



**EVOLUÇÃO DO COMBUSTÍVEL. UM PROGRAMA PARA
CÁLCULO DE UM RETICULADO DE URÂNIO NATURAL E
ÁGUA PESADA E PARA O CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE
PLUTÔNIO**

WILMA SÔNIA CAIAFFA HEHL

PUBLICAÇÃO IEA N.º 186
Setembro — 1969

©

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SAO PAULO — BRASIL

EVOLUÇÃO DO COMBUSTÍVEL. UM PROGRAMA PARA CÁLCULO DE UM
RETICULADO DE URÂNIO NATURAL E ÁGUA PESADA E PARA O
CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE PLUTÔNIO

Wilma Sonia Caiaffa Hehl

Divisão de Física de Reatores
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil

Publicação IEA Nº 186

Setembro - 1969

Comissão Nacional de Energia Nuclear

Presidente: Prof. Uriel da Costa Ribeiro

Universidade de São Paulo

Reitor: Prof. Dr. Luis Antonio da Gama e Silva

Instituto de Energia Atômica

Diretor: Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

Conselho Técnico-Científico do IEA

Prof. Dr. José Moura Gonçalves	}	pela USP
Prof. Dr. José Augusto Martins		
Prof. Dr. Rui Ribeiro Franco	}	pela CNEN
Prof. Dr. Theodoretto H.I. de Arruda Souto		

Divisões Didático-Científicas

Divisão de Física Nuclear -
Chefe: Prof. Dr. Marcello D.S. Santos

Divisão de Radioquímica -
Chefe: Prof. Dr. Fausto Walter de Lima

Divisão de Radiobiologia -
Chefe: Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

Divisão de Metalurgia Nuclear -
Chefe: Prof. Dr. Tharcísio D.S. Santos

Divisão de Engenharia Química -
Chefe: Lic. Alcídio Abrão

Divisão de Engenharia Nuclear --
Chefe: Engº Pedro Bento de Camargo

Divisão de Operação e Manutenção de Reatores -
Chefe: Engº Azor Camargo Penteado Filho

Divisão de Física de Reatores -
Chefe: Prof. Dr. Paulo Saraiva de Toledo

Divisão de Ensino e Formação -
Chefe: Prof. Dr. Rui Ribeiro Franco

EVOLUÇÃO DO COMBUSTÍVEL. UM PROGRAMA PARA CÁLCULO DE UM
RETICULADO DE URÂNIO NATURAL E ÁGUA PESADA E PARA O
CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE PLUTÔNIO

Wilma Sonia Caiaffa Hehl

RESUMO

Nêste trabalho é descrito um programa digital que calcula, para um reator inicialmente "clean", do tipo Água Pesada - Tubo de Pressão, a variação, em função de irradiação, dos parâmetros médios de interesse para estudos de queima (burn-up).

Calcula os quatro fatores de k infinito, k efetivo, áreas de difusão e de moderação, curvaturas geométrica e material, fluxo máximo e fluxo efetivo.

As concentrações, em g/ton UO_2 , dos núclídeos físséis e férteis são também calculadas, em função da irradiação.

O método descrito é o método canadense, e o programa foi baseado no relatório CRRP-873 (1959).

O programa é desenvolvido em Fortran-II-D para o computador IBM-1620 mod. II do Instituto de Energia Atômica.

I - INTRODUÇÃO

Um programa simples de Evolução de Combustível consiste em dado um reator "clean", calcular, em função da irradiação, como varia a composição média dêste reator. Em particular, é interessante se obter a variação dos elementos físséis e férteis, em função da irradiação ou de neutrons/barn, ou seja, fluxo integrado.

Uma aproximação inicial é a de se considerar o fluxo constante, tanto espacialmente como em espectro energético.

Para verificar que uma dada irradiação é atingida no reator em funcionamento, verifica-se sempre se a super-criticalidade é satisfeita.

O programa descrito no relatório CRRP-873 "A Computer Program for Reactor Studies" se compõe, essencialmente, de:

- Cálculos Físicos
- Cálculos Térmicos e Elétricos
- Custo e Otimização

Este trabalho consistiu na adaptação, ao computador IBM-1620 mod. II do Instituto de Energia Atômica, dos Cálculos Físicos.

No método canadense, o programa descrito no CRRP-873 é, portanto, completo, inclusive com possibilidades de cálculos de custo e conseqüente otimização.

No IBM-1620 mod. II, utilizando a memória de 40.000 posições, discos magnéticos e o Fortran-II, foi possível desenvolver o programa em apenas duas partes, automaticamente interligadas através de instruções convenientes em Fortran-II.

A flexibilidade de alteração de dados de entrada, ou de substituição de fórmulas ou de parâmetros destas fórmulas é considerada no programa que foi desenvolvido. Isto porque com o Monitor-II, todo o programa continua sendo utilizado na forma Fortran-II e toda modificação é imediata.

II - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA COMPLETO

O programa completo, em duas partes, calcula as seguintes características ou dados de um reator de potência do tipo "tubo de pressão", moderado e resfriado a água pesada.

- 1 - Seções de choque de Westcott do U-238, U-235, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, para fissão e captura.
- 2 - Parâmetros geométricos caracterizando totalmente uma célula do reticulado, como: volume do combustível, volume do "cladding", volume do refrigerante, volume do moderador.

- 3 - Fatores ϵ , p , f e η do reticulado heterogêneo.
- 4 - Áreas de difusão e de moderação.
- 5 - Produção de Plutônios.
- 6 - Curvatura material, em teoria de dois grupos.
- 7 - k efetivo em função da irradiação.

Os dados de entrada para o programa constam, essencialmente, das características geométricas do elemento combustível, do canal de refrigeração e do tubo de pressão; temperatura média dos neutrons, do moderador, refrigerante e combustível; densidade do combustível; potência máxima específica do elemento combustível; composição isotópica inicial do combustível (UO_2 sempre); natureza do "cladding" e do tubo de pressão; etc.

II.1 - Cálculo das seções de choque microscópicas de Westcott

Em geral tem-se:

$$\hat{\sigma}_k^j = \sigma_{ok}^j (g_k^j + r s_k^j)$$

onde o índice inferior k indica a natureza da reação nuclear considerada, o índice superior j indica o nuclídeo, e g_k^j , r , s_k^j têm o sentido usual.

No CRRP-873, g_k^j e s_k^j são dados através de polinômios do 5º grau em T_n , temperatura dos neutrons; também são encontrados neste relatório, os valores de σ_{ok}^j .

O valor de r é um dado de entrada e, para um reator bem moderado como o são os do tipo CANDU, seu valor é 0,007. Sua determinação exata necessitaria uma determinação do espectro de neutrons.

Ainda no CRRP-873 são dados os valores de v_5 , v_9 e $v_{1,ou}$, ou seja, os valores de v para o U-235, Pu-239 e Pu-241, valores estes

bem concordantes com os do Nuclear Engineering Handbook - Ethington, por exemplo.

Dispondo então de todos os valores de g_k^j , s_k^j e σ_{ok}^j , este programa calcula, para um dado T_n , os valores de $\hat{\sigma}_k^j$ para os núclídeos físséis e férteis.

Por exemplo, são calculados $\hat{\sigma}_j$ (U-235) e $\hat{\sigma}_a$ (U-235) para um dado T_n . Note-se que os valores para o Th-232 e U-233 não são dados, ou seja, o ciclo ou contribuição do tório não é considerada no programa canadense.

II.2 - Cálculo dos parâmetros geométricos da célula

Uma célula do reticulado de um reator tipo CANDU é formada por uma série de camadas concêntricas com o elemento combustível no centro. E, por sua vez, o elemento combustível é formado pela reunião de um certo número de barras.

No NPD, reator que serviu para testar este programa, o elemento combustível é formado pela reunião de 7 barras; no CANDU há 19 barras. Entre as barras circula água pesada sob pressão e alta temperatura; e o elemento combustível é suposto se estender até o raio r_0 (raio da região do combustível), contendo no seu interior UO_2 , Zircaloy-II do "Cladding" e água pesada.

Conhecendo W - número de barras constitutivas do elemento combustível, R_B raio de cada barra, ou melhor, da pastilha de UO_2 , a espessura do "cladding" e o r_0 - raio da região do combustível, o programa calcula os volumes do combustível propriamente dito, "cladding" e do refrigerante.

Com as densidades do UO_2 e do "cladding" - dados de entrada - e, da água pesada - que pode ser calculada - são calculados os números de átomos por centímetro cúbico destes três materiais, bem como suas secções de choque de transporte (Método : volumes relativos entram como peso).

Os cálculos geométricos terminam com o cálculo do volume do moderador, em função do passo do reticulado e do raio externo do tubo de pressão, ambos dados de entrada.

II.3 - Cálculo dos fatores de k infinito

II.3.a - Cálculo de ϵ

Neste cálculo, utilizando a teoria ou método de Spinrad, o elemento combustível é considerado uma mistura homogênea de D_2O , "cladding" e UO_2 . O efeito do oxigênio é considerado. As seções de choque microscópicas rápidas são dadas no CRRP-873, bem como elementos para o cálculo de p_c , probabilidade de um choque no elemento combustível homogeneizado.

II.3.b - Cálculo de p

O método de cálculo de p, apresentado se afasta um pouco do usual.

Inicialmente é calculado p_{o_∞} , probabilidade de escape à ressonância, de uma única barra longa imersa num moderador infinito.

A seguir calcula-se p_o , probabilidade de escape à ressonância numa barra, de um neutron originado nela mesma, desprezando-se os efeitos de "shielding" ou sombra das barras vizinhas. A diferença entre p_{o_∞} e p_o supõe-se ser devida somente a diferença entre as propriedades moderadoras do moderador e do reticulado.

Finalmente, é calculado p através da consideração das probabilidades de absorção nas barras vizinhas.

No caso de elemento combustível constituída por várias barras, como é o do NPD, o método de cálculo é o seguinte: o elemento combustível heterogêneo é dividido em células unitárias com uma barra em cada célula.

