado~~ con $1/f = G_0$ del agua pesada (modelo Butler) para diferentes radios del manojo (R) y fracción de volumen del refrigerante, ha permitido ajustar la relación siguiente entre velocidad media del moderador ($\bar{v}_m$)

y del manojo (V_b) (igualdad de temperatura entre las dos zonas):

$$\bar{N}_b = \bar{N}_m + 0.310 R \Sigma_b(N_0) - 0.0018 \Sigma_s(N_0)$$

siendo $\Sigma_b(N_0)$, $\Sigma_s(N_0)$ secciones eficaces macroscópicas de absorción y de dispersión para $v=2200$ m/s de la zona combustible (o manojo). De acuerdo a las distribuciones de activación térmica determinadas experimentalmente en reticulados tipo tubo, la temperatura "neutrónica" en el centro del manojo es doble de la correspondiente al tubo, además la ley es del tipo parabólica. Pasando de temperatura a velocidades medias se tiene que el incremento de velocidad media en un anillo "K" respecto a la velocidad media del moderador ($\bar{\Delta N}_K$) viene dado por:

$$\Delta \bar{N}_K = 1.2428 (\bar{N}_b - \bar{N}_m) \left[1 - \frac{0.135}{R_N} \frac{R_K^3 - R_{K-1}^3}{R_K^2 - R_{K-1}^2} \right]$$

siendo R_K R_{K-1} los radios externos e internos del anillo "K".

b) Si r_0 es el radio de las barras del manojo, n el número de barras y ρ la densidad, la relación Sefec/M viene calculada por:

$$\frac{S_{efec.}}{M} = \frac{2\pi r_0 n}{\pi r_0^2 n} \cdot \gamma (1-c)$$

siendo (notación empleada en la referencia (34)35):

$$C_{ij} = \frac{2}{\pi S} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} k_{ij} [2(x,y,\alpha)] \cdot \gamma (1-c) = 1 - \sum_{ij} C_{ij} \quad ; \quad \gamma = \left\{ \frac{2.366 + (1-c)^2}{2.366 + (1-c)^2} \right\}^{1/2} = 1.366$$

Para el cálculo de $1-c$ se ha utilizado el polinomio del tipo

$$a_{n,m} x^n y^{m+1}$$

con x = sección eficaz de transferencia del refrigerante por paso dentro del manojo, y = radio de barra/paso, γ , $a_{n,m}$ obtenidos por Carlvik ajustando los valores calculados con el código Dancok (disposición hexagonal) el cual resuelve C_{ij} para barras cilíndricas paralelas con la fórmula de arriba. Si la configuración es centrada se podrá definir hexágonos equivalentes (igualdad de áreas) asociados a cada corona. Cuando las características físicas y geométricas del manojo definan parámetros fuera de los rangos del ajuste polinomial, el cálculo de C podrá realizarse empleando el criterio geométrico de Hicks del efecto sombra para barritas

interiores (sombra completa) y perifericas (sombra parcial) ambas dependiente de la configuración del manojo.

c) La inclusión de GRUPOL ³⁶ (método de las colisiones múltiples-formulación a cuatro grupos) en PROCON (PROCON III) permite evaluar con aproximación de transporte la distribución de flujo en los diferentes anillos concentricos de la celda y grupos, la que a su vez será utilizada en el cálculo final de los parámetros de celda.

El fraccionamiento utilizado es el que provee una distancia optima Σ_e (espesor capa) no menor que 0.6 para región manojo y 0.55 para moderador ⁽³⁶⁾. Los coeficientes de difusión son calculados pesando los libres caminos medios totales son el flujo, probabilidades de colisión y volúmenes correspondientes para ~~el~~ grupo de energía.

d) El cálculo de la distribución de las fisiones rápidas (grupo 1) y térmicas dentro del manojo para el caso de mezclas homogéneas con GRUPOL permite tener en cuenta las distribuciones no uniforme que éstas presentan como así también, a través de la condición de contorno tipo celda de GRUPOL, efectos de interferencia. La heterogeneidad es incluida utilizando el criterio de Persaghen ³⁷, (diferencia de las fisiones rápidas de la barrita respecto a la micro celda del manojo referidas a las fisiones térmicas correspondiente A-3 RETICULADO TIPO PLACA (Núcleo reactor de investigación RA-3))

Estos reticulados están formados por placas curvadas con combustible altamente enriquecido en U-235 de espesor pequeño ubicadas en cajas rectangulares inundadas con agua liviana. El espacio entre placas combustible es aproximadamente 7 veces el espesor de combustible. El espacio entre cajas es pequeño actuando como

lámina absorbente.

Para el cálculo se homogeniza el volúmen de caja incluyendo la lámina de agua lateral. La estructura hiperfina del flujo térmico se la determina con el método de Amouyal-Benoist para geometría plana. Las absorciones resonantes son evaluadas con la aproximación de dilución infinita. Se omiten efectos de heterogeneidad en el espectro termico y contribuciones por fisiones rápidas en el U-238. La estructura fina del flujo térmico se la calcula con teoría de difusión incluyendo fuentes de moderación y secciones eficaces promedios suponiendo espectro maxweliano. El coeficiente de difusión de la celda se lo calcula homogeneizando la sección eficaz de transporte. Debido a la importancia de los términos de fuga en estos núcleos, se examinó la dependencia con el criterio de ponderación en "D". Aplicando el criterio Benoist para correlación angular nula, pero con distintas aproximaciones para las probabilidades de colisión y criterios de selección de las regiones, resultó que las diferencias encontradas en los coeficientes de difusión son finalmente despreciables en el área de moderación.

Las secciones eficaces efectivas para los tres grupos rápidos utilizadas son las mismas que las ajustadas por Hicks con excepción de la correspondiente al transporte del grupo 1, del Aluminio. Este cambio proviene de lo siguiente: es sabido que, para sistemas altamente enriquecido, las secciones eficaces "efectivas" presentan dependencia con el tamaño del sistema. Por otro lado, cuando en las mezclas hay porcentajes importantes del material de estructura, o "tercer elemento" (en nuestro caso la relación de volúmen de aluminio respecto a la del moderador es 0.5) el método de ajuste de Umbrellaro (o de Hicks) es ~~por lo~~ correcto. Sin embargo, el empleo del código MUFT IV a aproximación B1 y bi-

34
 biblioteca Henry para U-235, 238, H, O, AL y Laplaciana igual 100m^{-2} ha mostrado que las constantes neutrónicas de MUFF pueden ser bien aproximadas, excepción hecha del coeficiente de difusión del grupo 1.⁶⁴

Una información mas detallada de la adaptación del cálculo a estos reactores conjuntamente con la descripción del método experimental y discusión de resultados se puede consultar en la Referencia(64).

A-4 VARIACIÓN DE LA MULTIPLICACION, CON EL TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO (Modelo a un solo punto).

El cálculo de la variación de la reactividad con el grado de combustión (o Burn-up) en un reactor de potencia está asociado al estudio de los siguientes problemas:

a) Variación de la concentración del U-235, formación de plutonio y productos de fisión.

Suponiendo una distribución uniforme de potencia (modelo a un solo punto) y llamando $N_i(t)$, $N_k(t)$ las densidades atómicas (átomos por cm^3), al tiempo "t" del isótopo "i" y de su precursor "k" respectivamente, ϕ_n el flujo en el combustible correspondiente al grupo "n" ($n=1\dots 4$) normalizado a la potencia térmica nominal de reactor (supuesta constante durante el tiempo de funcionamiento) y $\sigma_{a,i}^{(n)}$, $\sigma_{c,i}^{(n)}$ las secciones eficaces microscópicas de absorción y captura del isótopo "i" y del grupo en energía "n", la variación de la concentración N_i viene gobernada por la ecuación diferencial:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \sum_{n=1}^4 N_k(t) (\sigma_{c,k}^{(n)} \phi_n) - \sum_{n=1}^4 N_i(t) (\sigma_{a,i}^{(n)} \phi_n)$$

Los nucleidos considerados son 7 (ciclo de Uranio):

U-236, Pu239, Pu-240, Pu-242. Las ecuaciones diferenciales son

resueltas por métodos analíticos. Las secciones eficaces epitérmicas (grupo $n=3$) de los isótopos de Plutonio son calculadas incluyendo efectos de blindaje y evaluadas como se indicó en la sección A-1-b. El cálculo de las secciones eficaces térmicas se indica más adelante.

