

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO NODAL ABSORÇÃO-PRODUÇÃO EM CÁLCULOS DE  
DISTRIBUIÇÕES DE FLUXO DE NÉUTRONS E DE POTÊNCIA  
EM UMA DIMENSÃO E UM GRUPO DE ENERGIA**

**Carlos Roberto Ferreira**

Disertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
"Mestre na Área de Concentração em  
Reatores Nucleares de Potência e  
Tecnologia do Combustível Nuclear".

Orientador: Dr. Francisco Correa

Dedico este trabalho  
aos meus pais, Waldem  
mar e Adelaide e ã  
Beth.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Francisco Correa pela honesta, segura e valiosa orientação demonstrada na execução deste trabalho;

Aos meus pais Waldemar Ferreira Ribeiro e Adelaide Ferreira Ribeiro pelo carinho e incentivo que sempre me dedicaram;

A Maria Elizabeth Rolfsen Velloce pela compreensão e pelo sincero encorajamento durante a realização deste trabalho;

Aos colegas José Luiz Batista e Mitsuo Yamaguchi pelos esclarecimentos em problemas de programação e utilização de programas;

Ao colega Tufic Madi Filho pelas críticas e sugestões quanto à redação desta dissertação;

Aos colegas do Centro de Processamento de Dados do IPEN pelo apoio à solução de problemas computacionais;

Ao pessoal da Biblioteca pelo apoio quanto à pesquisa bibliográfica;

Aos colegas do antigo Centro de Engenharia Nuclear pela amizade, apoio mútuo e pelos bons momentos compartilhados, especialmente, Carla Ester Bisson Welter, Gaiânê Sabundjian, Terezinha Ferreira Lima Daltro, Graciete Simões Andrade e Silva, Maria Cristina Aguiar Campos, Maria Cecília Amorim Teixeira da Silva, Leda Cristina Cabelo Bernardes Panaro, Custódio Antonio Guimarães, Arthur Cornélio Otto, José Luiz Batista, Tasso Martins Braga, Sergio Falaizer, Miguel Mattar Neto, Luiz Antonio Terribile, Manoel Henrique Cintra Gabarra, Tufic Madi Filho, Edson Kassar, José Wilson Vieira, Arlindo Gilson Mendonça, Mitsuo Yamaguchi, Gutemberg de Castro Feitosa e Thadeu das Neves Conti;

A srta. Haydée A. dos Santos pelo trabalho de datilografia;

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pelo fornecimento das instalações e pelo suporte financeiro.

# UTILIZAÇÃO DO MÉTODO NODAL ABSORÇÃO-PRODUÇÃO EM CÁLCULOS DE DISTRIBUIÇÕES DE FLUXO DE NÊUTRONS E DE POTÊNCIA EM UMA DIMENSÃO E UM GRUPO DE ENERGIA.

CARLOS ROBERTO FERREIRA

## RESUMO

Neste trabalho, desenvolveu-se o método nodal absorção-produção para cálculos estáticos e dinâmicos de distribuições de fluxo de nêutrons e de potência em uma dimensão e um grupo de energia. Uma equação nodal de balanço neutrônico foi obtida a partir de considerações sobre a produção e o transporte de nêutrons entre os nodos, representando-se a troca de nêutrons por probabilidades. Expressões analíticas aproximadas para essas probabilidades (ou coeficientes de acoplamento nodais), para meios unidimensionais, foram obtidas pela aplicação da equação de difusão de nêutrons em um grupo de energia e em uma dimensão, para duas situações de acoplamento nodal, respectivamente, 3 e 5 nodos acoplados.

Com o conjunto de equações deduzidas, elaborou-se o programa NOD1D, em linguagem FORTRAN-IV, que engloba os esquemas nodais com 3 e 5 nodos interagentes, através das subrotinas NOD3 e NOD5, respectivamente. O programa NOD1D efetua também a interpolação linear das constantes nucleares macroscópicas segundo a queima do combustível nuclear e concentração crítica de hora.

Cálculos de distribuições de fluxo de nêutrons, de densidade de potência, de queima do combustível nuclear, fatores efetivos de multiplicação de nêutrons e concentrações críticas de hora foram feitos com o programa NOD1D e comparados com os resultados correspondentes obtidos com o código CITATION, que utiliza o método de difusão de nêutrons expresso em diferenças finitas. Tanto para o programa NOD1D, como para o CITATION, as constantes nucleares foram geradas pelo programa LFORARD. No

tou-se em geral, para uma escolha conveniente dos tamanhos no  
dais, boa concordância dos resultados, com nítida vantagem do no  
delo nodal absorção-produção sobre o de diferenças finitas, no  
que diz respeito ao tempo gasto de CPU e memória de computador.

A ONE-DIMENSIONAL, ONE-GROUP ABSORPTION-PRODUCTION NODAL METHOD  
FOR NEUTRON FLUX AND POWER DISTRIBUTIONS CALCULATIONS.

CARLOS ROBERTO FERREIRA

ABSTRACT

In this work a absorption-production nodal method is developed for steady and dynamical calculations for neutron fluxes and power distributions, in one-dimension and one-group in energy. A nodal equation for the balance of neutrons is derived from considerations about the production and transport of neutrons through the nodes, with probabilities representing the neutron exchange. The approximate analytical expressions for these probabilities (or, nodal coupling coefficients) in one-dimensional media are obtained using the neutron diffusion equation (one-dimension and one-group) to cases with 3 and 5 coupled nodes, respectively.

With the set of derived equations, the program NOD1D (in FORTRAN-IV language) is elaborated, with inclusion of the nodal schemes for 3 and 5 interacting nodes, which are contained in the subroutines NOD3 and NOD5, respectively. The program NOD1D also interpolates linearly the macroscopic nuclear constants with the nuclear fuel burnup and critical boron concentration.

Calculations of the neutron fluxes and power distributions, nuclear fuel burnup, effective multiplication factors, and critical boron concentrations are made with the program NOD1D and compared to the results obtained with the CITATION code, which uses the neutron diffusion method expressed in finite differences. Both nuclear constants sets, for the program NOD1D and for the CITATION code, are produced by the LEOPARD code. The nodal results show good agreement with the finite difference results for a convenient choice of nodal sizes, and the nodal absorption-production model proves to be more advantageous than the finite difference method in what concerns the elapsed time for computation and storage requirements.

# ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Considerações gerais .....	1
1.2 Métodos numéricos .....	2
1.2.1 Métodos de diferenças finitas .....	2
1.2.2 Métodos de elementos finitos .....	3
1.2.3 Métodos de fluxo sintetizado .....	4
1.2.4 Métodos de matriz-resposta .....	4
1.2.5 Métodos de Monte Carlo .....	5
1.2.6 Métodos nodais .....	6
1.3 Objetivos do trabalho .....	8
2. MÉTODO NODAL BASEADO NA TÉCNICA ABSORÇÃO-PRODUÇÃO ..	9
2.1 Dedução da equação nodal de balanço neutrônico em um grupo de energia .....	9
2.2 Determinação dos coeficientes de acoplamento nodais .....	12
2.2.1 Coeficientes $W_{ij}$ para 3 nodos acoplados	13
2.2.2 Coeficientes $W_{ij}$ para 5 nodos acoplados	16
2.3 Forma matricial explícita da equação nodal de balanço neutrônico .....	19
3. UTILIZAÇÃO DO MÉTODO NODAL ABSORÇÃO-PRODUÇÃO EM CÁLCULOS ESTÁTICOS .....	22
3.1 Programas nodais .....	22
3.2 Problemas estudados .....	22
3.3 Seleção dos tamanhos nodais .....	24
3.4 Estudo de parâmetros de interesse .....	24
3.4.1 Variação dos coeficientes $V_{ij}$ com a espessura dos nodos interagentes .....	25
3.4.2 Precisão no cálculo de $K_{ef}$ com a espessura total da placa .....	25
3.4.3 Tempos gastos de Unidade Central de Processamento (CPU) .....	27