A área efetiva do elemento combustível é dada por uma

fórmula que leva em conta a depressão do fluxo de ressonância e a probabilidade de um neutron oriundo de uma outra barra atingir a barra dada.

Na expressão para S_{eff} comparecem expressões contendo funções de Bessel I_0 e I_1 , bem como função $E_3(x)$ ("exponential integral" $E_n(t) = \int_{-1}^{\infty} e^{-xu} u^{-x} du$), e o relatório CRRP-873 fornece aproximações polinomiais para as expressões necessárias.

Como S_{eff} vai depender de K_R^2 de ressonância (inverso do comprimento de difusão para neutrons de ressonância) e K_R^2 depende da própria integral de ressonância através da secção de choque macroscópica de absorção de ressonância, há necessidade de um processo iterativo.

No CRRP-873, o processo iterativo usado não é descrito e o utilizado neste trabalho constitui em supor que a depressão do fluxo causado pelas absorções ressonantes na própria barra na célula unitária, fosse nulo. Com esta aproximação calcula-se tudo e, em particular, S_{eff} e pode-se iterar até que as diferenças relativas entre as integrais de ressonância, entre as iterações sucessivas, difiram de menos de $0,5 \times 10^{-3}$.

II.3.c - Cálculo de f

Como f depende da composição do elemento combustível, variando com a irradiação, este cálculo será tratado mais tarde.

II.3.d - Cálculo de η

Há dependência também de η com a irradiação e, portanto, este assunto será tratado mais adiante.

II.4 - Áreas de difusão e de moderação do reticulado

A área de moderação não depende da irradiação, enquanto que a área de difusão depende.

O cálculo da área de moderação não apresenta dificuldade.

Calcula-se, inicialmente, a relação τ_n/τ_L , entre as áreas de moderação do moderador e do reticulado.

Esta relação é obtida tratando a célula do reticulado como homogeneizada e fazendo-se uma média ponderada - com os volumes como peso - tanto das secções de choque macroscópicas de espalhamento como de decremento logarítmico médio da energia.

Para os materiais moderadores - moderador e refrigerante - é o ξ mesmo; para os materiais estruturais - Zircaloy, alumínio - ξ é nulo.

Quando a Σ_{si} é calculado em relação a Σ_{sn} , do moderador através da relação $\Sigma_{si}/\Sigma_n = a_i$; e $a_i = 1$ ou $a_i = 0$ dependendo do material ser um bom espalhador ou não. De todo modo, os fatores a_i para Zircônio, alumínio, são dados no CRRP-873.

Calculada a relação τ_n/τ_L , a área de moderação L_{SL}^2 é obtida em função da área de moderação para o D_2O puro a $20^\circ C$, corrigido pela variação com a temperatura e densidade.

II.5 - Produção de plutônio

Como a produção de plutônio depende, evidentemente, da irradiação, serão tratados, agora, todos os demais fatores que não foram considerados, a partir de matrizes de irradiação indicadas por $\{C_{ij}\}$ e $\{B_{ij}\}$.

As equações diferenciais que governam a evolução das concentrações dos diversos núclídeos físséis, férteis e dos produtos de fissão, no elemento combustível são as usuais. Como Exemplo:

$$dN_5(t) = -\hat{\sigma}_5 N_5(t) \Phi(t) dt$$

e outras análogas.

Introduzindo a irradiação w através de:

$$w = \int_0^t \Phi(t') dt'$$

$$dw = \Phi(t) dt$$

pode-se escrever

$$dN_5(t) = - \hat{\sigma}_5 N_5(t) \cdot dw$$

$$\frac{dN_5(t)}{dw} = - \hat{\sigma}_5 N_5(t)$$

w = irradiação é dada em neutrons/barn, usualmente; enquanto que exprimindo o fluxo em neutron/cm² × seg e t em segundos, tem-se w em neutrons/cm². A passagem de neutrons/cm² (n/cm²) a neutrons/barn (n/barn) é imediata

$$w(n/cm^2) = 10^{24} w(n/barn)$$

O conjunto de equações diferenciais considerado no programa canadense é:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_5}{dw} = - \hat{\sigma}_5 N_5 \\ \frac{dN_9}{dw} = (1+B) N_8 \hat{\sigma}_8 - \hat{\sigma}_9 N_9 \\ \frac{dN_0}{dw} = - \hat{\sigma}_0 N_0 + \hat{\sigma}_{c9} N_9 \\ \frac{dN_1}{dw} = - \hat{\sigma}_1 N_1 + \hat{\sigma}_0 N_0 \\ \frac{dN_2}{dw} = - \hat{\sigma}_2 N_2 + \hat{\sigma}_{c1} N_1 \\ \frac{dP^i}{dw} = Y_5^i \hat{\sigma}_{f5} N_5 + Y_9^i \hat{\sigma}_{f9} N_9 + Y_1^i \hat{\sigma}_{f1} N_1 - \hat{\sigma}_P^i P^i \end{array} \right.$$

onde

$\hat{\sigma}_{c1}$, $\hat{\sigma}_{c9}$ são secções de choque de captura Y_j^i são os "yields" por

fissão dos pseudo produtos de fissão P^i da fissão do isótopo j , $\hat{\sigma}^i$ é secção de choque do pseudo produto de fissão tipo i .

O fator $(1+B)$ leva em conta o aumento de capturas ressonante no U-238 e vai depender de p e de ϵ , ou melhor, de $(1-p)$, $(1-p')$, ϵ e ϵ' onde p e ϵ são os usuais; ϵ' = aumento de neutrons rápidos produzidos por fissões rápidas no U-238; p' = probabilidade de escape à captura rápida.

O cálculo de B seria complexo; mas considerando que a relação entre a componente rápida e a térmica do fluxo de neutrons não varia com a irradiação (desprezando-se efeitos de distorção do espectro de neutrons devidos principalmente à presença de Pu-239, com uma ressonância de captura alta na região de 0,4 e v), pode-se calcular o valor médio de B .

No programa canadense, considera-se N_8 como constante, dividindo-se tudo por N_8 e, com excessão da equação para o N_5 , também por $(1+B)$. A solução do sistema resultante é dada explicitamente, supondo B constante, e não considerando os produtos de fissão, sob a forma de um produto de matrizes, ou seja:

$$\begin{pmatrix} \frac{N_5 \hat{\sigma}_5}{N_8} \\ \frac{N_9 \hat{\sigma}_9}{N_8(1+B)} \\ \frac{N_0 \hat{\sigma}_0}{N_8(1+B)} \\ \frac{N_1 \hat{\sigma}_1}{N_8(1+B)} \\ \frac{N_2 \hat{\sigma}_2}{N_8(1+B)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \exp(-\hat{\sigma}_5 w) \\ \exp(-\hat{\sigma}_9 w) \\ \exp(-\hat{\sigma}_0 w) \\ \exp(-\hat{\sigma}_1 w) \\ \exp(-\hat{\sigma}_2 w) \end{pmatrix}$$

Todos os elementos da matriz $\{C_{ij}\}$ são dados no CRPP-873 e podem ser calculados imediatamente conhecidas as secções de choque microscópicas correspondentes, e que já foi feito.

No caso dos produtos de fissão, poder-se-ia resolver, também, sem dificuldade o sistema; mas como não interessa a composição, ou seja, o número de átomos dos produtos de fissão, mas tão somente o efeito absorvente que estes têm na economia de neutrons, o tratamento é diferente. Aliás, como as grandezas que interessam a um cálculo de queima (burn-up) são sempre absorções e produções de neutrons, o programa canadense introduz seis grandezas relacionadas com os elementos físséis e férteis, a saber:

A_5 , F_5 , Y_5 e $A(\text{Pu})$, $F(\text{Pu})$ e $Y(\text{Pu})$, indicando A , Y e F respectivamente absorção de neutrons, produção de neutrons por fissão e número de fissões, tudo expresso em barn por átomo de U-238.

Assim por exemplo:

$$A_5 = N_5 \hat{\sigma}_5 / N_8 \quad \begin{array}{l} \text{absorção de neutrons no U-235} \\ \text{em barn por átomo de urânio} \end{array}$$

Quanto aos produtos de fissão, são agrupados em quatro categorias: três categorias para os produtos de fissão de baixa (30b), média (300b) e alta (600b) secção de choque de absorção; o xenon recebe um tratamento especial, bem como o samário (isótopos 149 e 151), cádmio (isótopo 113) e európio (isótopo 155).

O equilíbrio que se estabelece entre formação e destruição de xenon depende bastante do fluxo de neutrons, e isto é considerado no programa.

Introduzindo dois termos globais $A_{pf}(5)$ e $A_{pf}(\text{Pu})$ para indicar as absorções (sempre em barn por átomo de U-238) dos produtos de fissão do U-235 ($A_{pf}(5)$) e dos plutônios 239 e 241 ($A_{pf}(\text{Pu})$), obtém-se a solução geral das equações de evolução da produção, absorção e fissões com a irradiação w sob a forma matricial seguinte:

$$\begin{pmatrix} A_5 \\ Y_5 \\ F_5 \\ A_{pf}^{(5)} \\ \frac{A(Pu)}{1+B} \\ \frac{Y(Pu)}{1+B} \\ \frac{F(Pu)}{1+B} \\ \frac{A_{pf}(Pu)}{1+B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & C_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{21}n_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{12}\frac{n_5}{v_5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{47} & B_{48} & 0 & 0 \\ \Sigma_i C_{i1} & 0 & \Sigma_i C_{i3} & \Sigma_i C_{i4} & \Sigma_i C_{i5} & \Sigma_i C_{i6} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{21}n_9 + C_{41}n_1 & 0 & C_{23}n_9 + C_{43}n_1 & C_{44}n_1 & C_{45}n_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{21}\frac{n_9}{v_9} + C_{41}\frac{n_1}{v_1} & 0 & C_{23}\frac{n_9}{v_9} + C_{43}\frac{n_1}{v_1} & \frac{C_{44}n_1}{v_1} & \frac{C_{45}n_1}{v_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_{81} & B_{82} & B_{83} & B_{84} & B_{85} & B_{86} & B_{87} & B_{88} & B_{89} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \exp(-\hat{\sigma}_5 w) \\ \exp(-\hat{\sigma}_9 w) \\ \exp(-\hat{\sigma}_0 w) \\ \exp(-\hat{\sigma}_1 w) \\ \exp(-\hat{\sigma}_2 w) \\ \exp(-\hat{\sigma}^1 w) \\ \exp(-\hat{\sigma}^2 w) \\ \exp(-\hat{\sigma}^3 w) \end{pmatrix}$$

le:

O cálculo dos elementos $\{B_{ij}\}$ depende dos "Yields" dos produtos de fissão dos diversos grupos, das secções de choque microscópicas e do fluxo, este entrando nos termos que levam em conta a presença do Xe.