Dado el tiempo, concentraciones iniciales, potencia específica media (Watts por gramos), intervalo de tiempo en que se divide el total (correspondiente a un grado de combustión dado) y las constantes iniciales $(\sigma_i^n \phi_n)$, el cálculo comienza con la determinación del factor de normalización del flujo (supuesto igual para todos los grupos), concentraciones nuevas y enseguida las nuevas constantes $(\sigma_i^{(n)} \phi_n)$ (incluidas las de los productos de fisión). Este cálculo permite determinar la multiplicación (suponiendo que la laplaciana es invariable) y el grado de combustión correspondiente, evaluado por:

$$BV = \frac{1}{\rho} \sum_{n,i} \sigma_{fi}^{(n)} \phi_n P_n^{(i)} \left(\int_0^t N_i(x) dx \right)$$

siendo P_n^1 la energía desprendida por fisión en el grupo "n" e isótopo "i" (Watts seg/fisión) y ρ la densidad del uranio.

El cálculo se repite hasta que BU sea mayor que una cantidad dada o la multiplicación efectiva menor que 1.

Los productos de fisión de alta sección eficaz de captura son tratados en condición de equilibrio y los correspondientes a baja captura combinando los cálculos de Hurst⁴⁰ y Nephew⁴¹. el primero provee las secciones eficaces efectiva (formulismo Wescott) en función del flujo Wescott integrado que sirven para corregir las densidades atómicas de los productos de fisión PF1 (fisiones en U-235 y 238) y PF II (fisiones en Pu-239 y 241)

calculadas estas a partir de las fisiones integradas. Finalmente las absorciones vienen dadas por el producto de esas densidades atómicas por las secciones eficaces compiladas por Nephew para el grupo térmico (ley $1/v$) y epitermal para irradiación nula.

Este tratamiento combinado entre los tres pseudos productos de fisión (Hurst) y cuatro pseudos productos de fisión (Nephew) permite resolver de una manera simple, aunque no completamente coherente, la dependencia de las secciones eficaces de absorción de los productos de fisión con la irradiación en una formulación a cuatro grupos.

b) Efecto Doppler en la absorción efectiva de resonancia del U-238.

El estudio teórico de la integral de resonancia efectiva del U-238 para diferentes radios de barra y temperaturas medias ha mostrado que la dependencia con las dimensiones y temperaturas de la barra están prácticamente concentrada en el rango de energía correspondiente al grupo ³⁴3. De esa forma, si T es la temperatura media, la sección eficaz de absorción del U-238 correspondiente al grupo 3 viene dada por:

$$\sigma_{aU-238}^{(3)}(T) = \sigma_{aU-238}^{(3)}(293^{\circ}K) \left\{ 1 + \left[\alpha + \beta \frac{S_{\text{efect.}}}{M} \right] (\sqrt{T} - \sqrt{293}) \right\}$$

Los cálculos se hacen con α y β iguales a 0.5510^{-5} , 0.5510^{-5} para UO₂ y 0.5410^{-5} y 0.4710^{-5} para U metal respectivamente provistos por el estudio teórico mencionado, los cuales están dentro del error de los valores experimentales de Hells-trand.

Suponiendo una distribución parabólica de temperatu-

ra media T para el cálculo del efecto Doppler viene dada por:

$$T = T_s + 4/3 (T_{\text{máx}} - T_s)$$

$T_{\text{máx}}$ viene dada por la potencia específica (o la integral de conductibilidad) y T_s del estudio térmico y del movimiento del fluido refrigerante en el canal.

La influencia del efecto Doppler sobre la captura resonante de otros isótopos (U-235 o Pu) es ignorada por la baja concentración que en general estos presentan.

c) Dependencia de las secciones eficaces del grupo térmico con la temperatura del moderador y deformación del espectro térmico por acumulación de plutonio.

La deformación por el plutonio formado y el corrimiento que presenta el espectro de neutrones térmicos en reactores de potencia tipo recipiente a presión en condiciones de funcionamiento han sido tratados en una forma simplificada, utilizando la tabla de Amster para mezclas homogéneas hidrogenadas a diferentes temperaturas del moderador (T_m), concentración de Pu-239 (Z), U-235 y absorción en $1/v$, confeccionada con el empleo del modelo Wigner-Wilking de termalización en agua liviana.

Los valores de Amster fueron ajustados (con error menor que 1.5%) con la siguiente fórmula para secciones eficaces del grupo térmico (en el rango $T_m \lesssim 600^\circ\text{K}$ y $Z \lesssim 0.01$ átomos de Pu-239/ átomos de H):

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}(T_m, \theta, z) &= \frac{\sigma_0}{\bar{\nu}(\theta, T)} \cdot g(T_m, \bar{\nu}, z) \\ \bar{\nu}(\theta, T_m) &= \bar{\nu}(\theta, 293) \left[1 + U(\theta) \left(\frac{T_m}{293} - 1 \right) \right]^{1/2} \\ g(T_m, \bar{\nu}, z) &= \alpha(z, T_m) + \beta(z, T_m) \left(\frac{\bar{\nu}}{1.123} - 1 \right) + \gamma(z, T_m) \left(\frac{\bar{\nu}}{1.123} - 1 \right)^2\end{aligned}$$

siendo α, β, γ polinomios cuadráticos en T_m y lineales en Z y $U(\theta')$ una función de segundo grado en θ' definida por esta por:

$$\theta' = \frac{\left[\frac{N(\theta, 293)}{1.128} \right]^2 - 1}{6.4}$$

La diferencia entre θ y θ' proviene de que para $T_m = 293^\circ\text{K}$ $Z=0$, $\bar{v}$ es calculada con la relación establecida por Honeck mientras que para $T_m > 293^\circ\text{K}$ y $Z > 0$ se la deriva de la tabla de Amster

La heterogeneidad se la estima con la misma fórmula que para $T_m = 293^\circ\text{K}$ y $Z=0$.

B) COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

B-1) Reticulados regulares tipo recipiente a presión sin fraccionamiento del combustible '

Para el análisis del gran número de experiencias que se mencionan a continuación, el esquema de cálculo adoptado fue programado para la computadora digital Mercury Ferranti. El código, denominado PROCON I (y II), emplea la biblioteca de secciones eficaces efectivas para el modelo a tres grupos ajustada por Hicks⁴³ (código MUTF IV, datos nucleares de Henry³⁹, aproximación P-1, mezclas binarias) y la correspondiente al grupo térmico combinando las derivadas por Honeck (U-235, transporte del hidrógeno) y Amster. La compilación Westcott⁴² - BNL325 (segunda edición) para $v = 2200$ m/s. es empleada para normalizar las secciones eficaces térmicas.

PROCON II incluye el cálculo de la variación isotópica, reactividades y grado de combustión para el ciclo de uranio.

B-1-1) Uranio natural o levemente enriquecido en U-235.

Las características principales de estos reticulados están consignadas en la tabla I dividiéndolos en cuatro grupos. Los correspondientes al grupo 1 y 2 son moderados y totalmente reflejados con agua liviana, pero con combustibles a base de U metálico y óxido de uranio respectivamente. En el grupo 3 se incluyen los reticulados moderados y reflejados con agua pesada los cuales comprenden U natural u óxido de uranio, mientras que el último grupo de experiencias analizadas se refiere a moderador agua pesada con tres purezas (99,4%, 81%, 55%) y óxido de uranio enriquecido en U-235.

Los valores medios de la multiplicación efectiva calculadas por PROCON I ($\bar{\lambda}$) y desviaciones cuadráticas medias $\epsilon = \left[\sum (\lambda_j - \bar{\lambda})^2 / n \right]^{1/2}$ para los tres primeros conjuntos de experiencias están en la tabla II juntamente con los obtenidos con otros métodos. El examen global de estos resultados muestra que PROCON I puede predecir la condición crítica con errores menores del 1% y desviaciones ϵ nunca mayor del 0.4% salvo para UO₂-H₂O (0.55%). La comparación con otros resultados disponibles muestra que PRONON calcula λ y ϵ dentro del rango de incertidumbre de otros métodos de cálculo.