	Pág.
3.5 Comparação dos resultados obtidos .....	28
4. UTILIZAÇÃO DO MÉTODO NODAL ABSORÇÃO-PRODUÇÃO EM CÁLCULOS DINÂMICOS .....	32
4.1 Cálculos de distribuições de potência .....	32
4.2 Problemas solucionados .....	33
4.3 Comparação dos resultados obtidos .....	34
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES .....	48
5.1 Observações e conclusões finais .....	48
5.2 Algumas sugestões para trabalhos futuros .....	49
APÊNDICE A: Dedução dos coeficientes $W_{ij}$ de acoplamento nodais .....	51
A.1 Obtenção dos coeficientes $W_{ij}$ para 3 nodos interagentes .....	52
A.2 Obtenção dos coeficientes $W_{ij}$ para 5 nodos interagentes .....	54
A.3 Obtenção dos fatores $W_{ij}$ para $i=1$ e $i=N$ .....	60
APÊNDICE B: Interpolação das constantes nucleares .....	66
APÊNDICE C: Programas utilizados nos cálculos .....	68
C.1 Programa LEOPARD .....	68
C.1.1 Programa LEOCIT.....	69
C.1.2 Programa LEONOD .....	69
C.2 Programa CITATION .....	71
C.3 Programa NOD1D .....	71
APÊNDICE D: Variáveis de entrada para o programa NOD1D .	74
APÊNDICE E: Problema amostra .....	77
E.1 Listagem dos cartões de controle do programa LEONOD .....	77
E.2 Listagem dos cartões de controle do programa NOD1D .....	77

	Pág.
E.3 Listagem dos cartões de dados de entrada do programa NOD1D .....	77
E.4 Listagem dos cartões de dados de entrada do programa LEONOD .....	78
F.5 Listagem dos resultados fornecidos pelo programa NOD1D .....	83
APÊNDICE F: Listagem do programa NOD1D .....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	109

## ÍNDICE DAS FIGURAS

Nº	Título	Pág.
2.1	Esquema para dedução dos fatores $W_{ij}$ .....	13
3.1	Placa infinita refletida com composição com bustível uniforme .....	23
3.2	Placa infinita refletida com 3 composições com bustíveis .....	23
3.3	Comparação das distribuições de fluxo de nêu trons calculados pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=10$ cm = 1,280L) para o Problema 1 ...	29
3.4	Comparação das distribuições de fluxo de nêu trons calculados pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=20$ cm = 2,560L) para o Problema 1 ...	29
3.5	Comparação das distribuições de fluxo de nêu trons calculados pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=15$ cm = 1,920L) para o Problema 2 ...	30
3.6	Comparação das distribuições de fluxo de nêu trons calculados pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=15$ cm = 1,920L) para o Problema 2 ...	30
4.1	Comparação das concentrações críticas deboro calculadas em função da queima pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18$ cm = 2,296L) para o Problema 1 .....	35
4.2	Comparação das concentrações críticas deboro, calculadas em função da queima pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12$ cm = 1,531L) para o Problema 1 .....	35
4.3	Comparação dos fatores efetivos de multiplica ção de nêutrons calculados em função da quei ma pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18$ cm = 2,296L) para o Problema 1 .....	36
4.4	Comparação dos fatores efetivos de multiplica ção de nêutrons calculados em função da queima pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12$ cm = 1,531L) para o Problema 1 .....	36
4.5	Comparação da reatividade calculada em função da queima pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18$ cm = 2,296L) para o Problema 1 .....	37

Nº	Título	Pág.
4.6	Comparação da reatividade calculada em função da queima pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12 \text{ cm} = 1,531L$ ) para o Problema 1 .....	37
4.7	Comparação das distribuições de potência calculadas em função da queima pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12 \text{ cm} = 1,531L$ ) para o Problema 1 .....	38
4.8	Comparação das distribuições críticas de potência calculadas em função da queima pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18 \text{ cm} = 2,296L$ ) para o Problema 1 .....	38
4.9	Comparação das concentrações críticas de boro calculadas em função da queima pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18 \text{ cm} = 2,296L$ ) para o Problema 2 .....	39
4.10	Comparação das concentrações críticas de boro calculadas em função da queima pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=18 \text{ cm} = 1,531L$ ) para o Problema 2 .....	39
4.11	Comparação dos fatores efetivos de multiplicação de nêutrons calculados em função da queima pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18 \text{ cm} = 2,296L$ ) para o Problema 2 .....	40
4.12	Comparação dos fatores efetivos de multiplicação de nêutrons calculados em função da queima pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12 \text{ cm} = 1,531L$ ) para o Problema 2 .....	40
4.13	Comparação da reatividade calculada em função da queima pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18 \text{ cm} = 2,296L$ ) para o Problema 2 .....	41
4.14	Comparação da reatividade calculada em função da queima pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12 \text{ cm} = 1,531L$ ) para o Problema 2 .....	41
4.15	Comparação das distribuições de potência calculadas em função da queima pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12 \text{ cm} = 1,531L$ ) para o Problema 2 .....	42
4.16	Comparação das distribuições críticas de potência calculadas em função da queima pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12 \text{ cm} = 1,531L$ ) para o Problema 2 .....	42

NP	Título	Pág.
4.17	Distribuições de queima calculadas pelo programa NOD5 ( $\Delta X=12 \text{ cm} \approx 1,531L$ ) para o Problema 1 (sistema crítico) .....	43
4.18	Distribuições de queima calculadas pelo programa NOD5 ( $\Delta X=12 \text{ cm} \approx 1,531L$ ) para o Problema 2 (sistema crítico) .....	43
A.1	Esquema para dedução dos fatores $F_{ij}$ .....	51
C.1	Fluxograma geral do programa NOD1D .....	73

## ÍNDICE DAS TABELAS

Nº	TÍTULO	pág.
3.1	Variação dos coeficientes $\beta_{ij}$ com a espessura $\Delta X$ dos nodos .....	25
3.2	Precisão do $K_{ef}$ para várias espessuras da placa (espessura do nodo: $\Delta X=10\text{cm} = 1,280L$ ) .....	26
3.3	Precisão do $K_{ef}$ para várias espessuras da placa (espessura do nodo: $\Delta X=20\text{cm} = 2,560L$ ) .....	26
3.4	Comparação entre tempos gastos de CPU .....	27
3.5	Fatores efetivos de multiplicação de nêutrons e tempos de CPU para os Problemas 1 e 2 .....	31
4.1	Desvios máximos e tempos gastos de CPU .....	45
4.2	Desvios relativos das distribuições de potência em função da queima calculadas pelos programas NOD1D e CITATION, representadas nas Figuras 4.7 e 4.15 .....	45

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1 Considerações Gerais

Historicamente, os reatores nucleares e os computadores eletrônicos surgiram quase que simultaneamente, nos anos iniciais da década de 1940<sup>(16)</sup>, como resultado de uma verdadeira revolução tecnológica decorrente de avanços surpreendentes nos campos da Matemática, Física e Química, quais sejam, por exemplo, o desenvolvimento da teoria das substâncias e reações químicas, das estruturas atômica e nuclear e da álgebra booleana. Desde então, muito progresso foi realizado, culminando com a construção de grandes centrais nucleares para produção de energia elétrica e dos modernos computadores digitais de alta velocidade.

Os projetos de núcleos de reatores nucleares de fissão envolvem a determinação de distribuições de fluxo de nêutrons e distribuições de potência<sup>(1,10)</sup>. Em princípio, o fluxo de nêutrons pode ser obtido como solução da equação linear de transporte de Boltzman para as três dimensões espaciais. Praticamente porém, o problema é tão complexo que a solução numérica rigorosa não é possível devido às quantidades excessivas de memória e tempo de computação necessários<sup>(5,7,12)</sup>. Todavia, muitas aproximações têm sido feitas para simplificar as equações e tornarem possíveis, em computadores disponíveis presentemente, soluções numéricas suficientemente precisas e rápidas. Dessas aproximações, a teoria de difusão de nêutrons em multigrupo de energia, auxiliada por eficientes técnicas de homogeneização, dá suficiente precisão para a maioria dos problemas de reatores e, por isso, é a aproximação mais largamente usada<sup>(1)</sup>.

#### 1.2 Métodos Numéricos

Com o crescimento da capacidade computacional, muitos métodos numéricos foram desenvolvidos para cálculo de reatores nas últimas décadas. Esses métodos foram, ou estão sendo, incor-

porados em extensos programas de computador denominados códigos nucleares. É muito difícil estabelecer-se uma classificação rigorosa para os métodos existentes atualmente. Tal dificuldade advém da variedade de aproximações e particularizações que são feitas em cada método. Além do mais, muitos desses métodos, apesar de parecerem distintos à primeira vista, mostram-se intimamente relacionados numa análise mais profunda. Como não é objeto deste trabalho uma caracterização detalhada de tais métodos, apresenta-se apenas uma descrição qualitativa resumida dos principais métodos utilizados presentemente no cálculo de reatores nucleares (1,10,12).