Como o fluxo de neutrons ainda não pode ser calculado, pois depende, para uma potência fixa, das fissões produzidas no U-235 e nos plutônios 239 e 241, o cálculo completo dos $\{B_{ij}\}$ não é feito de uma só vez.

Numa primeira etapa, desprezam-se os termos que dependem do fluxo de neutrons; numa segunda etapa a contribuição é considerada.

Na primeira etapa, calculado os $\{B_{ij}\}$ e dado w_0 , uma irradiação inicial - que não pode ser nula pois aparece uma expressão do tipo $(1 - \exp(-\sigma w)) / \sigma w$ que tende a 1 quando $w \rightarrow 0$, mas que no computador resulta em "overflow" - obtêm-se todos os $\{B_{ij}\}$.

Calcula-se a seguir termos do tipo

$$\frac{\bar{Y}_{Pu}}{(1+\bar{B})}$$

integrando entre 0 e w_0 a expressão

$$\frac{Y_{Pu}}{(1+B)}$$

função de w através somente de uma exponencial.

Tem-se, assim, valores médios, no intervalo de irradiação 0 — w_0 , para todos os termos tipo A, Y e F, inclusive produtos de fissão.

O conhecimento das fissões produzidas pelo plutônio presente permite calcular o fluxo máximo ϕ_{max} , conhecido como dado de entrada a potência máxima gerada no elemento combustível.

expôsto ao fluxo máximo. De ϕ_{\max} passa-se a ϕ_{eff} , supondo uma distribuição cossenoidal do fluxo radial. E, como o ϕ_{eff} pode-se recalcular os $\{B_{ij}\}$ agora completo, incluindo o efeito dos produtos de fissão de alta secção de choque como o xenon, o samário e outros. Teoricamente, dever-se-ia iterar este processo até que os $\{B_{ij}\}$ não variassem; mas no programa canadense isto não é feito, devendo acarretar erros no valor final da queima.

Conhecidas as matrizes $\{C_{ij}\}$ e $\{B_{ij}\}$, tem-se a composição média do elemento combustível correspondente à irradiação w_0 e pode-se calcular completamente o restante dos fatores do reticulado.

O cálculo de f , feito logo a seguir, se baseia numa teoria desenvolvida por Kushneriuk e descrita no relatório CTR-712 ou AECL-462 (1957).

Calcula-se inicialmente o fator de utilização térmica de todo o tubo de pressão e não do elemento combustível (UO_2); a seguir calcula-se a denominada "blackness" ou "negrura" do tubo de pressão β_N .

β_N é definido como sendo a fração de neutrons que, incidindo no conjunto inhomogêneo que é o tubo de pressão, é absorvido neste conjunto.

Para o cálculo de β_N utiliza-se uma teoria que leva em conta as probabilidades de um neutron atravessar uma dada camada sem absorção - as transmissões - e as probabilidades de absorção nas camadas.

Calcula-se, também, β_0 - negrura - do elemento combustível homogeneizado, utilizando-se uma teoria que se aproxima da descrita no livro "Introduction to the Theory of Neutron Diffusion" de Case, Hoffmann e Placzek.

Conhecidas as transmissões e as negruras do tubo de

pressão β_N e a do elemento combustível homogeneizado β_0 , obtem-se f_0 , fração de neutrons absorvidos neste elemento combustível homogeneizado. Então, o cálculo de f , fração de neutrons absorvidos no urânio, torna-se imediato.

O cálculo da área de difusão é feita através de um método descrito em CRRP-655; interpretando as fórmulas, pode-se ver que o cálculo utiliza uma média ponderada das áreas de difusão dos diversos materiais constitutivos da célula do reticulado, com um peso estatístico proporcional à absorção de neutrons em cada camada e à secção de choque total nessa camada.

A produção de plutônio é imediata pois conhecido o valor de \bar{B} e obtendo da matriz $\{B_{ij}\}$ o valor de $\bar{Y}_{Pu}/(1+\bar{B})$, obtem-se logo \bar{Y}_{Pu} . Neste trabalho, foram calculados, também, os números de átomos dos diversos plutônios formados, utilizando a matriz $\{C_{ij}\}$ e o valor \bar{B} .

Finalmente dispõe-se de todos os elementos para calcular $\bar{\eta}$, valor médio de η , levando em conta a contribuição do Pu-239 e Pu-241 e evidentemente do U-235.

II.6 - Curvatura material, em teoria de dois grupos

Fica-se, assim, de posse de todos os elementos para o cálculo de B_m^2 , este dado em teoria de dois grupos.

A curvatura material em teoria de dois grupos é dada por:

$$B_m^2 = \frac{1}{2} \left[\left[\left(\frac{1}{L_s^2} + \frac{1}{L^2} \right)^2 + \frac{4(k-1)}{L_s^2 L^2} \right]^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{1}{L_s^2} + \frac{1}{L^2} \right) \right]$$

O fator k (k infinito) pode ser determinado uma vez que todos os seus fatores já foram calculados.

$$k = \epsilon p f \bar{\eta}$$

II.7 - k efetivo em função da irradiação

Uma vez conhecidos k infinito, áreas de moderação e difusão e a curvatura material, k_{eff} (k efetivo) é imediatamente calculado em teoria de dois grupos.

$$k_{\text{eff}} = \frac{k e^{-B_m^2 \tau}}{1 + L^2 B_m^2}$$

Como B_g^2 , curvatura geométrica, é dado de entrada, a comparação entre B_g^2 e B_m^2 fornece imediatamente uma verificação se o reator está crítico, sub-crítico ou super-crítico.

Se, por exemplo, $B_m^2 > B_g^2$, haverá excesso de reatividade e, em particular, pode-se calcular um k efetivo dado pela fórmula acima.

Sendo $B_m^2 > B_g^2$, pode-se dar um acréscimo a w_0 passando a $(w_0 + \Delta w)$, ou seja, aumentando a irradiação e voltando ao início do "loop" do programa, obtém-se todos os resultados em função desta nova irradiação.

Nota: No decorrer do estudo sobre o programa descrito no CRRP-873, verificou-se que muitas fórmulas apresentam erros de tipografia, ou omissão de fatores. Correções foram então, feitas ao usá-las neste trabalho.

III - O PROGRAMA

A listagem do programa "Evolução do Combustível" é a que segue, onde os dados de entrada são:

<u>FORTRAN</u>	<u>PROBLEMA</u>	<u>SIGNIFICADO</u>
N		número de meios, sem considerar o moderador
FA	f_A	fração do espectro de fissão acima do limiar da fissão do U-238
ENUTH	ν_{th}	número de neutrons produzidos por fissão térmica
ENUF	ν	número de neutrons produzidos por fissão rápida
T_c	T_c	temperatura do refrigerante ($^{\circ}C$)
AF	A	número de massa do combustível (ex: UO_2)
TM	T_m	temperatura do moderador ($^{\circ}C$)
SIFT	$\sigma_F(TOT)$	valor médio, sobre a parte rápida ($>1,4$ MeV), do espectro de fissão, da secção do choque total do U-238 (barn)
SIFF	$\sigma_F(f)$	valor médio, sobre a parte rápida (1,4 MeV), do espectro de fissão, da secção de choque de fissão do U-238 (barn)
SIFI	$\sigma_F(i)$	valor médio, sobre a parte rápida ($>1,4$ MeV) do espectro de fissão, da secção de choque inelástica do urânio (barn)
SISE	$\sigma_S(e)$	valor médio, sobre a parte rápida ($>1,4$ MeV) do espectro de fissão da secção de choque elástica da camisa (barn)

<u>FORTTRAN</u>	<u>PROBLEMA</u>	<u>SIGNIFICADO</u>
SIDE	$\sigma_D(e)$	valor médio, sobre a parte rápida (>1,4 MeV) do espectro de fissão, da secção de choque elástica do deutério (barn)
SIOE	$\sigma_O(e)$	valor médio, sobre a parte rápida (>1,4 MeV) do espectro de fissão, da secção de choque elástica do oxigênio (barn)
SIFE	$\sigma_F(e)$	valor médio, sobre a parte rápida (>1,4 MeV) do espectro de fissão, da secção de choque elástica do urânio (barn)
TN	T_n	temperatura dos neutrons ($^{\circ}C$)
RO	r_o	raio da região do combustível
ROF	ρ_F	densidade do combustível (g/cm^3)
BL	b	raio equivalente da célula (cm)
W	w	número de barras no elemento combustível
RB	r_b	raio de uma barra do elemento combustível (cm)
RBS		raio da camisa de cada barra do elemento combustível (cm)
RN5N8	$N_5(o)/N_8$	relação de número de átomos de U-235 inicial para U-238
R	r	índice epitérmico de Westcott
ENS	N_s	número de átomos da camisa por centímetro cúbico