La discriminación de los valores de $\bar{\lambda}$ en función de algunos parámetros de diseño (tabla III) juntamente con la comparación entre teoría y experiencia del factor de fisión rápida y factor de desventaja de la densidad de neutrones térmicos n_m/n_u (en este caso la comparación es con THERMOS) para algunos reticulados U-H₂O que se presenta en la tabla IV (los números de la primera fila se refieren a los calculados por PROCON) permiten deducir características relevantes del esquema de cálculo adoptado para la interpretación de experiencias de reticulados

regulares a base de U natural o levemente enriquecido (con excepción de las experiencias NORA):

Reticulados U-H₂O

- Subsiste una tendencia a sobreestimar λ con el paso del reticulado: el factor de desventaja calculado por PROCON es siempre menor que el provisto por THERMOS, por otro lado la dependencia con la relación volúmetrica ha sido omitida en $\bar{N}_k - \bar{N}_m$. Esos dos efectos actúan haciendo disminuir la utilización térmica. Además la omisión del efecto de retroceso en las fisiones rápidas que presenta el método empleado hace sobreestimar la multiplicación rápida para redes de gran relación volumétrica.
- Subestimación de la multiplicación en reticulados submoderados: el valor de λ para $V_m/V_u=1$ es una prueba de la deficiencia del tratamiento de la absorción efectiva resonante en sistemas de alta componente epitermal, en particular la dependencia de $\zeta_0^{(3)}$ con la cuerda media del moderador y radio de barra.
- La poca dependencia de λ y ϵ con el enriquecimiento es una constatación de la independencia del error con los términos de fuga (L_S^2, L^2). Resultados similares fueron obtenidos analizando los reticulados envenenados con Boro.⁵⁴

Reticulados U natural - D₂O (AQUILON)

- El cálculo con UO₂ muestra una subestimación independiente del paso.
- λ y ϵ aumentan con el paso para U metal; la tendencia a sobreestimar el factor δ ²⁸ para barras aisladas del formulismo propuesto, conjuntamente con las limitaciones del tratamiento de la heterogeneidad del espectro térmico para reticulados con gran radio de barra, explican estas discrepancias. Además si se omi-

ten los dos últimos reticulados correspondientes al radio de barra igual a 2.2 cm, los cuales corresponden al paso 300 y 290 mm respectivamente, $\bar{\lambda}$ y ε se reduce a 0.99866 y 0.269% respectivamente. Estos resultados mostrarían la deficiencia del cálculo de la captura resonante para grandes pasos y barras espesas.

Finalmente en la tabla V se indican algunos parámetros calculados para los reticulados NORA para tres purezas de agua pesada comparándolos con los experimentales disponibles (segunda fila) y los obtenidos con otro método de cálculo (indicados con un paréntesis) desarrollado para interpretar estas experiencias⁵⁰. Los acuerdos no son tan satisfactorios como con combustible a base de uranio natural. Los reticulados muy submoderados

(los cuales corresponden a una probabilidad de escape del grupo rápido (p) menor que 0.6) vienen mal evaluadas por una deficiencia intrínseca de PROCON en la determinación de las secciones eficaces efectivas del grupo epitermal a partir de la probabilidad del grupo (P_3) para P_3 bajos. Los errores no sistemáticos en λ que presentan los primeros cinco reticulados (correspondientes a una pureza de 99.4%) no son comprendidos, aunque podrían ser explicados por el método usado para evaluar la fuga a partir de la laplaciana experimental (la cual fue obtenida suponiendo separación de variables). A medida que la pureza del moderador disminuye, los acuerdos en λ aumentan, como así también los correspondientes al factor de desventaja (los valores experimentales son obtenidos irradiando alambre de Cobre y corrigiendo por actividad epitermal a partir de la relación de Cadmio medida en un punto del moderador). Sin embargo, los errores asociados a PROCON I para estas experiencias

son aproximadamente iguales o menores que los obtenidos con el método desarrollado en la referencia⁵³ (código K-7 THERMOS y BIGG para el espectro fémico y de moderación, método Sauer para la corrección Dancoff e integral de resonancia del U-238 de Hells-trand) como bien lo muestra la tabla V.

B-1-2) Combustible enriquecido en Plutonio.

Las experiencias analizadas corresponden a las efectuadas en los laboratorios de Hanford y Westighouse⁵⁵ (moderador agua liviana) y de Saclay⁵⁶ (moderador agua pesada).

a) Moderador agua liviana.

En este caso el combustible consiste en barras cilíndricas de UO_2 empobrecido - PuO_2 (1.5%) (experiencias Hanford) ubicadas en una malla hexagonal o a base de UO_2 natural- PuO_2 (6.6%) (experiencia Westighouse) y reticulado cuadrado. La tabla VI muestra las características principales de estos reticulados juntamente con la multiplicación calculada con PROCON. Los desacuerdos son importantes con el grado de submoderación y enriquecimiento en Pu. Sin embargo los errores pueden ser disminuidos actuando sobre los datos nucleares epitermales ($\Delta'\lambda$) y corrección por heterogeneidad del espectro térmico ($\Delta''\lambda$). En efecto Feiner y Esch⁵⁷ muestran valores calculados y medidos de integral de resonancia del Pu 239 (dilución infinita) epitermal del Pu-239 que permiten corregir los coeficientes de la fórmula de las secciones eficaces de resonancia correspondientes a los compilados en PROCON. Esta normalización se traduce en un incremento del orden 5% en $\overline{\sigma}_f^{(3)}$ y una disminución del 10% en $\overline{\sigma}_a^{(3)}$. El aumento en reactividad correspondiente ($\Delta'\lambda$) está indicada en la tabla VI. El empleo del código SPECTROX III modificado (modelo pesado) ha mostrado que la corrección ($\overline{N}_\mu - \overline{N}_m$)

viene sobreestimada con PROCON, tanto más cuanto mayor es la concentración de Pu y grado de submoderación del reticulado. A pesar de la limitación del modelo primario utilizado en SPEC_TROX para sistemas a base de Pu, estos resultados mostrarían sin embargo que la omisión de la corrección $\bar{N}_u - \bar{N}_m$ es más correcta que calcularla con la hipótesis de la ley $1/v$ para la absorción del combustible. La penúltima columna de la tabla VI muestra la multiplicación efectiva final suponiendo $\bar{N}_u - \bar{N}_m$ y en la última columna se indican los valores obtenidos con el código ^{SC} LASER (espectro Nelkin, espectro MUFF, compilación Westcott). Si se eliminan los reticulados W1 (para el cual Z está fuera del rango de la tabla de Amster) y H1 las diferencias $(1-\lambda)$ son en general similares a las correspondientes a LASER confirmando así la deficiencia de PROCON en el análisis de sistemas submoderados con combustible a base de Pu aún cuando se incorporan las dos correcciones mencionadas.

b) Moderador agua pesada.

Las experiencias analizadas en este caso corresponden a las de Sacley^a : barras de U natural de 1.46 cm. de radio con un pequeño enriquecimiento en Pu (0.0427% y 93.8% en Pu-239, 5.7% en Pu-240) envainadas en aluminio. Juntamente con esas experiencias fueron realizadas otras con tenores variables en U-235. Todas estas experiencias son analizadas con PROCON a partir de la laplaciana experimental de los reticulados con U natural (medidas por carta de flujo) más la contribución $\sum B^2$ determinada con el método de substituciones sucesivas para 0.69%, 0.83% de enriquecimiento en U-235 y 0.0427% de Pu. Los resultados obtenidos para cinco pasos (h) y 99.67% de pureza de agua pesada

están en la tabla VII mostrando acuerdos satisfactorios y una tendencia sistemática a sobreestimar la multiplicación con el agregado de Pu.

B-1-3) Análisis del núcleo YANKEE

YANKEE es un reactor de potencia tipo PWR refrigerado y moderado con agua liviana a alta presión, compuesto de macroceldas formadas por aproximadamente 304 celdas unitarias (disposición cuadrada) y canales de control. El cálculo de estas macroceldas requiere tratamientos especiales respecto a los reticulados regulares, en la distribución fina del flujo térmico y efecto Dancoff. El primero es evaluado con la teoría de difusión incluyendo fuentes de moderación, mientras que en el segundo efecto se sigue el esquema de Hicks, calculando la corrección Dancoff de la barras periféricas y de las cuatro correspondientes a las esquinas de las macroceldas a partir de la computada para la barra central.

Incorporando a PROCON estos tratamientos, los valores de multiplicación efectiva que resulta para tres estados: potencia, sin potencia e incluyendo las concentraciones del Xenon y Samarium en equilibrio, calculados con una laplaciana igual a 6.83m^{-2} están en la tabla VIII conjuntamente con los experimentales.⁵⁹

Teniendo en cuenta las incertidumbres experimentales y limitaciones del método empleado en PROCON II (modelo a un solo punto) para el análisis de este núcleo los errores encontrados pueden considerarse satisfactorios para cálculos preliminares.

Es estudio de la evolución del núcleo, suponiendo una

potencia específica constante e igual a 20.5MW(th)/t UO₂ muestra un error menor del -1.3% en los gramos de Pu formado respecto a los kilos de U para un grado de combustión (igual a 7800 MWd/t (equivalente a un empobrecimiento del U-235 de 23.45%) como se indica en la tabla IX.

La diferencia entre la vida del núcleo observada (6240 MWd/t)⁶⁰ respecto a la calculada por PROCON para $\lambda = 1.0000$ es de -1160 MWd/t, pequeña si se la compara con la obtenida por el código TURBO bidimensional⁶¹ (-1120 MWd/t). Sin embargo PROCON subestima la variación de la reactividad

$$\Delta \rho = \lambda_{final} - \lambda_{inicial} / \lambda_{final} \cdot \lambda_{inicial}$$

por incremento unitario del grado de combustión durante la vida del núcleo respecto a las calculadas por TURBO⁶¹, LEOPARD⁶² y experimentales⁶⁰ como lo muestra la tabla X (ver B-1-2 (a)).