### 1.2.1 Métodos de diferenças finitas

Os primeiros códigos nucleares utilizaram os métodos de diferenças finitas para resolver a equação de difusão de nêutrons em multigrupo de energia, obtendo-se assim, distribuições de fluxo de nêutrons e de potência, bem como, outros parâmetros relacionados à criticalidade de reatores nucleares. Estes métodos consistem na partição do sistema em estudo em malhas espaciais finas (segmentos, retângulos ou paralelepípedos em uma ou duas ou três dimensões, respectivamente) e na expansão em séries de Taylor dos valores pontuais do fluxo, retendo termos até segunda ordem, em geral, para aproximar as derivadas presentes nas equações diferenciais. A equação de difusão de nêutrons pode então ser expressa como uma equação de diferenças em que o valor do fluxo em cada ponto espacial está relacionado com os valores do fluxo em todos os pontos espaciais adjacentes. Se houver  $N$  pontos espaciais, então um sistema de  $N$  equações algébricas lineares acopladas para o fluxo pode ser escrita para cada grupo de energia. Os métodos de diferenças finitas constituem, ainda hoje, o padrão dos métodos numéricos; eles são estabelecidos em bases teóricas bem definidas e, em princípio, sua precisão é limitada, dependendo apenas de tomar-se malhas cada vez mais finas para aumentar a precisão de determinado cálculo.

As técnicas iterativas computacionais usadas para resolver as equações de diferenças finitas estão bem estabelecidas (22,23). Dessa forma, podem-se obter cálculos de reatores detalhados em duas dimensões espaciais. A limitação do método ocorre, entretanto, na sua aplicação a problemas de reatores em

três dimensões: tais problemas requerem centenas de milhares ou até milhões de malhas (espaciais, energéticas etc), o que acarreta a utilização excessiva de memória de computador e tempo de computação.

### 1.2.2 Métodos de elementos finitos

O desenvolvimento do método de elementos finitos deu-se, inicialmente, em conexão com problemas de engenharia civil e mecânica para cálculo de estruturas. A característica essencial do método de elementos finitos é representar a função a ser determinada pela soma de polinômios em seus argumentos, onde cada polinômio na soma é definido apenas sobre intervalos limitados de seus argumentos. Por exemplo, um reator pode ser particionado em um certo número de paralelepípedos homogeneizados, relativamente grandes, ( - 15 a 20 cm) e o fluxo de nêutrons para o g-ésimo grupo de energia,  $\phi_g(x,y,z)$ , dentro do k-ésimo elemento pode ser aproximado por um polinômio  $P_k^g(x,y,z)$ . A seguir aplicam-se métodos variacionais para obter-se um sistema de equações lineares para os coeficientes incógnitos dos polinômios, os quais, por sua vez, representam os valores do fluxo de nêutrons em certos pontos. Disso resulta um sistema de equações de diferenças, relacionando o fluxo em cada ponto de uma malha espacial com os fluxos em pontos das malhas mais próximas. Tal sistema é semelhante ao obtido pelo método de diferenças finitas, porém, seus coeficientes são mais complicados. Uma vantagem do método de elementos finitos reside no fato de que, quando o sistema em estudo pode ser subdividido em elementos homogêneos (ou homogeneizados) relativamente grandes, pode-se obter distribuições de fluxo de nêutrons mais precisas e com menos trabalho computacional que no método de diferenças finitas. Outra vantagem é que este método, assim como o de diferenças finitas, é estabelecido em firmes bases matemáticas; por exemplo, é possível demonstrar que diminuindo-se o tamanho das malhas obtêm-se resultados mais precisos. Ainda mais, os métodos de elementos finitos são bastante gerais e aplicam-se aos mais variados campos de estudo (1,12).

### 1.2.3 Métodos de fluxo sintetizado

Nesta classe de métodos a idéia básica consiste em representar o fluxo de nêutrons do grupo  $g$  como uma combinação linear de funções expansão pré-determinadas, procurando com isso reduzir a dimensionalidade do problema. Existe uma variedade de tais métodos; por exemplo, no chamado método de síntese dependente do espaço, o fluxo tridimensional do  $g$ -ésimo grupo de energia é expresso como 
$$\phi_g(x,y,z) = \sum_{k=1}^K \psi_k^g(x,y) S_k^g(z)$$
 onde os  $\psi_k^g(x,y)$  são as funções expansão (as quais são pré-determinadas com base num conhecimento geral da física do problema em questão; na prática são soluções bidimensionais da equação de difusão de nêutrons em multigrupo de energia, obtidas pelo método de diferenças finitas),  $S_k^g(z)$  são os coeficientes incógnitos da expansão, denominados funções de síntese e  $K$  é o número de termos da expansão.

Equações para as funções de síntese são obtidas por procedimentos variacionais ou pelo método de resíduos ponderados. Dessa forma, cálculos tridimensionais de distribuições de potência, com boa precisão, podem ser obtidos com grande economia computacional. Como desvantagens do método pode-se citar a ocorrência de um aumento do erro nas interfaces núcleo-refletor e o fato de não existir um critério sistemático para a estimativa de erros; assim não é possível assegurar, por exemplo, que aumentando-se o número de funções expansão, acarreta-se um aumento na precisão do método. Observa-se, finalmente, que os métodos de elementos finitos e os de fluxo sintetizado apresentam concepções bastante similares, sendo que o primeiro é bem mais geral uma vez que o fluxo num dado elemento é representado por um polinômio arbitrário ao passo que as funções expansão no segundo são fortemente dependente do problema em estudo (11,12,15).

### 1.2.4 Métodos de matriz-resposta

Inicialmente a elaboração de tais métodos baseou-se no conceito de correntes parciais de nêutrons; o sistema em estudo é particionado em subregiões (nodos) relativamente grandes e a conservação dos nêutrons é exigida em cada uma delas por meio de relações lineares entre as correntes parciais  $J_g^{\pm}$

entrando e saindo das superfícies nodais, sendo que essas relações focalizam um nodo por vez. Essas relações são estabelecidas através de matrizes reflexão e transmissão, as quais são pré-calculadas geralmente utilizando-se alguma aproximação de alta ordem da equação de transporte de Boltzmann (por exemplo, a aproximação  $P_n$ )<sup>(22)</sup>.

Posteriormente, demonstrou-se que a equação básica dos métodos de matriz resposta pode ser derivada diretamente da forma fraca da equação de difusão sem o conceito de correntes parciais e, por isso, o seu campo de aplicação foi estendido a fenômenos onde correntes parciais não têm significado físico (por exemplo, na condução de calor).

Em várias aplicações os métodos de matriz resposta mostram-se superior aos de diferenças finitas no que diz respeito a eficiência computacional. Particularmente, em cálculos em que o reator pode ser particionado em malhas grossas (cerca de 10 a 20 cm), e que o número de zonas de composições diferentes não seja muito grande e os nodos sejam escolhidos de forma tal que o fluxo angular de nêutrons nas interfaces, seja uma função suave da posição e da direção. Todavia, a potencialidade de tais métodos, até o momento presente, não está totalmente delineada, cabendo novas pesquisas<sup>(24, 25, 26)</sup>.

### 1.2.5 Métodos de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é uma técnica, assentada na Teoria Estatística, para resolver uma variedade de problemas em Matemática computacional. Constrói-se, para cada problema, um processo aleatório com parâmetros característicos do problema. Essas quantidades são aproximadas pela amostragem aleatória resultante de probabilidades que descrevem verdadeiros processos estocásticos associados às quantidades em questão. Tomando-se suficientes amostras, assume-se que os valores médios obtidos representem estimativas precisas das quantidades desejadas<sup>(21)</sup>.

O método de Monte Carlo tem sido aplicado com maior sucesso àqueles campos onde o problema matemático básico envolve a investigação de algum processo aleatório como, por e

xemplo, problemas em física de nêutrons e da radiação. Entretanto, há uma variedade de problemas computacionais, para os quais a formulação não está relacionada à teoria de probabilidades, que podem ser resolvidos com eficiência por meio do método de Monte Carlo: exemplos típicos são problemas de valores de contorno para equações elípticas (equação de Laplace) ou parabólicas (equação de transferência de calor) (19).