<u>FORTRAN</u>	<u>PROBLEMA</u>	<u>SIGNIFICADO</u>
CANAL	N_c	número de canais
DELRR	$\frac{\Delta R}{R}$	ΔR = economia radial do refletor R = raio do reator
H	H	altura do reator (cm)
RS(N)	R_N	raio da camada cilíndrica mais externa da calandria (cm)
TF	T_F	temperatura do combustível ($^{\circ}C$)
SMRTS	$(\sigma_t^x)_s$	secção de choque de transporte na região de ressonância para a camisa
ENU(1)	ν_5	número de neutrons por fissão do U-235
ENU(2)	ν_9	número de neutrons por fissão do Pu-239
ENU(3)	ν_1	número de neutrons por fissão do Pu-241
YPF(J)	Y_j	"Yield" dos produtos de fissão de alta secção de choque que não o Xe, provenientes da fissão do nuclídeo j.
YXE(J)	$Y_j(Xe)$	"Yield" do xenon proveniente da fissão do nuclídeo j.
Y1(J)	Y_j^1	"Yield" do primeiro pseudo produto de fissão do nuclídeo j
Y2(J)	Y_j^2	"Yield" do segundo pseudo produto de fissão do nuclídeo j
Y3(J)	Y_j^3	"Yield" do terceiro pseudo produto de fissão do nuclídeo j

<u>FORTTRAN</u>	<u>PROBLEMA</u>	<u>SIGNIFICADO</u>
SAL	$\hat{\sigma}^1$	secção de choque de absorção do pseudo produto de fissão do tipo 1
SA2	$\hat{\sigma}^2$	secção de choque de absorção do pseudo produto de fissão do tipo 2
SA3	$\hat{\sigma}^3$	secção de choque de absorção do pseudo produto de fissão do tipo 3
SISS	$(\sigma_s)_s$	secção de choque de espalhamento elástico térmico para a camisa
SMISS	$(\sigma_{2200})_s$	secção de choque de absorção da camisa a 2200 m/s
L		indicador da iteração de cálculo
BDAXE	λ_{xe}	constante de decaimento do Xenon (s^{-1})
SAXE	$\hat{\sigma}_{xe}$	secção de choque microscópica de absorção do Xenon
SMIC	σ_c	secção de choque microscópica de absorção do refrigerante
ROM20	$\rho_m(20)$	densidade do moderador a 20°C
ELSQ20	L_{Sn}^2	área de moderação do moderador puro a 20°C (cm^2)
RT	R_T	potência específica linear da barra de combustível (kw/cm)
YMI	Y	fração da energia de fissão transferida diretamente ao moderador

<u>FORTTRAN</u>	<u>PROBLEMA</u>	<u>SIGNIFICADO</u>
WO	w_0	irradiação inicial (reator "clean")
ETAL	η	η do reator "clean"
DELWO	Δw	acrêscimo de irradiação
AS	A_s	massa atômica da camisa
RS(I)	r_i	raio externo da região i (cm) R (1) = R0 = raio do combustível
EN(I)	N_i	número de átomos por centímetro cúbico do nuclídeo i
SMIS(I)	$(\hat{\sigma}_{2200})_i$	secções de choque de absorção da região i a 2200 m/s
AC(I)	$a_i = \Sigma_{si} / \Sigma_{SM}$	
SMISSE(I)	$(\sigma_s)_i$	secções de choque de espalhamento da região i
ASE(I)	A_i	massa atômica da região i
EXTRA(I)		palavras, símbolos, ou números que se queira imprimir; por exemplo: título, identificação do programa, data etc.

```

DEFINE DISK(10,100)
C  PRGR/ IA * EVOLUCAO DO COMRUSTIVEL *
C  CALCULO DE UM RETICULADO DE U-NAT. E D20
C  CALCULO DA PRODUCAO DE PLUTONIO
C  L=INDICE DE ITERACAO
C  L=1          CASO WO=0          ( LE-SE L=0 )
C  N=NUMERO DE MEIOS,MAS NAO SE DEVE CONSIDERAR O MODERADOR
C  W=NUMERO DE BARRAS DO * BUNDLE *
C  HAO HA CONDICAO DE CHAVES
DIMENSION SA(6),SF(3),C(5,6),RS(6),ENU(3),ETA(3),B(8,9)
DIMENSION YPF(3),YXE(3),Y1(3),Y2(3),Y3(3)
READ1003,N,FA,ENUTH,ENUF,TC,AF,TM
1003 FORMAT(12,7E10.4)
1001 FORMAT(7E10.4)
READ1001,SIFT,SIFF,SIFI,SISE,SIDE,SIOE,SIFE
READ1001,TN,RO,ROF,BL,W,RB,RBS
READ1001,RN5N8,R,ENS,CANAL,DELRR,H
READ1001,RS(N),TF,SMRTS,ENU(1),ENU(2),ENU(3)
DO201 J=1,3
201 READ1001,YPF(J),YXE(J),Y1(J),Y2(J),Y3(J)
READ1001,SA1,SA2,SA3,SISS,SMISS
G8=2.72408+.68E-4*TN
SA(4)=1.*G8
G5=.98028689-.2765224E-3*TN+.3288515E-6*TN**2+ 14556104E-9*TN**3+.
168549093E-12*TN**4+.42159269E-15*TN**5
S5=.30235865E-1+.61796973E-3*TN-.52148255E-6*TN**2+.240468E-9*TN**
13-.47995706E-11*TN**4+.75870714E-14*TN**5
SA(1)=.6935E+3*(G5+R*S5)
G9=.10583254E+1+.72051813E-3*TN+.27988453E-5*TN**2+.49630944E-8*TN
1**3-.86540512E-11*TN**4
S9=.22535892E+1+.30538960E-2*TN-.22746142E-4*TN**2+.9134616E-7*TN*
1*3-.35705766E-9*TN**4+.39700942E-12*TN**5
SA(2)=.10311E+4*(G9+R*S9)
G0=.10221327E+1+.28046930E-3*TN+.5136544E-7*TN**2+.23844295E-9*TN*
1*3-.20249991E-12*TN**4
S0=.31889134E+2+.580707E-1*TN-.5937863E-4*TN**2+.12259234E-6*TN**3
1-.2176E-9*TN**4+.17675098E-12*TN**5
SA(5)=.225E+3*(G0+R*S0)
G1=.10347797E+1+.44469751E-3*TN+.16302641E-5*TN**2-.2482952E-9*TN*
1*3-.19145171E-11*TN**4
S1=.82895602+.38263869E-3*TN-.42447122E-5*TN**2-.8991283E-8*TN**3-
1.19138426E-10*TN**4+.70824871E-13*TN**5
SA(3)=.139746E+4*(G1+R*S1)
G2=1.0050466+.67742094E-4*TN-.20187859E-7*TN**2+.10783927E-9*TN**3
1-.12904669E-12*TN**4
SA(6)=30.*(G2+R**14.3)
GF5C=.98077427-.27629440E-3*TN+.31631852E-6*TN**2+.38246E-11*TN**3
1-.23130377E-12*TN**4
SF5C=-.055041386+.46828216E-3*TN-.30248245E-6*TN**2-.548817E-10*TN
1**3-.38627439E-11*TN**4+.62820898E-14*TN**5
SF(1)=582.8*(GF5C+R*SF5C)
GF9C=1.0391669+.50261298E-3*TN+.20441175E-5*TN**2+.45008556E-8*TN*
1*3-.73258506E-11*TN**4
SF9C=1.715487+.23977917E-2*TN-.16288859E-4*TN**2+.6899573E-7*TN**3
1-.28771654E-9*TN**4+.32570714E-12*TN**5
SF(2)=747.73*(GF9C+R*SF9C)
GF1C=1.0347797+.44469751E-3*TN+.16302645E-5*TN**2-.2482952E-9*TN**
13-.19145171E-11*TN**4
SF1C=.82895602+.38263869E-3*TN-.42447122E-5*TN**2-.89912830E-8*TN*
1*3-.19138426E-10*TN**4+.70824871E-13*TN**5
SF(3)=.101522E+4*(GF1C+R*SF1C)
DO200 I=1,5
DO200 J=1,6
200 C(I,J)=0.

```

```

SC1=SA(3)-SF(3)
SC9=SA(2)-SF(2)
C(2,1)=SA(4)
C(3,1)=SA(4)*SC9/SA(2)
C(4,1)=C(3,1)
C(5,1)=C(3,1)*SC1/SA(3)
C(1,2)=RN5N8*SA(1)
C(2,3)=-SA(4)
C(3,3)=C(3,1)*SA(5)/(SA(2)-SA(5))
C(4,3)=-C(3,3)*SA(3)/(SA(2)-SA(3))
C(5,3)=-C(4,3)*SC1*SA(6)/(SA(3)*(SA(2)-SA(6)))
C(3,4)=-C(3,3)*SA(2)/SA(5)
C(4,4)=C(3,4)*SA(3)/(SA(3)-SA(5))
C(5,4)=-C(4,4)*SC1/SA(3)*SA(6)/(SA(5)-SA(6))
C(4,5)=-C(3,1)*SA(5)/(SA(3)-SA(5))*SA(2)/(SA(3)-SA(2))
C(5,5)=-C(4,5)*SC1/SA(3)*SA(6)/(SA(3)-SA(6))
C(5,6)=-SC1/SA(3)*C(3,1)*SA(2)/(SA(2)-SA(6))*SA(3)/(SA(3)-SA(6))*S
IA(5)/(SA(5)-SA(6))
VF=W*3.1416*RB**2
VS=W*3.1416*(RBS**2-RB**2)
VC=3.1416*RO**2-VF-VS
CT=(3.1416/4.*293.2/(TN+273.2))**.5
CALL DENS(TC,ROC)
END=2.*.6023E+24*ROC/20.03
ENF=.6023E+24*ROF/AF
ENO=.6023E+24*ROC/20.03
VT=VF+VS+VC
STM=(ENF*VF*SIFT+ENS*VS*SISE+END*VC*SIDE+ENO*VC*SIOE)/VT
SEM=(ENF*VF*SIFE+ENS*VS*SISE+ENO*VC*SIOE)/VT
SIM=(ENF*VF*SIFI+END*VC*SIDE)/VT
SFM=ENF*VF*SIFF/VT
X=RO*STM
CALL PROB(X,PC)
D=1.-(ENUF*FA*SFM+SEM)*PC/STM
GAMA=FA*ENUTH*SFM*PC/(STM*D)
D=SIM/SFM
EPS=1.+4.87*GAMA*(1.-GAMA*(1.0243*D-.322))/(1.-GAMA*(.7245*D-.429)
1)
VM=3.1416*(BL**2-RS(N)**2)
SUI=2.*3.1416*RB
SUA=W*SUI
SU0=2.*3.1416*RU
VCI=VC/W
D=2.*VCI/SUI
SRSC=.319219*ROC
X=D*SRSC
E3=.5-.96154981*X+1.14066218*X**2-1.7283314*X**3+1.0709008*X**4
A=(1.-2.*E3)*(SUA-SU0)
EM=ROF*VF
BR=.202876E-3*EM/RO**2
SRTF=.0361*ROF
SRTS=ENS*SMRTS
SRTC=.2451796*ROC
SRT0=(SRTF*VF+SRTS*VS+SRTC*VC)/VT
SEFFM1=(SU0+A)/EM
R11=10.1+30.*SEFFM1
1107 SR0=R11*BR
SRTOT=SRT0+SR0
QMQR=3.*SRTOT*SR0*(1.-2.*SR0/(5.*SRTOT))**2
SRTFM1=10.1E-24*(1.+7956E-4*(TF-20.1))
X=QMQR*RO**2
G0=1.+125*X-.0052083333*X**2+.00032552*X**3
SEFFM=(SU0+A/G0)/EM
RI=SRTFM1*(1./G0+2.970297*SEFFM)