B-1) Análisis del núcleo del reactor RA-3 (*)

RA-3 es un reactor tipo piscina moderado con agua liviana y combustible altamente enriquecido en U-235 (90%) diseñada para una potencia térmica de 5 MW.

La caja "standard" (7.72x8.00cm.) reúne 19 placas curvadas de 0.132cm. de espesor (0.052cm. corresponde al combustible) 6.6cm. de ancho y 60cm. de alto respectivamente, conteniendo cada una aproximadamente 7.8 gramos de uranio. El espesor del moderador es de 0.289 cm.

El conjunto crítico construido RA-2 permite el estudio de dife-

(*) Este estudio ha sido publicado separadamente (⁶⁴). Su inclusión en este trabajo es a los fines de completitud.

rentes configuraciones. La reactividad es medida utilizando una fuente pulsada que provee 10^8 n/s de 14 Mev con pulsos de ancho comprendidos entre 10 seg y 10m seg (reacción T (d,n) H_e^4).

Para el estudio de este núcleo se ha utilizado las constantes neutrónicas de difusión para el modelo a cuatro o dos grupos calculadas por PROCON y el código espacial Hassitt⁶³ el cual provee la multiplicación efectiva estática. Las constantes del reflector agua son calculadas a partir de la biblioteca de secciones eficaces del modelo a cuatro grupos. Las correspondiente a dos grupos son ajustadas a partir de la igualdad entre el cálculo a cuatro y dos grupos de la multiplicación.

El método de análisis seguido consiste en computar la multiplicación de la configuración en estudio para diferentes valores de α/ν^i siendo α la constante de decaimiento de los neutrones prontos y ν^i la velocidad media del grupo "i". El α calculado del sistema es aquel que provee el valor $1/(1-\beta)$ de multiplicación. Adoptando $\beta = 6.5 \cdot 10^{-3}$, en la tabla XI se indican los valores de α calculados y experimentales para tres configuraciones basada en la 4x4 reflejada totalmente por agua. Estos resultados preliminares muestran acuerdos buenos, los cuales confirmarían la bondad del ajuste adoptado en la biblioteca de secciones eficaces efectivas del grupo 1, mencionado en A-3. Otras configuraciones (incluidas las correspondientes ~~con~~ elementos de control) estudiadas juntamente con una discusión detallada de los procedimientos de análisis utilizados y resultados obtenidos puede consultarse en la REFERENCIA (64).

B-2) Reticulados tipo tubo-combustible fraccionado

— El método seguido, el cual difiere del correspondiente a reticulados regulares con barras plenas por la inclusión entre otras cosas de la variación espacial dentro de la celda (Sección A-2) fue programado en FORTRAN IV para BULL G.E. 625 (PROCON III) empleandose la misma biblioteca que PROCON I y II.

El tipo de experiencias analizadas con PROCON III comprenden: reticulados con manojos de 7 y 19 barritas de diferentes radios, configuración geométrica (centrada o hexágona) y refrigerantes, e incluyen a manojos con y sin tubos, ubicados en redes de diferente pasos y con moderador frío de D2O (65,66,67).

En tablas XII (a) y tabla XII (b) se muestran los valores de multiplicación efectiva evaluada a partir de la laplaciana medida (técnicas de reemplazo o medición de curvatura) para el caso de manajo con 7 barritas y 19 respectivamente, con diferentes radios de combustible (a), radio interno y externo de vaina (b,c), paso interno (p), pureza del agua pesada (t), tipo de refrigerante (R), radio interno del tubo (R1), espesor (T1) y radio interno del tubo calandria (R2) y espesor correspondiente (T2).

Para cada conjunto de experiencias se indica también en la misma tabla los valores medios y desviaciones cuadráticas medias.

A la tabla XIII se ha elevado la relación entre el valor calculado y experimental de algunas de esas experiencias de los factores de desventaja, de la densidad de neutrones (ρ_c/ρ_E), factor ~~factor~~ de fisión rápida (δ_c^2/δ_E^2) y relación de conversión (δ_c/δ_E), indicandose también los valores medios y

d.c.m. de los diferentes conjuntos de experiencias.

El cálculo con PROCON III fue efectuado suponiendo dos tipos de fraccionamiento en GRUPOL : El que provee la relación $\sum_m e = 1.0$, $\sum_e e = 0.8$ (subestima de acuerdo al estudio de la referencia (36)) y el que permitió acuerdos satisfactorios entre GRUPOL y métodos analíticos más exactos ³⁶, es decir $\sum_m e = 0.60$, $\sum_e e = 0.55$ (los valores calculados con PROCON III se los indica en este caso con un parentesis).

La tendencia a sobreestimar la reactividad (subestimar)) con el primer juego se pone en evidencia claramente, excepción de los reticulados a base de 19 barritas y dos tubos (entre ambos hay un fuerte "gap") exceptuando los reticulados con manajo de 7 barritas y líquido orgánico como refrigerante (los que presentan desacuerdos importantes y atribuibles seguramente al tratamiento del grupo térmico pues, como lo registra la tabla XIII, son los que presentan mayor desacuerdo en ξ) el acuerdo con los valores experimentales con PROCON es muy satisfactorio, pues el error en la placiana difícilmente excede el $1/4 \text{ m}^{-2}$, y en casi todos los casos está comprendido entre los valores calculados con otros métodos.

Cálculos realizados con PROCON III para combustible fraccionado con Uranio metálico (no presentados en este trabajo) indican también la sensibilidad de la multiplicación con el fraccionamiento, los mejores acuerdos se consiguen con el segundo juego.

C) Conclusión

Este informe registra el cálculo de 250 experimentos distintos (de los cuales, 90 corresponde a combustible fraccionado) con el esquema "PROCON". El acuerdo obtenido respecto a los

valores experimentales o/y a los provistos con otros métodos de cálculo, es elocuente de las bondades y ventajas de PROCON en oribkenas de diseño de optimización.

Manuscrito terminado el 26-12-1968.

NOTA:

La programación de los códigos PROCON I, II y III estuvo a cargo de la Prof. María Teresa Calandria de Schilman.

En los múltiples cálculos colaboró el Sr. Carlos Balbi.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Gerard, Y. y otros: "Natural uranium heavy water lattices" Proc. 2nd UN Int. Conf. PUAE 12 (1958) 281.
- 2) Hone, D. W. y otros: "Natural uranium heavy water lattices, experiment and theory" Proc. 2nd UN Int. Conf. PUAE 12 (1958) 351.
- 3) Pershagen, B. y otros: "Calculation of lattice parameters for uranium rod clusters in heavy water an correlation with experiments" Proc. 2nd UN Int. Conf. PUAE 12 (1958) 341.
- 4) Kouts, H. y otros: "Physics of Slightly Enriched normal water lattices" Proc. 2nd UN Int. Conf. PUAE 12 (1958) 446.
- 5) Hicks, D.: "Nuclear Calculation Methods for light water Moderator Reactors" AEEW R.64 (1961)
- 6) Hellens, R. L. and Honeck, H.C.: "Light Water Lattices" Technical Reports Series N° 12 (1962) 27
- 7) Alpiar, R.A. : "SANDPIPER" AEEW R. 90 (1962)
- 8) Hicks, D.: "Light Water lattices" Technical Reports Series N° 12 (1962) 99
- 9) Solanilla, R.: "Exponential and Critical Experiments" Vol II IAEA (1964) 361
- 10) Solanilla, R.: "Descripción PROCON" Informe Interno Departamento Reactores (CNEA)1964.
- 11) Bohl, E. and Gelbard, E.: "MUFT IV - fast spectrum code for IBM 704" WAPD - TM - 72 (1957)
- 12) Amster, H. and Suarez, R.: "The calculation of thermal constants averaged over a Wigner- Wilkins flux spectrum: description of the SOFOCATE code" WAPD - TM - 39 (1957)
- 13) Amster, H.: "The SOFOCATE second deck" WAPD - TM - 67 (1957)
- 14) Hicks, D.: "Heavy Water Lattices; second panel report " Technical Reports Series N° 20 (1963) 371
- 15) Sauer, A.: J. Nucl. Energy (Reactor Sci. Technol. Part A-B) 18 (1964) 425
- 16) Sauer, A.: Nucl. Sci. Engng. 16 (1963) 329
- 17) Bonalumi, R.: "Systematic Approximations of neutron first collision probabilities" EUR 1284.e (1965)
- 18) Dresner, L.: "Resonance absorption in Nuclear Reactor". Pergamon Press, London (1960)