Em física de reatores, o método de Monte Carlo aparece como uma poderosa alternativa para a solução numérica aproximada da equação de transporte de Boltzmann. A amostragem no espaço-fase é feita construindo-se "histórias" para as partículas (estatisticamente seguindo-as através de suas probabilidades de interação) do nascimento (amostrando-se a fonte) até a sua "morte" (remoção) por absorção ou fuga do sistema. Por exemplo, ao seguir-se um nêutron num sistema, a seleção do local de sua próxima colisão, do nuclídeo com o qual interage, do tipo de interação, do novo ângulo e da nova energia, é feita através da geração de um conjunto de números aleatórios uniformemente distribuídos (ou seguindo uma distribuição previamente estabelecida) no intervalo (0,1).

A simulação real das interações nucleares em reatores, pelo método de Monte Carlo, é extremamente lenta e consome muita memória e tempo de computador, sendo impraticável em muitos casos. Todavia essas limitações são superadas em grande parte, por técnicas de amostragem por importância e redução de variância. Dessa forma, o método de Monte Carlo tem sido aplicado com sucesso na solução de problemas de blindagem de radiação bem como, em problemas de criticalidade de reatores (8,17).

As principais vantagens do método de Monte Carlo são as seguintes: o método é adequado para resolver problemas multidimensionais, em geometrias complexas onde os outros métodos são inaplicáveis e, mesmo em cálculos muito complicados, é possível obter-se uma estimativa estatística do erro. As principais desvantagens são: a necessidade de grandes quantidades de memória e muito tempo de computador (18).

#### 1.2.6 Métodos nodais

Como foi mencionado anteriormente, os métodos

numéricos convencionais de diferenças finitas de malhas finas, para cálculos tridimensionais de distribuição de potência em reatores nucleares, apresentam limitações de tempo e memória, mesmo nos maiores e mais modernos computadores. Para contornar essas limitações, durante as duas últimas décadas, muita atenção foi dada ao desenvolvimento de métodos numéricos mais eficientes e baratos para o projeto de reatores nucleares. A maioria dos novos métodos originados por essas pesquisas caem na classe dos chamados métodos computacionais de malhas largas, (ou malhas grossas), nos quais pode-se incluir os, já mencionados, métodos de elementos finitos e métodos de matriz resposta<sup>(12,13)</sup>. São incluídos, também, na classe dos métodos de malhas largas, os métodos denominados nodais (alguns dos quais já testados com bastante sucesso<sup>(11)</sup>). Nesses métodos, o reator é particionado em zonas, chamadas nodos (geralmente paralelepípedos em três dimensões), tão grandes quanto possível, chegando mesmo a tamanhos comparáveis ao de conjuntos combustíveis (seções de 15 a 20 centímetros de comprimento constituem nodos típicos para reatores moderados a água leve, PWR e BWR<sup>(12,20)</sup>).

A idéia fundamental dos métodos nodais consiste em relacionar a corrente de nêutrons através da interface entre dois nodos aos fluxos médios nesses nodos através de coeficientes de acoplamento nodais. Deve-se acentuar que esta afirmação permite englobar na aproximação nodal, muitas das características dos métodos de fluxo sintetizado e de elementos finitos. Também os métodos de matriz resposta, que relacionam diretamente fluxos e correntes neutrônicas nas superfícies nodais, estão intimamente relacionados aos métodos nodais<sup>(12)</sup>.

Deve-se enfatizar, ainda, que alguns métodos nodais não dependem explicitamente da teoria de difusão de nêutrons. Entretanto, quando a determinação de coeficientes de acoplamento nodal é feita com base na teoria de difusão, esta deverá ser válida nas superfícies de separação dos nodos. Este é o caso do método nodal baseado na teoria de produção-absorção de nêutrons, o qual é objeto deste trabalho<sup>(6,11)</sup>.

### 1.3 Objetivos do Trabalho

a) Desenvolver o método nodal absorção-produção, destinado a cálculos estáticos e dinâmicos de distribuições de fluxo de nêutrons e de potência, em um grupo de energia, para meios unidimensionais, derivando suas equações e elaborando um programa de computador;

b) Comparar os resultados do modelo nodal absorção-produção, com os obtidos usando o método de difusão de nêutrons representado por diferenças finitas, o qual serve de padrão;

c) Discutir as vantagens e desvantagens do método nodal em relação ao de diferenças finitas, em termos de eficiência computacional.

## 2. MÉTODO NODAL BASEADO NA TÉCNICA ABSORÇÃO-PRODUÇÃO

### 2.1 Dedução da Equação Nodal de Balanço Neutrônico em um Grupo de Energia

O método nodal absorção-produção, para cálculos de distribuições de fluxo de nêutrons e potência, objeto deste trabalho, considera a troca de nêutrons entre nodos interagentes e as representa por probabilidades. Essas probabilidades ou coeficientes de acoplamento nodais, os quais são, geralmente, funções da geometria e das propriedades de produção e absorção de nêutrons dos materiais (daí o nome absorção-produção) são determinadas neste trabalho, com base na equação de difusão de nêutrons. A aplicabilidade do método, supõe a disponibilidade de constantes celulares homogêneas, tais como, seções de choque macroscópicas médias e coeficientes de difusão de nêutrons. Essas constantes nucleares são geradas por um certo número de programas conhecidos (LEOPARD<sup>(3)</sup>, por exemplo).

Para se estabelecer a equação nodal de balanço neutrônico, em um grupo de energia, supõe-se que o reator em estudo possa ser subdividido em um certo número de nodos homogêneos (ou homogeneizados), relativamente grandes. Pode-se, então, representar a troca de nêutrons entre o i-ésimo nodo e um certo número de nodos que o envolvem, considerados como nodos interagentes, por coeficientes de acoplamento  $w_{ij}$ , definidos a seguir:

$w_{ij}$  = probabilidade de que um nêutron de fissão nascido no nodo i, seja absorvido no nodo j.

Num sistema onde o nodo i é envolvido por (m-1) nodos interagentes, a conservação dos nêutrons implica em

$$\sum_{j=1}^m w_{ij} = 1 \quad (2.1)$$

A precisão do modelo depende dentro de certas restrições, do tamanho e/ou do número de nodos envolvendo o nodo i, para os quais a interação com o nodo i é considerada não des

neutro.

O balanço neutrônico no nodo  $i$  é dado por:

$$S_i = K_i \lambda_i \quad (2.2)$$

onde,  $S_i$  = fonte de nêutrons de fissão no nodo  $i$  (nêutrons/cm<sup>3</sup>s)

$\lambda_i$  = taxa de absorção de nêutrons no nodo  $i$  (nêutrons/cm<sup>3</sup>s)

$$K_i = K_{i0} = \nu_i \frac{\sum f_i}{\sum a_i} \quad (2.3)$$

Nesta equação,  $K_i$  é a constante de multiplicação do meio homogêneo e infinito com propriedades idênticas às do nodo  $i$ ;  $\nu_i$  é igual ao número médio de nêutrons emitidos por fissão em  $i$ ;  $\sum f_i$  e  $\sum a_i$  são, respectivamente, as seções de choque macroscópicas médias de fissão e de absorção de nêutrons do nodo  $i$ .

Expressando  $\lambda_i$  em termos das características de produção e transporte de nêutrons, obtemos:

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^m W_{ji} S_j \quad (2.4)$$

Nesta equação, o termo  $W_{ii} S_i$  do segundo membro, representa a fração de nêutrons nascidos e absorvidos no nodo  $i$  e o resto da somatória inclui todos os nêutrons nascidos nos  $(m-1)$  nodos interagentes  $j$ , que migram para o nodo  $i$ , onde são finalmente absorvidos.

Substituindo a Eq. (2.4) na Eq. (2.2), vem:

$$S_i = K_i \sum_{j=1}^m W_{ji} S_j \quad (2.5)$$

Estabeleceu-se dessa forma, uma equação de balanço entre os  $S_i$ , em termos somente das características de multiplicação e transporte do sistema.