```

```

COMP =(R1-R11)/R11
IF(COMP)1120,1120,1130
1120 COMP=-COMP
GO TO 1130
1130 IF(COMP-.5E-3)1105,1105,1106
1106 R11=R1
GO TO 1107
1105 TOINF=-0.18615763E+21*VF*R1
PTINF=EXP(TOINF)-1.
PTINFZ=PTINF/1.8418995
RAIO=BL*CANAL**.5/(1.-DELRR)
RL=BL*CANAL**.5
BUCKL=(2.4048/RAIO)**2+(3.1416/H)**2
DELR=RAIO-RL
SRI=0.
PTI=1.
SOV=0.
SACV=0.
STI=0.
CALL DENS(TM,ROM)
STRM=ROM*(.2569182+.1104385*CT)
QMQ=.20817649E-3*ROM*STRM*CT
X=RS(N)*STRM
G=.623*X/(.498+X)+.36*X/(.89925+X)**14
XX=QMQ*BL**2/2.*(BL*BL/(BL*BL-RS(N)**2))*LOG(BL/RS(N))-3./4.+1./4
1.*(RS(N)/BL)**2)
SIMGBM=.69392163E-4*ROM*CT
Z4=1.+XX-3./2.*SIMGBM/RS(N)*(BL**2-RS(N)**2)*G
SSF=.0410695*ROF
SSS=ENS*SISS
SSM=1.188*STRM*ROC/ROM
S2OC=.69392163E-4*ROC
S2OS=ENS*SMISS
SOS=(VF*SSF+VS*SSS+VC*SSM)/VT
D0205 J=1,3
205 ETA(J)=SF(J)*ENU(J)/SA(J)
B(1,2)=C(1,2)
B(2,2)=C(1,2)*ETA(1)
B(3,2)=B(2,2)/ENU(1)
B(6,1)=C(2,1)*ETA(2)+C(4,1)*ETA(3)
B(6,3)=C(2,3)*ETA(2)+C(4,3)*ETA(3)
B(6,4)=C(4,4)*ETA(3)
B(6,5)=C(4,5)*ETA(3)
B(7,1)=C(2,1)*ETA(2)/ENU(2)+C(4,1)*ETA(3)/ENU(3)
B(7,3)=C(2,3)*ETA(2)/ENU(2)+C(4,3)*ETA(3)/ENU(3)
B(7,4)=C(4,4)*ETA(3)/ENU(3)
B(7,5)=C(4,5)*ETA(3)/ENU(3)
B(5,1)=C(2,1)+C(3,1)+C(4,1)+C(5,1)
B(5,3)=C(2,3)+C(3,3)+C(4,3)+C(5,3)
B(5,4)=C(3,4)+C(4,4)+C(5,4)
B(5,5)=C(4,5)+C(5,5)
B(5,6)=C(5,6)
B(4,7)=-B(3,2)*SA1*Y1(1)/(SA1-SA(1))
B(4,8)=-B(3,2)*SA2*Y2(1)/(SA2-SA(1))
SA11=SA1*Y1(3)
SA22=SA2*Y2(3)
SA33=SA3*Y3(3)
B(8,2)=0.
B(8,6)=0.
B(8,7)=-ETA(2)/ENU(2)*(C(2,1)*Y1(2)+C(2,3)*SA1*Y1(2)/(SA1-SA(2)))-
1ETA(3)/ENU(3)*(C(4,1)*Y1(3)+C(4,3)*SA11/(SA1-SA(2))+C(4,4)*SA11/(S
IA1-SA(5))+C(4,5)*SA11/(SA1-SA(3)))
B(8,8)=-ETA(2)/ENU(2)*(C(2,1)*Y2(2)+C(2,3)*SA2*Y2(2)/(SA2-SA(2)))-
1ETA(3)/ENU(3)*(C(4,1)*Y2(3)+C(4,3)*SA22/(SA2-SA(2))+C(4,4)*SA22/(S
IA2-SA(5))+C(4,5)*SA22/(SA2-SA(3)))

```

B(8,9)=-ETA(2)/ENU(2)*(C(2,1)*Y3(2)+C(2,3)*SA3*Y3(2)/(SA3-SA(2)))-
1ETA(3)/ENU(3)*(C(4,1)*Y3(3)+C(4,3)*SA33/(SA3-SA(2))+C(4,4)*SA33/(S
1A3-SA(5))+C(4,5)*SA33/(SA3-SA(3)))

I=1

RECORD(1) R0,ROF,BL,ENS,SA(1),SA(2),SA(3),SA(4),SA(5),SA(6),SF(1),
1SF(2),SF(3),C(2,1),C(3,1),C(4,1),C(5,1),C(1,2),C(2,3),C(3,3),C(4,3
1),C(5,3),C(3,4),C(4,4),C(5,4),C(4,5),C(5,5),C(5,6),VF,VS,VC,VT,GAM
1A,CT,BUCKL,RN5N8,ROC,ROM,STRM,SIMGBM,SSF,SSM,EPS,QMQ,SRI,PTI,SOV,S
1TI,SACV,VM

RECORD(1) PTINFZ,G,XX,Z4,ENU(1),ENU(2),ENU(3),ETA(1),ETA(2),ETA(3)
1,B(1,2),B(2,2),B(3,2),B(6,1),B(6,3),B(6,4),B(7,1),B(7,3),B(7,4),B(
17,5),B(6,5),B(5,1),B(5,3),B(5,4),B(5,5),B(5,6),SA1,SA2,SA3,SISS,SM
1ISS,YPF(1),YPF(2),YPF(3),YXE(1),YXE(2),YXE(3),Y1(1),Y1(2),Y1(3)

RECORD(1)Y2(1),Y2(2),Y2(3),Y3(1),Y3(2),Y3(3),SSS,B(4,7),B(4,8),SA1
11,SA22,SA33,B(8,2),B(8,6),B(8,7),B(8,8),B(8,9),S20C,S20S,S0S

CALL LINK(PARTE2)

END

22034 CORES USED
39999 NEXT COMMON
END OF COMPILATION

```

DEFINE DISK(10-100)
DIMENSION YEF(3), YPF(3), YXE(3), ENU(3), ETA(3), SF(3), SA(6), B(8,9), C(
15,6), Y1(3), Y2(3), Y3(3), U(6), EXTRA(18)
DIMENSION EN(6), RS(6), SIB(6), Y(6), Z(6), PSI(6), PSI1(6), TT(6)
DIMENSION SMIS(6), V(6), AC(6), SMISSE(6), ASE(6), STR(6), FI(6)
I=1
FETCH(I) RO, ROF, BL, ENS, SA(1), SA(2), SA(3), SA(4), SA(5), SA(6), SF(1), S
1F(2), SF(3), C(2,1), C(3,1), C(4,1), C(5,1), C(1,2), C(2,3), C(3,3), C(4,3)
1, C(5,3), C(3,4), C(4,4), C(5,4), C(4,5), C(5,5), C(5,6), VF, VS, VC, VT, GAMA
1, CT, BUCKL, RN5N8, ROC, ROM, STRM, SIMGBM, SSF, SSM, EPS, QMQ, SRI, PTI, SOV, ST
11, SACV, VM
  FETCH(I) PTINFZ, G, XX, Z4, ENU(1), ENU(2), ENU(3), ETA(1), ETA(2), ETA(3),
1D(1,2), B(2,2), B(3,2), B(6,1), B(6,3), B(6,4), B(7,1), B(7,3), B(7,4), B(7
1,5), B(6,5), B(5,1), B(5,3), B(5,4), B(5,5), B(5,6), SA1, SA2, SA3, S1SS, SM1
1SS, YPF(1), YPF(2), YPF(3), YXE(1), YXE(2), YXE(3), Y1(1), Y1(2), Y1(3)
  FETCH(I) Y2(1), Y2(2), Y2(3), Y3(1), Y3(2), Y3(3), SSS, B(4,7), B(4,8), SA1
11, SA22, SA33, B(8,2), B(8,6), B(8,7), B(8,8), B(8,9), S20C, S20S, SOS
  READ 700, N, L, BDAKE, SAXE, SMIC, ROM20, ELSO20
700 FORMAT(2I3, 6E10.4)
  READ1002, RT, YMI, WO, ETAL, DELWO, AS
1002 FORMAT(7E10.4)
  DO 3 I=2, N
  READ705, RS(I), EN(I), SMIS(I), AC(I)
  3 READ705, SMISSE(I), ASE(I)
705 FORMAT(5E14, 8)
  READ90, (EXTRA(I), I=1, 18)
90 FORMAT(18A4)
  PRINT 70
70 FORMAT(18X, 36HPROGRAMA * EVOLUCAO DO COMBUSTIVEL *//)
  PRINT80, (EXTRA(I), I=1, 18)
80 FORMAT(18A4////)
  RS(1)=R0
  DO701 I=2, N
  V(I)=3.1416*(RS(I)**2-RS(I-1)**2)
  SOV=SOV+V(I)
  SACV=SACV+AC(I)*V(I)
  STR(I)=EN(I)*SMISSE(I)*(1.-2./(3.*ASE(I)))
  SIB(I)=EN(I)*SMIS(I)*CT
  Y(I)=R0/RS(I)
  CALL ARCSIN(Y, I, PSI)
  Z(I)=R0/RS(I-1)
  CALL ARCSIN(Z, I, PSI1)
701 TT(I)=1.-2./3.1416*SIB(I)*((RS(I)**2-R0**2)**0.5-(RS(I-1)**2-R0**2
1)**0.5+RS(I)**2/R0*PSI(I)-RS(I-1)**2/R0*PSI1(I))
  DO703 I=2, N
  PTI=PTI*TT(I)
  SRI=SRI+(RS(I)**2-RS(I-1)**2)*SIB(I)
703 STI=STI+1.-TT(I)
  Z1=R0/RS(N)*PTI
  Z2=Z1-R0/RS(N)*STI
  Z3=2./RS(N)*SRI
  TALLM=(VM+ROC*VC/ROM+SACV)*(VM+ROC*VC/ROM)/(VM+VC+SOV)**2
  X=121.88615/((ROM*BL)**2*TALLM)
  FF=1.5428604+.98281908*X+1.7800865*X**2-.578075*X**3+.090593428*X*
1*4-.0055230829*X**5
  P=FF*TALLM*PTINFZ+1.
  ELSQ=ELSQ20*ROM20/(ROM*TALLM)
  1 L=L+1
  IF(L-1)81, 81, 82
81 GO TO 85
82 EPSL=.12651*GAMA*(1.+2.532*GAMA)/(1.-2.431*GAMA)
  DD=EPSL+EPS*(1.-P)/(1.+BUCKL*ELSO)
  DO2005 I=1, 6
2005 U(I)=(1.-EXP(-SA(I)*WO))/(SA(I)*WO)