- 19) Levine, M.M.: Nucl. Sci. Engng. 16 (1963) 329
- 20) Hellstrand, E. and Lundgren, G.: Nucl. Sci. Engng. 12 (1962) 435
- 21) Honeck, H.: Nucl. Sci. Engng. 8 (1960) 192 and Honeck, H. "THERMOS, A Thermalization Transport Theory Code for Reactor Lattices Calculations" BNL: 5826 (1961)
- 22) Honeck, H.: Nucl. Sci. Engng. 18 (1964) 49
- 23) Amouyal, A., Benoist, P., and Horowitz, J.: J.Nucl. Energy 6 (1957) 79
- 24) Leslie, D.C.: Reacto. Sci. and Technol 17 (1963) 293;
- 25) Cadilhac, M. y otros: "Thermalization et spectres de neutrons" Proc. 3rd UN Int. Conf. PUAE 2 (1964) 153
- 26) Cadilhac, M. y otros: "Some Mathematical and Physical remark on neutron thermalization in infinite homogeneous systems" BNL 719 Vol. II (1962)
- 27) Soule, J.L.: "Modeles simples pour les thermaliseur usuels" Rapport CEA N° 2473 (1963)
- 28) Benoist, P.: "Théorie du coefficient de diffusion dans un reseau comportant de cavites" Rapport CEA N° 2278 (1964)
- 29) Bell, G.I.: Nucl. Sci. Engng. 5 (1959) 139
- 30) Benoist, P.: "La collision anistrophe dans le problemas de cellule" Rapport CEA R2890 (1966)
- 31) Mougey, J. y Solanilla, R.: "Integrale de resonance effective de l' uranium 238" Note CEA N° 505 (1965)
- 32) Naudet, R., Mougey, J.: "Calcul du facteur antitrappe dans les réseaux a eau lourde" Rapport CEA 2475 (1964)
- 33) Gibson, I.H. : "The Physics of Latrep" AEC L 2548 (1966)
- 34) Carlvick I.: "A method for calculating collision probabilities in general cylindrical geometry and applications to flux distributions and Dancoff factor" Proc. 3rd. UN Int. Conf. PUAE 2 (1964) 225
- 35) Leslie D. C. y otros : N.S. Eng. 22 78-86 (1965)
- 36) C. Mattei, R. Solanilla : "GRUPOL" (en imprenta como informe CNEA) 1968
- 37) Persaghen, B.: "Heavy Water Lattices: Second Panel Report" Technical Reports Series N° 20 (1963) 225
- 38) Pasquini, E.: Comunicación privada (1966)

- 39) Heary, A.F.: "54 group library for P-1 programmes" WAPD - TM-224 (1960)
- 40) Hurst, D.G. y otros: "Cross sections and Yields of Pseudo Fission Products" AECL 715 d (1958)
- 41) Nophew, E.A.: "Thermal and Resonance Absorption Cross Sections of the U-233 U-235 and Pu-239 Fission Products" ORNL - 2869 (1960)
- 42) Westcott, C.H. y otros: "Atomic Energy Reviews, Vol. 3 N°2 (1965)
- 43) Hicks, D. : Comunicación privada (1964)
- 44) Davinson y otros: YEGC - 94 (1959)
- 45) Klein, D. y otros: Nucl. Sci. Engng. 14 (1958) 403
- 46) Mac Kinney, A.L. and Bell, B.M. : Trans. Amer. Nucl. Soc. 3 (1960) 1
- 47) Girard, Y. y Naudet, R.: "Heavy Water Lattices: Second Panel Report" Technical Reports Series N° 20 (1953) 93
- 48) Ver referencia 2
- 49) Ver referencia 32
- 50) Anderson, E. y otros: "A NORA Project Report" Technical Reports Series N° 67 (1966)
- 51) Price, G.A. y Hellens, R.L.: "Lattices studies in light-water moderated systems" Proc. 3rd UN Int. Conf. PUAE 3 (1964) 3
- 52) Alpear, R.A. and Hicks, D.: "Methuselah" AEEW-R 135 (1963)
- 53) Ver referencia 32
- 54) Solanilla R.: "Análisis de experiencias de reticulados con moderador líquido empleando una teoría a dos grupos modificada" Informe CNEA N° 183 (1965)
- 55) Bindler, L. y otros: Trans. Amer. Nucl. Soc. 8 512 (1963)
- 56) Regnaud, F. y otros: "Recyclage du plutonium" BUR 2853 f (1966) pag. 64
- 57) Feiner, F. and Rach, L.J.: "Reactor Physics in the Resonanced Thermal Regions" Proc. of the Nat. Topical Meeting of the A.N.S. San Diego (1966) Vol. II pag. 299
- 58) Graves, H.W. and Howard, J.F.: "Nuclear Performance of Yankee" core KTID: 7672
- 59) Hicks, D.: "Reactor calculations models for burn-up studies "TID 7672 pag. 347

- 60) "Yankee core evaluation program" WCAP 6075 (1965)
- 61) Hendley S.M. Mangan, R.: "TURBO" WCAP 6059 (1965)
- 62) Barry, R.F.: "Leopard" WCAP 3629-26 (1963)
- 63) Hassitt, A.: "A Programme for solving the multigroup neutron diffusion equations in two space dimensions on the FERRANTI MERCURY COMPUTER" AERE R/T 2487 (1958)
- 64) Pieroni, N. Pasquini, E. Solanilla, R. (a ser publicado como informe CNEA(1969)
- 65) Green, R.E. y otros : "Lattices studies at Chalk River and theirs interpretation" AECL-2025 (1964)
- 66) Girard, R., Naudet, R. "Heavy water lattices: second Panel report" Technical reports series N° 20 (1963)
- 67) Thie, J.A. : " Heavy water exponential experiments using ThO₂ and UO₂ " Pergamon Press, Oxford 1961, page 26.
- 68) Bonalumi, R. y otros " The "Procella" method for Heavy water lattices EUR 3921,e (1968)

TABLA I. Características generales de los reticulados regulares tipo recipiente a presión analizados.

	Radio del Combustible (cm)	Enriquecimiento en U-235 (%)	Material de vaina	$\frac{V_m}{V_u}$ (o paso)	Nº de reticulados analizados	Referencias
GRUPO I	0.3175	1.00;1.15	A1	1.5;2.0;3.0;4.0	8	experiencia BNL ⁴³
	0.4915	1.00;1.15;1.30	A1	1.0;1.5;2.0;3.0;4.00	15	"
	0.7620	1.00;1.15;1.30	A1	1.0;1.5;2.0;3.0;4.0	15	"
GRUPO II	0.3810	2.7	SS304	1.06;1.42;1.85	3	experiencia YANKEE ⁴⁴
	0.4865	1.30	A1	1.42;1.78;2.39	3	experiencia Bettis ⁴⁵
	0.4930	1.30	A1	1.39;1.73	2	"
	0.5640	3.0;4.0	SS304	1.15;1.57;3.57;4.4	7	experiencia Savannah ⁴²
	0.7635	1.30	A1	1.07;1.40;1.75	3	experiencia Bettis
GRUPO III	1.78	U-natural	A1	*130mm a 250mm	7	experiencia AQUILON ⁴⁷
	2.2	U-natural	A1	*130mm a 300mm	10	"
	1.46	U-natural	A1	*120mm a 210mm	6	"
	2.3	UO2 natural	A1	*150mm a 210mm	4	"
GRUPO III	1.6285	U natural	A1	*120.6mm a 220mm	7	experiencia Zeep ⁴⁴
	1.525	Unatural	A1	*148.5mm a 212.13mm	7	experiencia Adams ⁴⁵
GRUPO IV	0.564	3% (UO ₂)	SS304	*16.36mm a 100mm	16	experiencia Nora ⁴⁶

TABLA II. Multiplicación efectiva media y desviación cuadrática media en los reticulados correspondientes a los grupos I, II, y III de la Tabla I.

Reticulados	N° de reticulados		
U-metal-H ₂ O	38	1.00063 [±] 0.00382	0.9988 [±] 0.0027 ^(a) (MUTF-THERMOS-MONTECARLO) 51
UO ₂ -H ₂ O	18	0.99664 [±] 0.0055	1.0000 [±] 0.0070 (METHUSELAH versión 4 grupos) 52
UO ₂ -D ₂ O (AQUILON)	4	0.99497 [±] 0.00089	
U natural-D ₂ O (total AQUILON)	27	1.0004 [±] 0.00382	
U natural-D ₂ O (ZEEP)	7	0.99756 [±] 0.00253	
U natural-D ₂ O (ADAMS)	7	0.99454 [±] 0.00257	1.00134 [±] 0.00239 ^(o) (Burn Up 5) 49 53

(a) El valor medio es sobre 55 reticulados, los cuales algunos comprenden moderador envenenado, excluidos los correspondientes a $V_m/V_a=1.0$.

(0) La multiplicación efectiva se calcula a partir del correspondiente a BURN UP 5 y la relación entre los η calculados con PROCON y BURN UP 5, la cual está comprendida entre 1.030-1.040.