A fim de assegurar-se que o sistema de equações lineares

res originado a partir da Eq. (2.5) tenha solução, divide-se o seu lado direito por um parâmetro  $\lambda$ . Este parâmetro será, na realidade, o fator efetivo de multiplicação de nêutrons do reator, ou seja,  $\lambda = K_{ef}$ , e, matematicamente, corresponde ao maior auto valor do sistema de equações. Escreve-se então,

$$S_i = \frac{K_i}{\lambda} \sum_{j=1}^m w_{ji} S_j \quad (2.6)$$

A Eq. (2.6) pode ser escrita em termos do fluxo de nêutrons  $\phi$  pois, para o nodo  $i$ , temos:

$$S_i = v_i \sum_{f_i} \phi_i \quad (2.7)$$

Portanto, usando as Eqs. (2.3) e (2.7), a Eq. (2.6) torna-se:

$$\phi_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^m c_{ji} \phi_j \quad (2.8)$$

onde,  $c_{ji} = \frac{v_i \sum_{f_i} w_{ji}}{\sum_{a_i}}$  . (2.9)

Escrevendo a Eq. (2.8) em notação matricial, temos:

$$\underline{\phi} = \frac{1}{\lambda} \underline{C} \underline{\phi} \quad (2.10)$$

A equação nodal de balanço neutrônico, Eq. (2.8), apresenta, como é visto adiante, a mesma forma algébrica que ocorre quando a equação de difusão de nêutrons é expressa em diferenças finitas. Conseqüentemente, a Eq. (2.8) pode, em princípio, ser resolvida pelos tradicionais métodos iterativos, em que são atribuídos valores arbitrários (convenientes) iniciais aos fluxos  $\phi_i$  e ao fator de multiplicação  $\lambda$ . O autovalor  $\lambda$  é reavaliado após cada iteração, efetuando-se o balanço neutrônico para o núcleo inteiro do reator, somando-se, membro a membro, a Eq. (2.8)

para os  $n$  nodos em que ele foi dividido. Dessa forma, a expressão de  $\lambda$  será,

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ji} \phi_j}{\sum_{i=1}^n \phi_i} \quad (2.11)$$

As Eqs. (2.8) e (2.11) são as equações básicas calculadas durante a "iteração de fonte". Uma vez atingido o grau de convergência pré-fixado, obtém-se a distribuição de fluxo de nêutrons e o fator de multiplicação efetivo do sistema. A distribuição de densidade de potência é, então, obtida diretamente da distribuição de fluxo pela relação:

$$P_i = \epsilon_{fi} \int_{fi} \phi_i \quad (2.12)$$

onde,  $\epsilon_{fi}$  = energia média recuperável por fissão no nodo  $i$ .

## 2.2 Determinação dos Coeficientes de Acoplamento Nodais

Observando o desenvolvimento das equações no item anterior, nota-se que a equação nodal de balanço neutrônico, Eq. (2.8), foi obtida com certa facilidade, a partir de idéias simples. Entretanto, resta ainda um obstáculo a superar: para que a equação seja aplicável, necessita-se determinar os coeficientes de acoplamento nodais. A obtenção desses coeficientes, que são as probabilidades  $w_{ij}$ , é uma tarefa trabalhosa. Além disso, para o método nodal absorção-produção, ora em desenvolvimento, essa determinação é apenas aproximada, pois, depende da espessura total dos nodos interagentes com a fonte de nêutrons e baseia-se na hipótese de que a distribuição de fontes neutrônicas é plana em cada nodo.

Neste trabalho, considera-se apenas o caso unidimensional e um grupo de energia. Os fatores de acoplamento nodais  $w_{ij}$  são determinados para duas situações, a saber: primeira, considera-se 3 nodos no acoplamento; segunda, considera-se 5 nodos acoplados.

A determinação dos coeficientes de acoplamento nodais, para o problema unidimensional em um grupo de energia, é feita utilizando-se a equação de difusão de nêutrons em uma velocidade e em uma dimensão (7,14). A aproximação feita na obtenção dos coeficientes de acoplamento, considera que os nodos apresentam distribuições planas de fontes neutrônicas. A Figura 2.1 ilustra um problema típico, onde tem-se uma placa, infinita nas direções y e z, dividida em N nodos homogêneos mais refletores de nêutrons à esquerda e à direita, respectivamente. A i-ésima região contém uma densidade de fonte neutrônica plana igual a  $S_i$ .

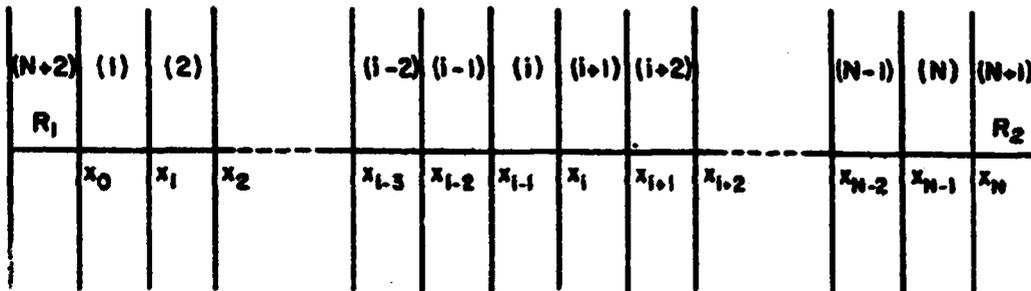


Figura 2.1 - Esquema para dedução dos fatores  $w_{ij}$

Os dois subitens seguintes apresentam um resumo dos passos algébricos na obtenção das probabilidades  $w_{ij}$ , respectivamente, para 3 e 5 nodos interagentes. A dedução detalhada, correspondente, encontra-se no Apêndice A.

### 2.2.1 Coefficientes $w_{ij}$ para 3 nodos acoplados

As probabilidades  $w_{ij}$ , para a i-ésima região, são definidas em função do fluxo de nêutrons  $\phi(x)$  e da densidade de corrente de nêutrons  $J(x)$ , para 3 nodos acoplados, como se segue:

$$w_{i(i-1)} = \left| \frac{J_i (X_{i-1})}{S_i \Delta X_i} \right|$$

$$w_{ii} = \frac{\lambda_{ai}}{S_i \Delta X_i} \int_{X_{i-1}}^{X_i} \phi_i (X) dX \quad (2.13)$$

$$w_{i(i+1)} = \left| \frac{J_i (X_i)}{S_i \Delta X_i} \right|$$

$\phi_i (X)$  = distribuição do fluxo de nêutrons no ponto  $X$  do nodo  $i$  ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ );

$J_i (X)$  = densidade de corrente neutrônica no ponto  $X$  do nodo  $i$  ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ );

$\Delta X_i = X_i - X_{i-1}$  = espessura do nodo  $i$  (cm).

De acordo com a lei de Fick<sup>(7,14)</sup>, temos:

$$J_i (X) = - D_i \frac{d\phi_i (X)}{dX} \quad (2.14)$$

O coeficiente de difusão de nêutrons  $D_i$  (cm) está ligado ao comprimento de difusão de nêutrons  $L_i$  (cm) pela relação,

$$L_i = \sqrt{D_i / \lambda_{ai}} \quad (2.15)$$

Portanto, reportando-se à Figura 2.1 e às Fns. (2.13), para obter-se os fatores  $w_{ij}$ , no caso de 3 nodos acoplados, necessita-se saber o fluxo de nêutrons no nodo  $i$  e as correntes neutrônicas deixando o nodo  $i$  através das interfaces  $(i-1)$  e  $i$ . Para esse fim, aplica-se a equação de difusão de nêutrons em uma velocidade, para meios unidimensionais homogêneos, ao  $i$ -ésimo nodo, a saber:

$$\frac{d^2 \phi_i}{dX^2} - \frac{1}{L_i^2} \phi_i (X) = - \frac{S_i}{D_i} \quad (2.16)$$

A Eq. (2.16) está sujeita às seguintes condições de contorno de albedo em  $X_{i-1}$  e  $X_i$ :

$$\frac{1}{\phi_i} D_i \left. \frac{d\phi_i}{dX} \right|_{X=X_{i-1}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_{i-1}}{1 + a_{i-1}} \right) = h_{i-1} \quad (2.17)$$

$$\frac{1}{\phi_i} D_i \left. \frac{d\phi_i}{dX} \right|_{X=X_i} = - \frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_{i+1}}{1 + a_{i+1}} \right) = h_{i+1}$$

O coeficiente de reflexão de nêutrons (ou albedo) da  $i$ -ésima região é dado por<sup>(7)</sup>:

$$a_i = \frac{1 - \frac{2D_i}{L_i} \operatorname{cotgh} \frac{\Delta X_i}{L_i}}{1 + \frac{2D_i}{L_i} \operatorname{cotgh} \frac{\Delta X_i}{L_i}} \quad (2.18)$$