```

```

U1=(1.-EXP(-SA1*WO))/(SA1*WO)
U2=(1.-EXP(-SA2*WO))/(SA2*WO)
U3=(1.-EXP(-SA3*WO))/(SA3*WO)
YB5=B(2,2)*U(1)
YBP=B(6,1)+B(6,3)*U(2)+B(6,4)*U(5)+B(6,5)*U(3)
EB=DD*(YB5+YBP)/(SA(4)-DD*YBP)
FD5=B(3,2)*U(1)
FBP=B(7,1)+B(7,3)*U(2)+B(7,4)*U(5)+B(7,5)*U(3)
Q5=(1.+GAMA)*(1.-YMI)*(.32E-16*FB5+.33E-16*FBP*(1.+BB))
PHIMAX=1.E+21*RT/(.22307E+22*VF*ROF*Q5)
PHIEF=.6*PHIMAX
DO 207 J=1,3
207 YEF(J)=YXE(J)/(1.+BDAXE/(SAXE*PHIEF))+YPF(J)
B(4,2)=B(3,2)*(SA1*Y1(1)/(SA1-SA(1))+SA2*Y2(1)/(SA2-SA(1))+YEF(1))
B(8,1)=C(2,1)*ETA(2)/ENU(2)*(Y1(2)+Y2(2)+Y3(2)+YEF(2))+ETA(3)*C(4,
11)/ENU(3)*(Y1(3)+Y2(3)+Y3(3)+YEF(3))
B(8,3)=C(2,3)*ETA(2)/ENU(2)*(SA1*Y1(2)/(SA1-SA(2))+SA2*Y2(2)/(SA2-
1SA(2))+SA3*Y3(2)/(SA3-SA(2))+YEF(2))+C(4,3)*ETA(3)/ENU(3)*(SA11/(S
1A1-SA(2))+SA22/(SA2-SA(2))+SA33/(SA3-SA(2))+YEF(3))
B(8,4)=C(4,4)*ETA(3)/ENU(3)*(SA11/(SA1-SA(5))+SA22/(SA2-SA(5))+SA3
13/(SA3-SA(5))+YEF(3))
B(8,5)=C(4,5)*ETA(3)/ENU(3)*(SA11/(SA1-SA(3))+SA22/(SA2-SA(3))+SA3
13/(SA3-SA(3))+YEF(3))
APFPUB=B(8,1)+B(8,2)*U(1)+B(8,3)*U(2)+B(8,4)*U(5)+B(8,5)*U(3)+B(8,
16)*U(6)+B(8,7)*U1+B(8,8)*U2+B(8,9)*U3
APUB=B(5,1)+B(5,3)*U(2)+B(5,4)*U(5)+B(5,5)*U(3)+B(5,6)*U(6)
A5=B(1,2)*U(1)
APF5=B(4,2)*U(1)+B(4,7)*U1+B(4,8)*U2
85 IF(L-1)2007,2007,2008
2007 SMIF=RN5N8*SA(1)+SA(4)
GO TO 2009
2008 SMIF=(1.+BB)*(APFPUB+APUB)+A5+APF5+SA(4)
2009 S20F=SMIF*ROF*.0022307
SBO=(S20F*VF+S20S*VS+S20C*VC)*CT/VT
ST=SBO+SOS
X=RO*ST
CALL PROB(X,PC)
IF(X-2.)915,915,916
915 PC1=PC
GO TO 917
916 D=SOS/(SOS+SBO)
A=(3.*(1.-D))*0.5
DZ=.013+.056*RO*ST-.0019*(RO*ST)**2
DEL=0.5*(1.-1./A*LOG(1.+A))*(1.-1./(1.+X*DZ))
PC1=PC-DEL
917 BETA0=2.*SBO*X*(1.-PC)/(SBO+SOS*(1.-PC1))
F1=(1./BETA0*(Z3*Z4/Z1+2.*SIMGBM/(Z1*RS(N))*(BL**2-RS(N)**2))+Z2*Z
14/Z1)*(S20F*VF+S20S*VS+S20C*VC)/(S20F*VF)
F=1./F1
SPI=0.
DO 1308 I=2,N
1308 SPI=SPI+.?.*V(I)*SIB(I)/(3.1416*RS(N))-RO*BETA0*(1.-TT(I))/RS(N)
BETAN=RO*BETA0*PTI/RS(N)+SPI
BDANM=4./(3.*BETAN)-G
FN=1./(1.+XX+3.*SIMGBM*(BL**2-RS(N)**2)*BDANM/(2.*RS(N)))
FO=FN*RO*BETA0*PTI/(RS(N)*BETAN)
DO 1309 I=2,N
1309 FI(I)=(2.*V(I)*SIB(I)/(3.1416*RS(N))-RO*BETA0*(1.-TT(I))/RS(N))*FO
1/(Z1*BETA0)
SFI=0.
SRIS=0.
SFSM=0.
DO 1310 I=2,N

```

```

SF1=SF1+F1(1)
SRIS=SRIS+(RS(1)**2-RS(I-1)**2)*STR(1)
IF(SIB(1))1320,1320,1315
1315 FISIB=F1(1)/SIB(1)
GO TO 1310
1320 FISIB=0.
1310 SFSM=SFSM+FISIB
FM=1.-F0-SF1
STRF=ROF/27.6
STRS=ENS*SISS*(1.-2./(3.*AS))
STRO=(STRF*VF+STRS*VS+STRM*ROC/ROM*VC)/VT
DFS=F0*STRO/(SBO*(SBO+STRO))
ELQ=BL*BL/3.*(DFS+SFSM+FM/SIMGBM)/(RO**2*STRO+SRIS+(BL*BL-RS(N)**2
1)*STRM)
EN5N8=C(1,2)*EXP(-SA(1)*WO)/SA(1)
A4=.22307E+28*1.66E-24
EN5N8=EN5N8*A4*235.
IF(L-1)30,30,31
30 ETAB=RN5N8*SF(1)*ENU(1)/SMIF
BURNUP=0.
GO TO 35
31 ETAB=((1.+BB)*YBP+YB5)/SMIF
A1=EXP(-SA(2)*WO)
A2=EXP(-SA(5)*WO)
A3=EXP(-SA(3)*WO)
EN9N8=(C(2,1)+C(2,3)*A1)/SA(2)*(1.+BB)
EN0N8=(C(3,1)+C(3,3)*A1+C(3,4)*A2)/SA(5)*(1.+BB)
EN1N8=(C(4,1)+C(4,3)*A1+C(4,4)*A2+C(4,5)*A3)/SA(3)*(1.+BB)
EN2N8=(C(5,1)+C(5,3)*A1+C(5,4)*A2+C(5,5)*A3+C(5,6)*EXP(-SA(6)*WO))
1/SA(6)*(1.+BB)
EN9N8=EN9N8*A4*239.
EN0N8=EN0N8*A4*240.
EN1N8=EN1N8*A4*241.
EN2N8=EN2N8*A4*242.
WO1=05*1.E-24*1.E+6*.22307E+28*1.E+24/.864E+11
BURNUP=WO*WO1
35 CAINF=EPS*P*F*ETAB
BUCKLL=.5*((1./ELSQ+1./ELQ)**2+4.*(CAINF-1.)/(ELSQ*ELQ))**.5-(1./
1ELSQ+1./ELQ))
CAEFF=CAINF/((1.+ELQ*BUCKL)*(1.+BUCKL*ELSQ))
PRINT807,BURNUP
807 FORMAT(23X,7HBURNUP=F9.2,1X,12HMWD/TON(UO2)//)
PRINT800,EPS,P
800 FORMAT(7X,4HEPS=E14.8,18X,2HP=E14.8)
PRINT801,F,ETAB
801 FORMAT(9X,2HF=E14.8,16X,4HETA=E14.8)
PRINT802,ELQ,ELSQ
802 FORMAT(8X,3HL2=E14.8,1X,6HCM(+2),9X,4HTAL=E14.8,1X,6HCM(+2))
PRINT803,BUCKL,BUCKLL
803 FORMAT(8X,3HBG=E14.8,1X,6HCM(-2),10X,3HBM=E14.8,1X,6HCM(-2))
PRINT804,CAINF,CAEFF
804 FORMAT(6X,5HKINF=E14.8,16X,4HKEF=E14.8)
IF(L-1)50,50,51
50 PRINT5000
5000 FORMAT(////)
PRINT808,EN5N8
PRINT6000
6000 FORMAT(/////))
51 IF(L-1)22,22,23
23 PRINT805,PHIMAX,PHIEF
805 FORMAT(4X,7HPHIMAX=E14.8,1X,10HN/CM(+2)*S,3X,6HPHIEF=E14.8,1X,10HN
1/CM(+2)*S)