TABLA III: Distribución de la multiplicación efectiva en función de radio de barra, enriquecimiento y relación volumétrica (U-H₂O) y radio de barra (U-D₂O)

U-H₂O

Radio de barra (cm)	número de reticulado	PROCON
0.3175	(8)	0.99950 ⁺ 0.00264
0.4915	(15)	0.99998 [±] 0.0040
0.7620	(15)	1.00188 ⁺ 0.00366
Enriquecimiento(%)		
1.00	(14)	1.002635 ⁺ 0.0035
1.15	(14)	0.99837 ⁺ 0.00279
1.3	(10)	1.000985 [±] 0.00379
Relación volumétrica (Vm/Vc)		
1.0	(6)	0.99627 ⁺ 0.00429
1.5	(8)	1.00040 [±] 0.00271
2.0	(8)	1.00007 [±] 0.00282
3.0	(8)	1.001595 [±] 0.00284
4.0	(8)	1.003711 [±] 0.00264

U natural - D₂O (experiencia AQUILON)

Radio de barra (cm)	números de reticulado	PROCON
1.46	(6)	1.00227 [±] 0.00173
1.78	(7)	1.00173 [±] 0.00180
2.2	(10)	1.00052 [±] 0.00446
2.3(UO ₂)	(4)	0.99497 ⁺ 0.00089

(a) Ver la aclaración (b) de la Tabla II.

TABLA IV: Parámetros de reticulados en redes U-H₂O (1% enriquecimiento y tres radios de combustible (a)).

$\frac{V_m}{V_u}$	$\Delta = 0.3175 \text{ cm}$ n Mod/n Comb	$\delta^{2\sigma}$	$\frac{V_m}{V_u}$	$\Delta = 0.4915 \text{ cm}$ n Mod/n Comb	$\delta^{2\sigma}$	$\frac{V_m}{V_u}$	$\Delta = 0.7620 \text{ cm}$ n Mod/n Comb	$\delta^{2\sigma}$
1.5	1.1278	0.13813	1.0	1.1838	0.18367	1.0	1.3079	0.18744
	1.136	0.129 $\pm$ 0.04		1.198	0.184 $\pm$ 1.006		1.333	0.193 $\pm$ 0.002
2.0	1.1367	0.11339	1.5	1.2082	0.1465	1.5	1.3599	0.14501
	1.144	0.106 $\pm$ 0.005		1.220	0.136 $\pm$ 0.006		1.382	0.146 $\pm$ 0.008
3.0	1.1504	0.08541	2.0	1.2279	0.11657	2.0	1.4036	0.12098
	1.157	0.084 $\pm$ 0.005		1.239	0.115 $\pm$ 0.002		1.424	0.121 $\pm$ 0.003
4.0	1.1612	0.07023	3.0	1.2593	0.08918	3.0	1.4756	0.0917
	1.171	0.062 $\pm$ 0.002		1.272	0.087 $\pm$ 0.002		1.494	0.098 $\pm$ 0.003
			4.0	1.2845	0.07455	4.0	1.5348	0.08190
				1.301	0.076 $\pm$ 0.002		1.550	0.073 $\pm$ 0.002

TABLA V: Elementos del cálculo del experimento NORA.

Pureza D ₂ O	PASO (cm)	λ	B ² (m ⁻²)	$\bar{n}_m/\bar{n}_u$	P
99.40%	10.00	0.99557	12.175	1.5045	0.9550
			12.43 $\pm$ 0.12	1.373	
		(0.9601)	(11.05)	(1.509)	
	6.544	1.0280	19.234	1.4597	0.90654
			17.74 $\pm$ 0.26	1.296	
		(0.9888)	(17.16)	(1.452)	
	4.908	1.02700	21.928	1.4261	0.8429
			20.10 $\pm$ 0.20	1.268	
		(0.9888)	(19.38)	(1.402)	
	3.658	1.00260	20.144	1.3873	0.7334
			19.93 $\pm$ 0.24	1.222	
		(0.9706)	(17.76)	(1.343)	
	3.272	1.01000	17.708	1.3710	0.6759
			16.87 $\pm$ 0.55		
		(0.9826)	(15.54)	(1.322)	
	2.314	0.96600	-0.057	1.3132	0.4280
81.00%			2.990 $\pm$ 0.56		
		(0.9799)	(1.31)	(1.235)	
	1.636	0.7700	-32.92	1.2371	0.130
			-11.25 $\pm$ 0.72		
			(--)	(1.152)	
	3.800	0.99110	31.95	1.4196	0.8643
			33.21 $\pm$ 0.47	1.303	
		(0.9614)	(27.90)	(1.451)	
	3.272	0.98540	34.45	1.3920	0.8204
			36.65 $\pm$ 0.41	1.289	
		(0.9603)	(30.89)	(14.20)	
	2.687	0.99195	32.68	1.3547	0.7391
			33.93 $\pm$ 0.40	1.260	
		(0.9740)	(30.03)	(1.371)	
	2.314	0.97687	26.29 $\pm$	1.3258	0.6539
			29.91 $\pm$ 0.32	1.249	
			(24.91)	(1.336)	
	1.636	0.86220	-12.07	1.2480	0.3289
			7.48 $\pm$ 0.46		
			(--)	(1.241)	

TABLA V (Continuación): Elementos del cálculo del experimento NORA.

Pureza D ₂ O	PASO (cm)	λ	B ² (m ⁻²)	$\bar{n}_m/\bar{n}_u$	P
55.00%	3.272	0.99863	37.39	1.4257	0.8846
			37.70 [±] 0.65	1.363	
	2.687	(0.9656)	(30.14)	(1.505)	0.8304
		0.98986	47.61	1.3766	
	2.314	0.98300	49.98 [±] 0.43	1.313	0.7696
			(42.11)	(1.443)	
	1.900	0.98151	47.90	1.3397	0.6482
			51.89 [±] 0.70	1.277	
		(0.9762)	(44.00)	(1.400)	
			36.36	1.2915	
			40.47 [±] 0.31	1.250	
			(35.28)	(1.344)	

TABLA VI: Resultados para los reticulados Pu O₂^a-UO₂-H₂O

Hanford ^(b)	V_m/V_u	H/P_u	λ PROCEN	$\Delta'\lambda$	$\Delta''\lambda$	λ'	λ LHSEK
H1	1.10	230	0.97427	562	320	0.98310	1.0002
H2	1.56	326	0.98493	412	340	0.99245	1.0029
H3	2.71	567	0.99747	240	330	1.00317	1.0068
H4	3.79	794	1.00126	173	290	1.00589	1.0053
H5	5.14	1077	1.00640	143	230	1.01013	1.0056
WREC ^(c)							
W1	1.68	76	0.94509	1195	1.610	0.97314	0.9970
W2	2.16	98	0.96310	980	1.720	0.99098	1.0140
W3	4.70	211	0.96468	483	2.280	0.99232	1.0092
W4	5.67	254	0.96926	409	2.350	0.99685	1.0122
W5	10.80	486	0.98301	242	2.920	1.01463	1.0158

a) 90.43% Pu-239, 8.6% Pu-240 - 0.92%Pu-241 - 0.05%Pu-242

b) 1.5% en PuO₂ - radio de barra:0.472 cm

c) 6.6% en PuO₂ - radio de barra:0.428 cm.

TABLA VII: Multiplicación y laplacianas en reticulos Unatural
- D₂O (a) para diferentes enriquecimientos en U-235 y con 0.043%
en Pu.

ρ_{235} (cm)	12	13	17	19	21	$\lambda \pm \epsilon$
λ	1.00129	1.00368	0.99817	0.99844	0.99582	0.99948 $\pm$ 0.273
U nat B ² C ^(b)	8.43	8.47	7.04	6.13	5.29	
(m ⁻²) E ^(c)	8.30	8.30	7.10	6.18	5.40	
λ	0.99925	1.00094	0.99524	0.99540	0.99375	0.99697 $\pm$ 0.271
0.69% B ² C	-0.41	-0.58	-0.45	-0.390	-0.25	
(m ⁻²) E	-0.48	-0.45	-0.35	-0.305	-0.26	
λ	1.00350	1.00442	0.99776	0.99794	--	1.00091 $\pm$ 0.307
0.83% B ² C	2.868	2.679	2.03	1.77	--	
(m ⁻²) E	2.785	2.63	2.05	1.79	--	
λ	1.00109	1.00234	0.99550	0.99455	0.99320	0.99734 $\pm$ 0.367
0.86% B ² C	3.493	3.285	2.49	2.18	1.19	
(m ⁻²) E	3.585	3.344	2.63	2.305	1.98	
λ	1.00128	1.00285	.99667	0.99658	0.99426	
ϵ	$\pm$ 0.15	$\pm$.133	$\pm$.130	$\pm$.164	$\pm$.068	
λ	1.00694	1.00730	1.00396	1.00424	1.00248	1.00498 $\pm$ 0.185
Pu B ² C	1.74	1.63	1.27	1.12	0.97	
(m ⁻²) E	1.54	1.450	1.07	0.942	0.808	

(a) Pureza 99.67%-densidad media 18.9g/cm³

(b) Valores calculados

(c)Valores experimentales

TABLA VIII: Comparación entre multiplicación efectiva calculada y experimental para tres estados de funcionamiento del núcleo YANKEE

	PROCON Π	EXPERIENCIA 59
Con Potencia	1.1164	1.0990 $\pm$ 0.007
Sin Potencia	1.1418	1.114 $\pm$ 0.007
Con $X_e - S_m$	1.0787	1.0670 $\pm$ 0.007

TABLA IX: Comparación entre cálculo y experiencia de la composición isótopica del núcleo YANKEE para 7.800 MWd/t.