A solução geral da Eq. (2.16) é expressa como:

$$\phi_i(X) = A_1 \cosh \left( \frac{X - X_{i-1}}{L_i} \right) + A_2 \sinh \left( \frac{X - X_{i-1}}{L_i} \right) + \frac{S_i}{\Sigma_{ai}} \quad (2.19)$$

Finalmente, substituindo a Eq. (2.19) nas Eqs. (2.13) e utilizando a Eq. (2.14), obtêm-se as expressões analíticas aproximadas para os coeficientes de acoplamento nodais  $w_{ij}$ ; são elas:

$$W_{i(i-1)} = \frac{D_i |A_2|}{L_i \Delta X_i}$$

$$W_{ii} = \frac{\sum a_i L_i}{\Delta X_i} \left[ A_1 \sinh \frac{\Delta X_i}{L_i} + A_2 \cosh \left( \frac{\Delta X_i}{L_i} - 1 \right) \right] + 1 \quad (2.20)$$

$$W_{i(i+1)} = \frac{D_i}{L_i \Delta X_i} \left| A_1 \sinh \frac{\Delta X_i}{L_i} + A_2 \cosh \frac{\Delta X_i}{L_i} \right|$$

As constantes  $A_i$ , que comparecem nas Fqs. (2.19) e (2.20), foram determinadas explicitamente no Apêndice A, pela aplicação das condições de contorno, Fqs. (2.17).

### 2.2.2 Coefficientes $W_{ij}$ para 5 nodos acoplados

As probabilidades  $W_{ij}$ , para o  $i$ -ésimo nodo, na ra o caso de 5 nodos acoplados, são definidas de forma análoga ao caso de 3 nodos acoplados. Porém, como era de se esperar, na ra 5 nodos interagentes, as probabilidades  $W_{ij}$  apresentam expre<sup>s</sup>ões mais complexas e, naturalmente, mais trabalhosas de serem obtidas do que para o caso de 3 nodos interagentes.

Define-se, pois, para a  $i$ -ésima região ( $i=2$  até  $N-1$ ):

$$W_{ij} = \frac{\int_{X_{j-1}}^{X_j} \sum a_j \phi_j(x) dx}{\int_{X_{i-1}}^{X_i} S_i dx} = \frac{\sum a_j}{S_i \Delta X_i} \int_{X_{j-1}}^{X_j} \phi_j(x) dx \quad (2.21)$$

$$j = i-1, i, i+1$$

e, para as regiões não adjacentes à fonte, à esquerda e à direi

ta, respectivamente:

$$w_{ij} = \left| \frac{J_{j+1}(x_j)}{S_i \Delta x_i} \right|, \quad j = i-2 \quad (2.22)$$

$$w_{ij} = \left| \frac{J_{j-1}(x_{j-1})}{S_i \Delta x_i} \right|, \quad j = i+2 \quad (2.23)$$

Agora, para obter-se os fatores de acoplamento  $w_{ij}$ , necessita-se saber os fluxos e correntes neutrônicas nas regiões  $i-1$ ,  $i$  e  $i+1$ . Para este fim, aplica-se a equação de difusão de nêutrons em uma velocidade, para meios homogêneos, a cada um desses nodos, obtendo o seguinte sistema de equações diferenciais acopladas.

$$\frac{d^2 \phi_{i-1}}{dx^2} - \frac{1}{L_{i-1}^2} \phi_{i-1}(x) = 0$$

$$\frac{d^2 \phi_i}{dx^2} - \frac{1}{L_i^2} \phi_i(x) = -\frac{S_i}{D_i} \quad (2.24)$$

$$\frac{d^2 \phi_{i+1}}{dx^2} - \frac{1}{L_{i+1}^2} \phi_{i+1}(x) = 0.$$

As Eqs. (2.24) estão sujeitas as seguintes condições de contorno e interface: condições de albedo em  $x_{i-2}$  e  $x_{i+1}$  e condições de continuidade do fluxo e da corrente de nêutrons nas interfaces  $x_{i-1}$  e  $x_i$ , ou seja,

$$\frac{1}{\phi_{i-1}} D_{i-1} \frac{d\phi_{i-1}}{dx} \Big|_{x=x_{i-2}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_{i-2}}{1 + a_{i-2}} \right) = r_{i-2}$$

$$\phi_{i-1}(x_{i-1}) = \phi_i(x_{i-1}) \quad J_{i-1}(x_{i-1}) = J_i(x_{i-1})$$

(2.75)

$$\phi_i(x_i) = \phi_{i+1}(x_i) \quad J_i(x_i) = J_{i+1}(x_i)$$

$$\frac{1}{\phi_{i+1}} D_{i+1} \frac{d\phi_{i+1}}{dx} \Big|_{x=x_{i+1}} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_{i+2}}{1 + a_{i+2}} \right) = r_{i+2}$$

As soluções gerais das Eqs. (2.24) são expressas como:

$$\phi_{i-1}(x) = A_1 \cosh\left(\frac{x - x_{i-2}}{L_{i-1}}\right) + A_2 \sinh\left(\frac{x - x_{i-2}}{L_{i-1}}\right)$$

$$\phi_i(x) = A_3 \cosh\left(\frac{x - x_{i-1}}{L_i}\right) + A_4 \sinh\left(\frac{x - x_{i-1}}{L_i}\right) + \frac{s_i}{\sum_{ai}}$$

(2.26)

$$\phi_{i+1}(x) = A_5 \cosh\left(\frac{x - x_i}{L_{i+1}}\right) + A_6 \sinh\left(\frac{x - x_i}{L_{i+1}}\right)$$

Finalmente, utilizando-se as Eqs. (2.26), (2.14) e (2.21) a (2.23), obtêm-se as seguintes expressões analíticas aproximadas, para os coeficientes de acoplamento, no caso de 5 nodos interagentes:

$$w_{i(i-2)} = \frac{D_{i-1} | A_2 |}{L_{i-1} \Delta X_i}$$

$$w_{i(i-1)} = \frac{L_{i-1}}{\Delta X_i} \left[ A_1 \sinh \frac{\Delta X_{i-1}}{L_{i-1}} + A_2 \left( \cosh \frac{\Delta X_{i-1}}{L_{i-1}} - 1 \right) \right]$$

$$w_{ii} = \frac{L_i}{\Delta X_i} \left[ A_3 \sinh \frac{\Delta X_i}{L_i} + A_4 \left( \cosh \frac{\Delta X_i}{L_i} - 1 \right) \right] + 1 \quad (2.27)$$

$$w_{i(i+1)} = \frac{L_{i+1}}{\Delta X_i} \left[ A_5 \sinh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}} + A_6 \left( \cosh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}} - 1 \right) \right]$$

$$w_{i(i+2)} = \frac{D_{i+1}}{L_{i+1} \Delta X_i} \left[ A_5 \sinh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}} + A_6 \cosh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}} \right]$$

As constantes  $A_i$  que aparecem nas Eqs. (2.27), são as constantes de aconlamento das Eqs. (2.26), divididas por  $S_i$ . Suas expressões foram obtidas, explicitamente, no Apêndice A, na aplicação das condições de contorno, Fns. (2.25) às Fcs. (2.26).

Os fatores de aconlamento  $w_{ij}$ , expressos nas Eqs. (2.27), são válidos para os nodos de números 2 até  $N-1$ . Para os nodos  $i=1$  e  $i=N$ , resolveram-se problemas particulares semelhantes. (Apêndice A).

### 2.3 Forma Matricial Explícita da Equação Nodal de Balanço Neutrônico

Uma vez obtidas as expressões para os fatores  $w_{ij}$ , têm-se, conseqüentemente, os fatores  $C_{ij}$  dados pela Eq. (2.9). Dessa forma, a matriz de coeficientes  $\underline{C}$  na Eq. (2.10) está determinada e a equação de balanço neutrônico pode ser aplicada.



A matriz de coeficientes da Eq. (2.28) é tridiagonal, ao passo que, a da Eq. (2.29) é pentadiagonal. Estas formas são idênticas às que ocorrem quando a equação de difusão de nêutrons é expressa em diferenças finitas<sup>(7)</sup>.

Finalmente, observa-se que nas equações matriciais acima, omitiu-se os termos de fuga de nêutrons para os refletores. Como a distribuição de fluxo de nêutrons nos nós externos da zona combustível da placa é bem menor do que nos nós centrais, este procedimento acarreta um pequeno desvio nas distribuições de fluxo calculados.