```

```
      PRINT806, SMIF
806  FORMAT(3X, 8HSIGCOMB=E14.8, 1X, 4HBARN////)
      PRINT808, EN5N8
808  FORMAT(5X, 6HU-235=E14.8, 1X, 10HG/TON(UO2))
      PRINT809, EN9N8, EN0N8
809  FORMAT(4X, 7HPU-239=E14.8, 1X, 10HG/TON(UO2), 2X, 7HPU-240=E14.8, 1X, 10H
1G/TON(UO2))
      PRINT810, EN1N8, EN2N8
810  FORMAT(4X, 7HPU-241=E14.8, 1X, 10HG/TON(UO2), 2X, 7HPU-242=E14.8, 1X, 10H
1G/TON(UO2)/////))
22  IF(BUCKLL-BUCKL)41,40,40
40  WO=WO+DELWO
      GO TO 1
41  CONTINUE
      CALL LINK(PARTE1)
      END
24662 CORES USED
39999 NEXT COMMON
END OF COMPILATION
```

‡FOR 5

```

SUBROUTINE ARCSIN(Y,I,PSI)
DIMENSION Y(6),PSI(6)
PSI(1)=1.5707963-.2145988*Y(1)+.38978987E-1*Y(1)**2-.50174305E-1*Y
1(1)**3+.30891981E-1*Y(1)**4-.17088126E-1*Y(1)**5+.66700901E-2*Y(1)
1**6-.12624911E-2*Y(1)**7
PSI(1)=PSI(1)*(1.-Y(1))**0.5
PSI(1)=5.1416/2.-PSI(1)
RETURN
END

```

‡1636 CORES USED
‡9999 NEXT COMMON
END OF COMPILATION
END OF JOB

‡‡JOB

‡‡FOR 5

```

SUBROUTINE DENS(T,RO)
RO=1.1037852+.436049E-3*T-.2719803E-4*T**2+.6369682E-6*T**3-.10842
196E-7*T**4+.11553443E-9*T**5-.7726565E-12*T**6+.3238892E-14*T**7-.
1825745E-17*T**8+.1169976E-19*T**9-.70650891E-23*T**10
RETURN
END

```

‡0944 CORES USED
‡9999 NEXT COMMON
END OF COMPILATION
END OF JOB

‡‡JOB

‡‡FOR 5

```

SUBROUTINE PROB(X,PC)
PC=1.2848499*X-1.5593002*X**2+1.9045371*X**3-1.9773858*X**4+1.5274
1693*X**5-.83322409*X**6+.31371108*X**7-.79470296E-1*X**8+.12908997
1E-1*X**9-.12133104E-2*X**10+.50143867E-4*X**11
RETURN

```

‡0009 I2848499‡1
‡0996 CORES USED
‡9999 NEXT COMMON
END OF COMPILATION

IV - UM EXEMPLO

Para teste do programa, foram feitos os cálculos para o reator canadense NPD-2, em operação desde 1961.

Os dados necessários de entrada foram tirados de "The Canadian NPD-2 - Power Station" Proc. Conf. Genebra - 1958, vol.

8.

PROGRAMA * EVOLUCAO DO COMBUSTIVEL *

CALCULO PARA O REATOR MPD 20/8/1965 WSH

BURNUP= 0.00 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .93640858E+00	ETA= .13114887E+01
L2= .24218805E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .30309650E-03 CM(-2)
KINF= .11165007E+01	KEF= .10463400E+01

U-235= .61870938E+04 G/TON(UO2)

BURNUP= 311.21 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .93853259E+00	ETA= .12689677E+01
L2= .23592674E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .22051000E-03 CM(-2)
KINF= .10827520E+01	KEF= .10157876E+01
PHIMAX= .45387703E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .27232621E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .78762448E+01 BARN	

U-235= .57858085E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .31780226E+03 G/TON(UO2)	PU-240= .67579240E+01 G/TON(UO2)
PU-241= .17712573E+00 G/TON(UO2)	PU-242= .37581687E-02 G/TON(UO2)

BURNUP= 627.77 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .93904164E+00	ETA= .12712416E+01
L2= .23442484E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .22804500E-03 CM(-2)
KINF= .10852805E+01	KEF= .10184135E+01
PHIMAX= .45001701E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .27001020E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .79727278E+01 BARN	

U-235= .54105502E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .59830789E+03 G/TON(UO2)	PU-240= .25305074E+02 G/TON(UO2)
PU-241= .12968030E+01 G/TON(UO2)	PU-242= .31025900E-01 G/TON(UO2)

BURNUP= 948.21 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .93950190E+00	ETA= .12722000E+01
L2= .23306970E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .23244000E-03 CM(-2)
KINF= .10366311E+01	KEF= .10199199E+01
PHIMAX= .44690515E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26814309E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .80619634E+01 BARN	

U-235= .50596303E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .84556665E+03 G/TON(UO2)	PU-240= .53311171E+02 G/TON(UO2)
PU-241= .40093834E+01 G/TON(UO2)	PU-242= .13968224E+00 G/TON(UO2)

BURNUP= 1271.34 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .93991923E+00	ETA= .12720792E+01
L2= .23183836E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .23422150E-03 CM(-2)
KINF= .10870105E+01	KEF= .10204889E+01
PHIMAX= .44442295E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26665377E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .81446367E+01 BARN	

U-235= .47314709E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .10632670E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .88764732E+02 G/TON(UO2)
PU-241= .37084684E+01 G/TON(UO2)	PU-242= .40827127E+00 G/TON(UO2)

BURNUP= 1596.18 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .94029980E+00	ETA= .12710666E+01
L2= .23071729E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .23381100E-03 CM(-2)
KINF= .10865850E+01	KEF= .10202832E+01
PHIMAX= .44247266E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26548359E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .82214278E+01 BARN	

U-235= .44245952E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .12547481E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .12994207E+03 G/TON(UO2)
PU-241= .15590604E+02 G/TON(UO2)	PU-242= .92671980E+00 G/TON(UO2)

BURNUP= 1921.94 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .94064802E+00	ETA= .12693261E+01
L2= .22969269E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .23158150E-03 CM(-2)
KINF= .10854990E+01	KEF= .10194403E+01
PHIMAX= .44097151E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26458290E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .82929282E+01 BARN	

U-235= .41376226E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .14230182E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .17537749E+03 G/TON(UO2)
PU-241= .24704567E+02 G/TON(UO2)	PU-242= .17904877E+01 G/TON(UO2)

BURNUP= 2247.98 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .94096826E+00	ETA= .12669880E+01
L2= .22874783E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .22783600E-03 CM(-2)
KINF= .10838684E+01	KEF= .10180720E+01
PHIMAX= .43984984E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26390990E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .83597152E+01 BARN	

U-235= .38692632E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .15707762E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .22383228E+03 G/TON(UO2)
PU-241= .35990289E+02 G/TON(UO2)	PU-242= .30938206E+01 G/TON(UO2)

BURNUP= 2573.81 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .94126328E+00	ETA= .12641689E+01
L2= .22787932E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .22283850E-03 CM(-2)
KINF= .10817958E+01	KEF= .10162749E+01
PHIMAX= .43904897E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26342938E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .84222541E+01 BARN	

U-235= .36183088E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .17004336E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .27426796E+03 G/TON(UO2)
PU-241= .49311677E+02 G/TON(UO2)	PU-242= .49255336E+01 G/TON(UO2)

BURNUP= 2899.03 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .94153651E+00	ETA= .12609630E+01
L2= .22707366E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .21681500E-03 CM(-2)
KINF= .10793656E+01	KEF= .10141303E+01
PHIMAX= .43851889E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26311133E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .84809969E+01 BARN	

U-235= .33836310E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .18141401E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .32582107E+03 G/TON(UO2)
PU-241= .64481330E+02 G/TON(UO2)	PU-242= .73675898E+01 G/TON(UO2)

BURNUP= 3223.36 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .94179065E+00	ETA= .12574537E+01
L2= .22632575E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .20996100E-03 CM(-2)
KINF= .10766522E+01	KEF= .10117092E+01
PHIMAX= .43821738E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26293042E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .85363075E+01 BARN	

U-235= .31641739E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .19138046E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .37777965E+03 G/TON(UO2)
PU-241= .81281154E+02 G/TON(UO2)	PU-242= .10491161E+02 G/TON(UO2)

BURNUP= 3546.58 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .94202806E+00	ETA= .12557112E+01
L2= .22562820E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .20244750E-03 CM(-2)
KINF= .10737184E+01	KEF= .10090718E+01
PHIMAX= .43810818E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26286490E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .85885116E+01 BARN	

U-235= .29509508E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .20011201E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .42956229E+03 G/TON(UO2)
PU-241= .99477013E+02 G/TON(UO2)	PU-242= .14357632E+02 G/TON(UO2)