	PROCON (1)	EXPERIENCIA (2)	$\frac{(1)-(2)}{(1)} \times 100$
átomos Pu-239 x 100	84.769	83.8	1.14
átomos totales Pu			
átomos Pu-240 x100	10.22	10.6	-3.68
átomos totales Pu			
átomos Pu-241 x 100	4.68	5.10	-8.90
átomos totales Pu			
átomos Pu (239+241) x 100	89.45	88.90	-0.62
átomos totales Pu			
gramos Pu kilo Uranio	0.4641	0.470	-1.28

TABLA X: Variación de la reactividad por grado de combustión
 $(\frac{\Delta \rho}{\Delta \beta U} \times 10^5)$ en función del grado de combustión $\frac{(MWd)}{t_n}$

Bu	2375	4000	5750
TURBO ⁶¹	1.255	1.180	1.310
LEOPARD ⁶²	1.230	1.210	1.110
PROCON	1.035	1.065	1.025
EXPERIMENTAL ⁶⁰	1.16 ^{+0.12}	1.22 ^{+0.15}	1.21 ^{+0.15}

TABLA XI: Valores de calculado y medidos para la configuración 4x4 del reactor RA-3.

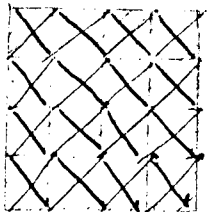
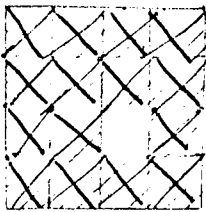
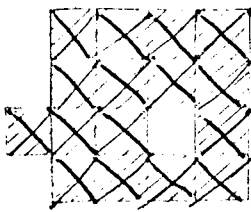
Configuración	Cálculo PROCON-HASSITT	EXPERIENCIA
	810^{-1}	$722^{-1 \pm 10}$
	1.268^{-1}	$1.326_s^{-1 \pm 13}$
	1.183_s^{-1}	1.144_s^{+25}
 caja combustible  moderador		

TABLA XII(b): Reticulados UO_2 - D_2O manejo de 7 barras

1 a=1.2 cm. b=1.219 c=1.27, p=2.67 =10.2 ;t=99.73%, RD_2O , R1=4.128, T1=.089

Paso	18	19	22	24	24.6	28	36	V.M.
λ	1.00101 (.99842)	1.0012 (.99777)	1.00171 (.99716)	1.00448 (.99721)	1.00378 (.99589)	1.00415 (.99426)	1.00490 (.99264)	1.00303 $\pm$.0014 (.99615 $\pm$.00192)

2 R AIRE

	1.00277 (1.00087)	1.00550 (1.00257)	—	1.00685 (1.00113)	1.00319 (.99453)	1.00353 (.99198)	1.00437 $\pm$.0014 (.99822 $\pm$.00417)
--	----------------------	----------------------	---	----------------------	---------------------	---------------------	--

3 R L.O. ($\text{K}_{18}\text{H}_{22}$)

	19	20	22	24	28	
λ	1.01794 (1.01653)	1.01775 (1.01694)	1.02047 (1.07836)	1.02456 (1.02076)	1.02838 (1.02284)	1.02182 $\pm$.0040 (1.01899 $\pm$.00249)

4 a=0.81, b=0.85, c=0.95, p=2.1, =9.853, t=99.70%, RD_2O ,

paso	17	19	21	23	V.M.	
λ	1.00131	1.00440	1.00226	1.00525 $\pm$.0014	1.00330 $\pm$.0014	sin tubo

5 a=1.1, b=1.15, c=1.25, p=3.2, =10.19, t=99.70%, RD_2O ,

paso	19	21	24		
λ	1.009136	1.009774	1.009694	1.009534 $\pm$.0003	sin tubo

6 R1=5.30, T1=0.1, RN_2

paso	19	21	23	25	V.M.
λ	.99312	1.00101	1.00269	1.00792	1.00119 $\pm$.0053

7 a=0.78, b=0.78, c=0.86, P=2.375, =0.42, t=99.65%, RD_2O , R1=3.6, T1=0.1

paso	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	V.M.
λ	.98497	.99744	1.00195	1.00378	1.00328	1.00709	1.00422	1.00434	1.00907	1.00885	1.00250 $\pm$.0017

TABLA XII(b): Reticulados $UO_2 - D_2O$ manajo de 19 barras.-

N°	Casos	18	19	20	21	22	24	26	28	30	32	34	36	V.M.
1	$a = 0.71, b = 0.75, c = 0.76, \bar{p} = 1.679, \bar{q} = 10.45, t = 99.63, RD_2O, RI = 4.13, TI = 0.285, R2 = 5.28, T2 = 0.14$													
	λ	.98863 (.98771)	.98971 (.98950)	.99322 (.99228)	.99423 (.99261)	.99352 (.99199)	.99584 (.99285)	.99610 (.99039)	.99326 (.98729)	.99429 (.98554)	.99272 (.98543)	.99432 (.98442)	.99173 (.98216)	.99315 $\pm$.0020 (.98851 $\pm$.0033)
2	TUBO Zr-2													
	λ	.98918			.99595		.99778		.99570				.99412	.99455 $\pm$.0028
3	RAIRE													
	λ	1.00933 (1.00867)		1.00407 (1.00107)	1.00314 (.99912)	1.00178 (.99763)	1.00077 (.99503)	1.00112 (.99272)	.99795 (.98932)	.99756 (.98633)	.99494 (.98520)	.99529 (.98308)	.99304 (.98153)	.99991 $\pm$.0044 (.99271 $\pm$.0081)
4	R.L.O. (C ₁₈ H ₂₂)													
	λ	.99127			.99519		1.00049		1.00306					.99750 $\pm$.0045
5	$a=0.6615, b=0.6925; 0.7945, p=1.791, c=9.53, t=99.60, RD_2O$													
	paso	19.05		21.59		24.13	26.67			30.48	V.M.			sin tubo
	λ	1.009032		1.004592		1.005376	1.009428			1.008557	1.007397 $\pm$.0017			
6	$a=.81, b=.85, c=.95, p=2.1, \bar{q}=9.85, t=99.70, R.D_2O$													
	paso	19		21		23	25			V.M.				sin tubo
	λ			.99282		.99637	.99778			0.99566 $\pm$.0020				
7	RN ₂ RI=5.8 TI=.1, p=2.2													
	paso	25		27		29	32							
	λ	1.01285		1.01195		1.01208	1.01290			1.01245 $\pm$.0004				
8	$a=0.66, b=0.7, c=0.8, p=2.8, RI=9.52, t=99.70, RD_2O$													
	paso	19		21		23	V.M.							sin tubo
	λ	.981748		.99237		.99827	.99079 $\pm$.0068							
9	$p=2.0$													sin tubo
	λ	.99860				1.00205	1.00033 $\pm$.0017							
10	$a=0.78, b=0.78, c=0.78, p=1.85, \bar{q}=9.42, t=99.65, RD_2O, RI=4.82, TI=0.18$													
	paso	20		22		24	26	28	V.M.					
	λ	.99434		.99824		.99960	.99978	.99946	0.99828 $\pm$.0067					

Continuación TABLA XII+

	$\lambda \pm \varepsilon$
Valor medio para manojo de 7 barritas	$1.00589^{\pm}.0078$ ($1.00352^{\pm}.0105$)
Valor medio para manojo de 19 barritas	$.99848^{\pm}.0067$ ($.99052^{\pm}.0065$)
Valor medio para refrigerante D ₂ O	$.99944^{\pm}.0065$ ($.99134^{\pm}.0011$)
Valor medio para refrigerante Aire	$1.00130^{\pm}.0044$ ($.99443^{\pm}.0076$)
Valor medio para refrigerante L.O.	$1.01101^{\pm}.0128$ ()
Valor medio para refrigerante sin tubos	$1.00194^{\pm}.0071$
Valor medio para refrigerante dos tubos	$1.00142^{\pm}.0083$ ($.99604^{\pm}.0106$)

TABLA XIII: Comparación entre Calculo y Experiencias en los parámetros de reticulados (Experiencias Chalk River)⁶⁵