## CAPÍTULO 3

### 3. UTILIZAÇÃO DO MÉTODO NODAL ABSORÇÃO-PRODUÇÃO EM CÁLCULOS ESTÁTICOS

Neste capítulo é feita uma comparação entre o método nodal absorção-produção e o método de diferenças finitas, aplicado à equação de difusão de nêutrons, em uma dimensão e um grupo de energia, para cálculos estáticos de distribuições de fluxo de nêutrons. Os cálculos nodais foram realizados pelos programas NOD3 e NOD5 (Seção 3.1), enquanto que os cálculos de diferenças finitas foram efetuadas pelo programa CITATION<sup>(9)</sup> (Anêndice C). Os cálculos de diferenças finitas servem de padrão, isto é, a partir deles, por comparação, é que discute-se a validade, vantagens e desvantagens do modelo nodal. As constantes nucleares, de entrada para os programas nodais e CITATION, foram geradas pelos programas LEONOD e LFOCIT, os quais são versões modificadas do programa LEOPARD<sup>(3)</sup> (Anêndice C).

#### 3.1 Programas Nodais

As relações do Anêndice A foram incorporadas em dois programas de computador, semelhantes, em linguagem FORTRAN IV, designados por NOD3 e NOD5, respectivamente, para 3 e 5 nodos acoplados\*. Estes programas calculam os coeficientes  $V_{ij}$  e  $C_{ij}$  para cada um dos nodos em que foi dividida a placa (Figura 2.1). A seguir, entram com os valores  $C_{ij}$  nos sistemas (2.28) e (2.29) e os resolve pelo processo iterativo de Gauss-Sidel<sup>(22)</sup>. Uma vez atingido o grau de convergência pré-fixado, obtêm-se as distribuições do fluxo de nêutrons e de potência e o fator de multiplicação efetivo de nêutrons do sistema.

#### 3.2 Problemas Estudados

Problema 1: Consiste de uma placa homogênea, infinita

---

\* Neste trabalho, as expressões "método nodal" e "programa nodal" referem-se indistintamente aos esquemas nodais com 3 e com 5 nodos acoplados.

nas direções y e z, com espessura igual a 200cm na direção x, com refletores de nêutrons de 15 cm de espessura, à esquerda e à direita, respectivamente (Figura 3.1). A composição da placa é a da célula combustível do reator nuclear Angra-I, onde o urânio, presente nas pastilhas de  $UO_2$ , está enriquecido em 3,1% em  $U-235$ . Os refletores são constituídos de  $H_2O$ .

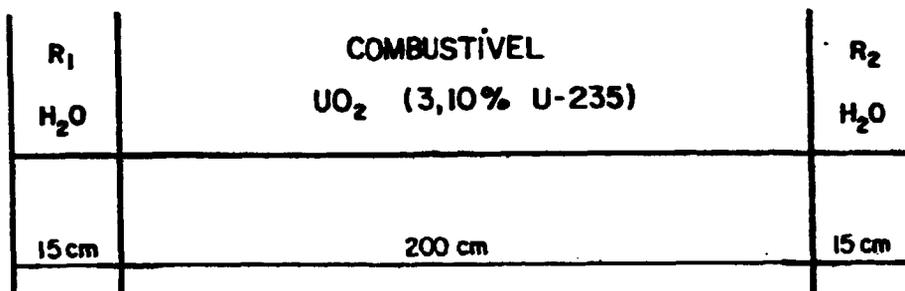


Figura 3.1 - Placa infinita refletida com composição combustível uniforme

Problema 2: Similar ao Problema 1, diferindo deste na espessura da placa, que é de 180 cm, e pelo fato de apresentar três zonas combustíveis com enriquecimentos diferentes (Figura 3.2). As composições da placa correspondem às três células combustíveis do reator Angra-I, ou seja, as zonas combustíveis, caracterizadas na figura abaixo, contêm  $UO_2$  com urânio enriquecido em U-235 em 2,1%, 2,6% e 3,1%, respectivamente.

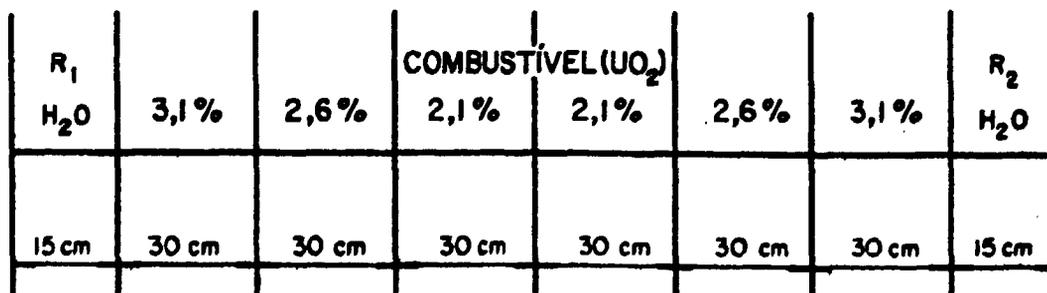


Figura 3.2 - Placa infinita refletida com 3 composições combustíveis.

### 3.3 Seleção de Tamanhos Nodais

Utilizando-se o programa CITATION (diferenças finitas) e os programas nodais, NOD3 e NOD5, calculou-se distribuições de fluxo de nêutrons e fatores efetivos de multiplicação de nêutrons para a placa do Problema 1. Os cálculos de diferenças finitas foram efetuados com malhas de 1 cm. Os cálculos nodais foram feitos para diversos tamanhos dos nodos.

Com este procedimento, comparando os resultados em cada caso, pode-se delimitar, aproximadamente, os seguintes tamanhos nodais ótimos (que possibilitam maior precisão do modelo nodal em comparação ao de diferenças finitas): para o esquema de 3 nodos acoplados,  $\Delta X = 2,304L = 18\text{cm}$  e para o esquema de 5 nodos acoplados,  $\Delta X = 1,408L = 11\text{cm}$ . ( $L =$  comprimento de difusão de nêutrons do combustível).

Nota-se que, ao aumentar ou diminuir esses tamanhos nodais, diminui-se a precisão do modelo nodal, isto é, aumenta-se o valor absoluto do desvio relativo dos resultados nodais em relação aos de diferenças finitas.

Como, nem sempre é possível subdividir o sistema em tudo, em nodos com os tamanhos ótimos, estabeleceu-se, aproximadamente, os seguintes intervalos em que os tamanhos nodais deverão ser escolhidos:  $2,048L \leq \Delta X \leq 2,560L$  (no caso,  $16\text{cm} \leq \Delta X \leq 20\text{cm}$ ), para 3 nodos acoplados e  $1,152L \leq \Delta X \leq 1,664L$  (no caso,  $9\text{cm} \leq \Delta X \leq 13\text{cm}$ ), para 5 nodos acoplados.

Exprime-se os tamanhos nodais ótimos, ou os intervalos em que os tamanhos nodais devem ser escolhidos na prática, em termos de comprimentos de difusão de nêutrons  $L$ , porque  $L$  está relacionado diretamente com a distância média que o nêutron afasta-se da fonte até ser absorvido<sup>(7,14)</sup>. Com este procedimento, os tamanhos nodais são estabelecidos de forma equivalente, do ponto de vista neutrônico, independentemente da composição do combustível nuclear.

### 3.4 Estudo de Parâmetros de Interesse

### 3.4.1 Variação dos coeficientes $V_{ij}$ com a espessura dos nodos interagentes

Para o Problema 1 executou-se o programa MONS variando a espessura dos nodos interagentes. Os coeficientes  $V_{ij}$  obtidos são apresentados na Tabela 3.1.