BURNUP= 3068.94 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .94224979E+00	ETA= .12497885E+01
L2= .22497428E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .19439950E-03 CM(-2)
KINF= .10706108E+01	KEF= .10062629E+01
PHIMAX= .43816069E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26289636E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .86379396E+01 BARN	

U-235= .27670378E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .20775847E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .48070010E+03 G/TON(UO2)
PU-241= .11883021E+03 G/TON(UO2)	PU-242= .19018562E+02 G/TON(UO2)

BURNUP= 4189.12 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .94245759E+00	ETA= .12457375E+01
L2= .22436177E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .18594400E-03 CM(-2)
KINF= .10673760E+01	KEF= .10033267E+01
PHIMAX= .43834824E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26300894E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .86848292E+01 BARN	

U-235= .25875720E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .21445212E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .53081980E+03 G/TON(UO2)
PU-241= .13910621E+03 G/TON(UO2)	PU-242= .24513331E+02 G/TON(UO2)

BURNUP= 4508.27 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .94265357E+00	ETA= .12415964E+01
L2= .22378439E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BG= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .17717850E-03 CM(-2)
KINF= .10640490E+01	KEF= .10002973E+01
PHIMAX= .43864870E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26318922E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .87294268E+01 BARN	

U-235= .24197463E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .22030966E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .57962973E+03 G/TON(UO2)
PU-241= .16008096E+03 G/TON(UO2)	PU-242= .30871509E+02 G/TON(UO2)

BURNUP= 4825.96 MWD/TON(UO2)

EPS= .10160455E+01	P= .89477930E+00
F= .94283817E+00	ETA= .12374000E+01
L2= .22324110E+03 CM(+2)	TAL= .13245737E+03 CM(+2)
BQ= .17631698E-03 CM(-2)	BM= .16818650E-03 CM(-2)
KINF= .10606603E+01	KEF= .99720355E+00
PHIMAX= .43904284E+14 N/CM(+2)*S	PHIEF= .26342570E+14 N/CM(+2)*S
SIGCOMB= .87719272E+01 BARN	

U-235= .22628055E+04 G/TON(UO2)	
PU-239= .22545382E+04 G/TON(UO2)	PU-240= .62690668E+03 G/TON(UO2)
PU-241= .18154430E+03 G/TON(UO2)	PU-242= .38113702E+02 G/TON(UO2)

DADOS DE ENTRADA

4 .5610E+00 .2460E+01 .2510E+01 .2645E+03 .2701E+03 .6550E+02
.1130E-22 .5320E-24 .2100E-23 .4000E-23 .2700E-23 .1000E-23 .8620E-23
.7336E+02 .4130E+01 .1000E+02 .1525E+02 .7000E+01 .1207E+01 .1270E+01
.7110E-02 .7000E-01 .4252E+23 .1320E+03 .2380E+00 .3840E+03
.5262E+01 .2250E+04 .6150E-23 .2470E+01 .2905E+01 .3060E+01
.1649E-01 .6490E-01 .1386E+01 .5780E-01 .0000E+00
.3315E-01 .5300E-01 .1087E+01 .2196E+00-.5370E-01
.3600E-01 .5000E-01 .1163E+01 .2147E+00-.5400E-01
.2500E+02 .3000E+03 .6000E+03 .7000E-23 .2630E-24

4 0 .2100E-04 .3500E-17 .1000E-26 .1100E+01 .1200E+03
.3910E+01 .1000E+00 .0000E+00 .1230E+01 .1000E-03 .9122E+02
.45300000E+01 .42521510E+23 .26300000E-24 .10000000E+01
.70000000E-23 .91220000E+02
.51300000E+01 .26871300E+20 .00000000E+00 .00000000E+00
.00000000E+00 .14400000E+02
.52620000E+01 .60200000E+23 .23000000E-24 .10000000E+01
.14000000E-23 .27000000E+02

CALCULO PARA O REATOR NPD

20/8/1965

WSH

Os resultados foram comparados com os do "Directory of Nuclear Reactors", vol. IV - Power Reactors - IAEA.

A queima (burn-up) foi comparada com os resultados do NRX em "Reactor Calculation Models for Burn-up Studies" - D.Hicks, AEE-W 6067 (1963).

TABELA 1

MWD/ton(UO ₂)	Pu-239 g/ton(UO ₂)	Pu-240 g/ton(UO ₂)	Pu-241 g/ton(UO ₂)	Pu-242 g/ton(UO ₂)
948	845,57	53,31	4,01	0,14
1271	1063,27	88,76	8,71	0,41
1596	1254,75	129,94	15,59	0,93
1922	1423,02	175,38	24,70	1,79
2248	1570,78	223,83	35,99	3,09
2579	1700,43	274,27	49,31	4,93
2899	1814,14	325,82	64,48	7,37
3223	1913,80	377,78	81,28	10,49
3547	2001,12	429,56	99,48	14,36
3869	2077,58	480,70	118,83	19,02
4186	2144,52	530,82	139,11	24,51
4508	2203,10	579,63	160,08	30,87
4826	2254,34	626,91	181,54	38,11

TABELA 2

MWD/ton(UO ₂)	Pu-239 g/ton(UO ₂)	Pu-240 g/ton(UO ₂)	Pu-241 g/ton(UO ₂)	Pu-242 g/ton(UO ₂)
948	845,57	45,49	3,64	0
1271	1063,27	81,77	8,19	0
1596	1254,75	110,42	10,54	0
1922	1423,02	156,82	18,00	0
2248	1570,78	190,55	25,29	1,73
2579	1700,43	257,11	33,67	2,72
2899	1814,14	302,24	43,68	4,35
3223	1913,80	350,23	53,78	5,93
3547	2001,12	400,22	65,04	8,20
3869	2077,58	452,70	79,99	10,60
4186	2144,52	501,39	89,21	12,87
4508	2203,10	550,78	98,48	15,64
4826	2254,34	601,23	114,30	20,97

Os valores da tabela 1 foram tomados do cálculo para o NPD-2 feito pelo programa "Evolução do Combustível".

Os valores da tabela 2, que serviram de comparação, foram obtidos das curvas (fig.6, AEE-W 6067) para o reator NRX, transformando as porcentagens atômicas em g/ton (UO₂), utilizando uma normalização que manteve em 100%, para cada irradiação, a concentração de Pu-239 calculada pelo programa "Evolução do Combustível".

Considerando que o NRX não apresenta um espectro idêntico mas bastante parecido ao do NPD, a concordância obtida é boa, indicando que o programa está satisfatório.

Calculando-se, no entanto, o valor de $Pu(\text{total})/U$, e comparando-se os valores obtidos com a fig. 5 de AEE-W 6067, nota-se que há uma discrepância da ordem de 10 a 15%.

Tal discrepância não é de admirar se se notar que:

- a) o programa apresentado se baseia em uma teoria de dois grupos somente;
- b) a influência da irradiação sobre a composição do reator é considerada de maneira linear, o que é uma aproximação;
- c) os valores do AEE-W 6067 se referem à produção de plutônio em barras fixas de um reator de pesquisa e não a valores médios sobre o reator, como se considera no programa.

Podemos concluir, das comparações feitas, que o programa apresentado será adequado especialmente a estudos paramétricos; valores absolutos das diversas grandezas necessitariam de um programa mais complexo, como o utilizado no trabalho citado de Hicks, onde 5 grupos são considerados.

Finalmente, uma observação sobre a queima: o valor final, sob o ponto de vista neutrônico, é de 4800 MWD/ton(UO_2) enquanto que o valor do NPD apresentado no "Directory of Nuclear Reactors", vol. IV - Power Reactors - IAEA, é 7300 MWD/ton(UO_2). Esta discrepância é aparente pois no programa não foi considerado o efeito do carregamento bi-direcional, com o conseqüente aumento de queima.

ABSTRACT

This paper presents a digital programme that calculates the variation, as a function of the irradiation, of the mean parameters relevant to burn-up studies of in initially clean heavy water pressure tube reactor.

The programme gives the values of the four factors of k infinite, of the k effective, moderation and diffusion areas, geometrical and material bucklings, maximum and

effective fluxes. The concentrations, in g/ton UO_2 , of the fissile and fertile nuclides are also calculated as a function of the irradiation.

The programme is heavily based in the Canadian programme described in the report CRRP-873 (1959), being an adaptation of the above Canadian programme to the IBM-1620 mod. II-D of the Institute of Atomic Energy of São Paulo.

RÉSUMÉ

Dans ce travail, on présente un programme digital permettant de calculer la variation en fonction de la dose d'irradiation, des paramètres moyens liés aux études de "burn up" d'un réacteur type eau lourde-tube de pression, initialement "clean".

Le programme donne les valeurs des quatre facteurs de k infini, le k infini, le k effectif, les aires de diffusion et de modération, les "bucklings" géométrique et matérielle, les fluxes maximum et effectif. Les concentrations, en g/ton UO_2 , des éléments fissiles et fertiles sont aussi calculées, en fonction de l'irradiation.

La méthode décrite est canadienne, et le programme est basé sur le rapport CRRP-873 (1959). Le programme est développé en Fortran-II-D pour ce calculateur IBM-1620 Mod. II de l'Institut de Energie Atomique de São Paulo.

AGRADECIMENTOS

Aproveitamos a oportunidade para agradecer ao Eng^o Pedro Bento de Camargo pela sugestão da adaptação do programa canadense descrito no CRRP-873, ao Prof. Paulo Saraiva de Toledo pelas discussões dos problemas teóricos de Física de Reatores e pelos esclarecimentos referentes a Centrais Nucleares e ao Eng^o Cibár Cáceres Aguilera pelas discussões no uso do Fortran II-D.

BIBLIOGRAFIA

- M. F. Duret and R. Marriott - A Computer Program for Reactor Studies, CRRP-873 (1959)
- D. Hicks - Reactor Calculation Models for Burn-up Studies, AEE-W 6067 (1963)
- The Canadian NPD-2 - Power Station, Proc. Conf. Geneva - 1958 - vol. 8
- Directory of Nuclear Reactors vol. IV - Power Reactor - IAEA