PASO	18	21	22	24	28	36	$V.M. \pm \Sigma$
RD20							
7 barritas							
ξ_c / ξ_e	.9613 (.994)		.9724 (1.007)		.9505 (1.007)	.9332 (.988)	$0.9544 \pm .0144$ $(0.999 \pm .0082)$
γ_c / γ_e	.9765 (.977)		.9788 (.982)		.9954 (1.004)	.9937 (1.005)	$0.9861 \pm .0085$ $(0.992 \pm .0126)$
$\delta_c^{28} / \delta_e^{28}$	1.046 (1.044)		.9867 (.9895)		1.0065 (1.015)	1.0129 (1.0218)	$1.0130 \pm .02133$ $(1.0168 \pm .02052)$
19 barritas D20							
ξ_c / ξ_e	.9997 (1.0252)	.9936 (1.039)		1.0092 (1.052)	.9950 (1.045)	.9786 (1.030)	$0.9952 \pm .0099$ $(1.0382 \pm .0097)$
γ_c / γ_e	.983 (.983)	.9804 (.9822)		.9703 (.9733)	.9857 (.9913)	.9882 (.997)	$0.9815 \pm .0061$ $(0.9854 \pm .0081)$
$\delta_c^{28} / \delta_e^{28}$	1.0154 (1.0154)	.965 (.9674)		.9530 (.957)	1.020 (1.028)	1.0183 (1.0265)	$0.9943 \pm .0291$ $(0.9989 \pm .0304)$
R Aire 7 barritas							
ξ_c / ξ_e	1.0088 (1.049)				.9748 (1.034)	.9755 (1.034)	$0.9864 \pm .0158$ $(1.039 \pm .0071)$
γ_c / γ_e	.9846 (.9960)						
$\delta_c^{28} / \delta_e^{28}$	1.095 (1.096)						

TABLA XIII: (Continuación)

19 barritas Aire

ρ_c/ρ_e 1.0549 (1.077)	1.0298 (1.0746)	1.0225 (1.0626)	1.008 (1.0559)	1.003 (1.054)	1.0236 [±] .0184 (1.0650 [±] .0092)
-----------------------------------	--------------------	--------------------	-------------------	------------------	--

γ_c/γ_e .9460 (.946)	.978 (.979)	.962 (.972)	.982 (.987)	(.995) (1.002)	0.9726 [±] .0169 (0.9772 [±] .0185)
-------------------------------------	----------------	----------------	----------------	-------------------	--

$\sqrt[2.8]{\rho_c/\rho_e}$ 1.003 (1.003)	.9508 (.9545)	.9984 (1.005)	.9978 (1.0074)	1.0118 (1.0229)	0.9924 [±] .0214 (0.9986 [±] .0231)
--	------------------	------------------	-------------------	--------------------	--

R.L.O

7 barritas

ρ_c/ρ_e 0.837 (0.865)	.852 (.878)	.8585 (.8807)	0.8492 [±] .0089 (0.8746 [±] .0068)
----------------------------------	----------------	------------------	--

γ_c/γ_e .9873 (.9884)	.9778 (.980)	.9725 (.9787)	0.9792 [±] .0060 (0.9824 [±] .0230)
--------------------------------------	-----------------	------------------	--

$\sqrt[2.8]{\rho_c/\rho_e}$.9606 (.9611)	1.00 (1.007)	0.9803 [±] .0197 (0.984 [±] .0230)
--	-----------------	---

19 barritas (L.O)

ρ_c/ρ_e .9224	.9078	.9124	0.9142 [±] .0060
-----------------------	-------	-------	---------------------------

γ_c/γ_e .990	1.000	.994	.9882	0.9931 [±] .0045
--------------------------	-------	------	-------	---------------------------

$\sqrt[2.8]{\rho_c/\rho_e}$.9511	.9557	.9468	.9812	0.9587 [±] .0133
-----------------------------------	-------	-------	-------	---------------------------

	ρ_c/ρ_e	γ_c/γ_e	$\sqrt[2.8]{\rho_c/\rho_e}$
valor medio para manojo 7 barritas	.93140 [±] .0576 (.97367 [±] .0674)	.98333 [±] .0077 (.98764 [±] .0103)	1.01539 [±] .0404 (1.01919 [±] .0395)

valor medio refrigerante D2O	.98745 [±] .0440 (1.0516 [±] .0164)	.98291 [±] .0109 (.98128 [±] .0148)	.98345 [±] .0276 (.99871 [±] .0270)
------------------------------	--	--	--

TABLA XIII: (Continuación)

Valor medio refrigerante D20	.97706 [±] .0236 (1.0208 [±] .0215)	.98356 [±] .0076 (.98831 [±] .0109)	1.00264 [±] .0276 (1.00684 [±] .0279)
Valor medio refrigerante Aire	1.00966 [±] .0251 (1.05523 [±] .0152)	.97460 [±] .0161 (.97867 [±] .0172)	1.00947 [±] .0429 (1.00148 [±] .0420)
Valor medio refrigerante L.O.	.87354 [±] .0307 (.8757 [±] .0068)	.98711 [±] .0086 (.98237 [±] .0042)	.96590 [±] .0187 (.98400 [±] .0230)

TABLA XIV: Diferencia B^2 Calculado- B^2 experimental provista por tres métodos de calculos.-

MANOJO de 7. Casos N° 2, 3,

PASO	18	19	20	22	24.0	24.6	28	36
PROCONIII	0.060	0.070		0.080	0.130	0.150	0.140	0.110
LATREP	-0.241	-0.252		-0.164	-0.091	-0.135	-0.115	-0.148
PROCELLA	-0.134	-0.084		0.079	0.168	0.122	0.152	0.095
PROCONIII	-	0.140		0.240		0.280	0.100	0.080
LATREP	-	-0.160		0.075		0.062	-0.031	-0.086
PROCELLA	-	-0.009		0.231		0.198	0.065	0.028
PROCONIII	-	1.080	0.990	1.000	1.050	-	0.950	-
LATREP	-	-0.559	-0.528	-0.398	-0.254	-	-0.152	-
PROCELLA	-	.738	.741	.809	.880	-	0.828	-

MANOJO de 19. Casos N° 1, 2, 3, 4

PASO	18	19	20	21	22	24	26	28	30	32	34	36
PROCONIII	-0.564	-0.494	-0.313	-0.256	-0.274	-0.161	-0.138	-0.216	-0.167	-0.193	-0.138	-0.179
LATREP	-0.010	-0.063	+0.043	0.099	0.052	0.114	0.073	-0.010	-0.023	+0.031	-0.044	-0.079
PROCELLA	-0.066	-0.042	0.112	0.148	0.169	0.248	0.213	0.151	0.126	0.106	0.090	0.050
PROCONIII	-0.545	-	-	-0.181	-	-0.086	-	-0.137	-	-	-	-0.129
LATREP	-0.093	-	-	0.045	-	0.133	-	0.054	-	-	-	-0.43
PROCELLA	-0.247	-	-	+0.049	-	0.173	-	0.109	-	-	-	0.024
PROCONIII	0.411	-	0.173	0.129	0.071	0.028	0.032	-0.064	-0.070	-0.132	-0.113	-0.152
LATREP	0.647	-	0.296	0.243	0.238	0.204	0.192	0.133	0.075	0.034	-0.007	-0.036
PROCELLA	0.647	-	0.386	0.344	0.341	0.298	0.254	0.189	0.126	0.082	0.039	0.008
PROCONIII	-0.528	-	-	-0.241	-	0.020	-	0.100	-	-	-	-
LATREP	-0.264	-	-	-0.388	-	-0.241	-	-0.215	-	-	-	-
PROCELLA	0.801	-	-	0.590	-	0.655	-	0.534	-	-	-	-

MANOJO de 7 . Casos 4, 5, 6, 7

MANOJO 19. Casos 5, 6, 7, 8, 9, 10

PASO	19.05	21.59	24.13	26.67	30.48			
PROCONI III	0.046	0.020	0.021	0.032	0.024			
PROCELLA	0.289	0.107	0.089	0.259	0.194			
PASO	19	21	23	25	27	29	32	
PROCONI III		-0.036	-0.016	-0.009	-	-	-	
PROCELLA		-0.397	-0.223	-0.089	-	-	-	
PROCONI III	-	-	-	0.047	0.040	0.037	0.035	
PROCELLA				0.125	0.113	0.049	0.059	
PROCONI III	-0.095	-0.035	-0.007	-	-	-	-	
PROCELLA	0.073	0.037	0.070					
PROCONI III	0.007	-	0.008					
PROCELLA	0.095	-	0.055					

CONTINUACION TABLA XIV

PASO	20	22	24	26	28
PROCONIII	-0.030	-0.008	-0.002	-0.001	-0.002
PROCELLA	-0.441	-0.138	-0.073	-0.103	-0.054

PROCELLA: Referencia 68

LATREP: Referencia 33