$\Delta X$ (cm)	$\Delta X/L$	$W_{1,1-2}$	$W_{1,1-1}$	$W_{1,1}$	$W_{1,1+1}$	$W_{1,1+2}$
5	0,6401	$2,391 \times 10^{-1}$	$1,432 \times 10^{-1}$	$2,355 \times 10^{-1}$	$1,432 \times 10^{-1}$	$2,391 \times 10^{-1}$
10	1,280	$8,430 \times 10^{-2}$	$1,989 \times 10^{-1}$	$4,336 \times 10^{-1}$	$1,989 \times 10^{-1}$	$8,430 \times 10^{-2}$
15	1,920	$3,326 \times 10^{-2}$	$1,890 \times 10^{-1}$	$5,554 \times 10^{-1}$	$1,890 \times 10^{-1}$	$3,326 \times 10^{-2}$
20	2,560	$1,400 \times 10^{-2}$	$1,662 \times 10^{-1}$	$6,396 \times 10^{-1}$	$1,662 \times 10^{-1}$	$1,400 \times 10^{-2}$
25	3,201	$6,114 \times 10^{-3}$	$1,437 \times 10^{-1}$	$7,003 \times 10^{-1}$	$1,437 \times 10^{-1}$	$6,114 \times 10^{-3}$
30	3,841	$2,737 \times 10^{-3}$	$1,246 \times 10^{-1}$	$7,452 \times 10^{-1}$	$1,246 \times 10^{-1}$	$2,737 \times 10^{-3}$
35	4,481	$1,249 \times 10^{-3}$	$1,091 \times 10^{-1}$	$7,794 \times 10^{-1}$	$1,091 \times 10^{-1}$	$1,249 \times 10^{-3}$
40	5,121	$5,794 \times 10^{-4}$	$9,647 \times 10^{-2}$	$8,059 \times 10^{-1}$	$9,647 \times 10^{-2}$	$5,794 \times 10^{-4}$

Tabela 3.1 - Variação dos coeficientes  $W_{ij}$  com a espessura  $\Delta X$  dos nodos.

Examinando esta tabela, tem-se uma idéia da variação das probabilidades  $V_{ij}$  com a relação  $\Delta X/L$  dos nodos interagentes. Por exemplo, quando  $\Delta X/L = 2,560$ , apenas 2,8% dos nêutrons produzidos em  $i$  migram para além dos nodos  $i-1$  e  $i+1$ . Pode-se notar também que, efetivamente, menos de 1% dos nêutrons produzidos na região  $i$  são absorvidos em nodos à esquerda de  $i-2$  e à direita de  $i+2$ , isto é, em nodos não considerados no acoplamento.

### 3.4.2 Precisão no cálculo de $V_{ef}$ com a espessura total da placa

Fez-se um estudo de como a precisão do método nodal é influenciada pela espessura total da placa e concluiu-se

que, mantendo-se fixas as dimensões dos nós e aumentando-se a espessura total da placa, verifica-se que a precisão no cálculo de  $K_{ef}$ , dada pelo método nodal, aumenta lentamente e de forma aproximadamente linear. Esse aumento na precisão era esperado pois, aumentando a espessura da placa, o gradiente do fluxo de nêutrons torna-se menos acentuado, o que concorda em maior grau com a hipótese de distribuição plana de fontes neutrônicas feita na obtenção dos fatores  $P_{ij}$ . No entanto, esta variação na precisão do valor calculado do  $K_{ef}$  com a espessura total do sistema, é desprezível. Isso fica evidenciado pelo estudo apresentado nas Tabelas 3.2 e 3.3, onde fixou-se a espessura dos nós em 10cm e 20cm, respectivamente, e variou-se o número de nós, ou seja, a espessura total da região combustível na Figura 3.1.

ESPESSURA (cm)	$K_{CIT}$	$K_{NOD3}$	DESVIO (%)	$K_{NOD5}$	DESVIO (%)
100	1,2827	1,3022	+1,52	1,2865	+0,30
120	1,2933	1,3084	+1,17	1,2963	+0,23
140	1,3004	1,3124	+0,92	1,3020	+0,10
160	1,3055	1,3153	+0,75	1,3075	+0,15
180	1,3092	1,3173	+0,62	1,3100	+0,13
200	1,3120	1,3188	+0,52	1,3134	+0,11

Tabela 3.2 - Precisão do  $K_{ef}$  para várias espessuras da placa (espessura do nó:  $\Delta X=10\text{cm}=1,280L$ )

ESPESSURA (cm)	$K_{CIT}$	$K_{NOD3}$	DESVIO (%)	$K_{NOD5}$	DESVIO (%)
100	1,2827	1,2800	-0,21	1,2731	-0,75
140	1,3004	1,2983	-0,16	1,2936	-0,52
160	1,3055	1,3036	-0,15	1,2996	-0,45
200	1,3120	1,3105	-0,11	1,3076	-0,34

Tabela 3.3 - Precisão do  $K_{ef}$  para várias espessuras da placa (espessura do nó:  $\Delta X=20\text{cm}=2,560L$ )

O fato de os desvios apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3 serem positivos e negativos, respectivamente, está relacionado com a escolha dos tamanhos nodais (Seção 3.3). No caso da Figura 3.2 o tamanho nodal encontra-se um pouco abaixo do valor ótimo (que é cerca de 11cm): se estivesse um pouco acima, os desvios seriam negativos! No caso da Figura 3.3 o tamanho nodal está um pouco acima da espessura ótima (que é cerca de 18cm): se estivesse um pouco abaixo, os desvios seriam positivos! Em ambos os casos, utilizando-se os tamanhos nodais ótimos, os resultados nodais apresentariam uma concordância muito melhor com os de diferenças finitas.

### 3.4.3 Tempos gastos de unidade central de processamento (CPU)

A Tabela 3.4 abaixo relaciona os tempos de CPU, gastos pelos programas NOD3, NOD5 e CITATION, na resolução do Problema 1. Tomou-se nodos de 20cm para os programas nodais e malhas de 1cm para o programa CITATION. Assim o Problema 1 foi resolvido mudando apenas as precisões  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , requeridas na convergência da distribuição do fluxo de nêutrons e do fator efetivo de multiplicação de nêutrons do sistema, respectivamente.

PRECISÃO		TEMPO GASTO DE CPU (s)		
$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	CITATION	NOD3	NOD5
$10^{-1}$	$10^{-2}$	6,50	0,68	0,78
$10^{-2}$	$10^{-3}$	8,70	0,73	0,79
$10^{-3}$	$10^{-4}$	9,49	0,84	0,94
$10^{-4}$	$10^{-5}$	11,95	0,88	1,06
$10^{-5}$	$10^{-6}$	15,10	1,12	1,24
$10^{-6}$	$10^{-7}$	18,81	1,25	1,44
$10^{-7}$	$10^{-8}$	22,99	1,53	1,77
$10^{-8}$	$10^{-9}$	36,35	1,67	1,93
$10^{-9}$	$10^{-10}$	37,16	1,89	2,09

Tabela 3.4 - Comparação entre tempos gastos de CPU

Comparando os valores da tabela, tem-se que os tempos de CPU gastos pelos programas NOD3 e NOD5 são muito menores que os tempos de CPU, correspondentes, gastos pelo programa CITATION (por um fator de 10). Tem-se ainda que os tempos de CPU gastos pelos programas NOD3 e NOD5, são comparáveis.

A vantagem em tempo de CPU gasto pelo método nodal, sobre o método de diferenças finitas é perfeitamente explicável: como o método nodal efetua o balanço neutrônico em regiões relativamente grandes, o sistema de equações lineares nodais contém muito menos equações que o sistema originado pelo método de diferenças finitas (para o problema em questão tem-se 10 equações para o método nodal e 210 equações para o método de diferenças finitas). Além disso, o tempo gasto no cálculo dos coeficientes  $W_{ij}$  de acoplamento nodais é consideravelmente pequeno ( $\sim 0,5s$  neste caso)

Observa-se, ainda, que outros fatores que poderiam estar contribuindo para essas diferenças nos tempos de CPU, os quais não são examinados aqui, são os métodos iterativos usados nas resoluções dos sistemas de equações lineares em cada programa.

### 3.5 Comparação dos Resultados Obtidos

Algumas comparações já foram feitas nas Seções 3.3 e 3.4. Apresentamos agora, nos gráficos das Figuras 3.3 a 3.6, uma comparação das distribuições de fluxo de nêutrons e do fator efetivo de multiplicação de nêutrons, obtidos nas soluções dos Problemas 1 e 2 (Seção 3.2), executando-se os programas NOD3, NOD5 e CITATION. Para a solução do Problema 1 tomou-se nodos de 20 cm e de 10cm para os programas NOD3 e NOD5, respectivamente. Para os cálculos referentes ao Problema 2, tomou-se nodos de 15cm de espessura, tanto para o programa NOD3, como para o NOD5 (esta espessura está um pouco fora dos intervalos sugeridos na Seção 3.3 mas, como já foi mencionado, aqueles intervalos foram delimitados de forma aproximada). Todos os cálculos de diferenças finitas foram feitos com malhas de 1cm e os resultados nodais foram normalizados para efeito de comparação.

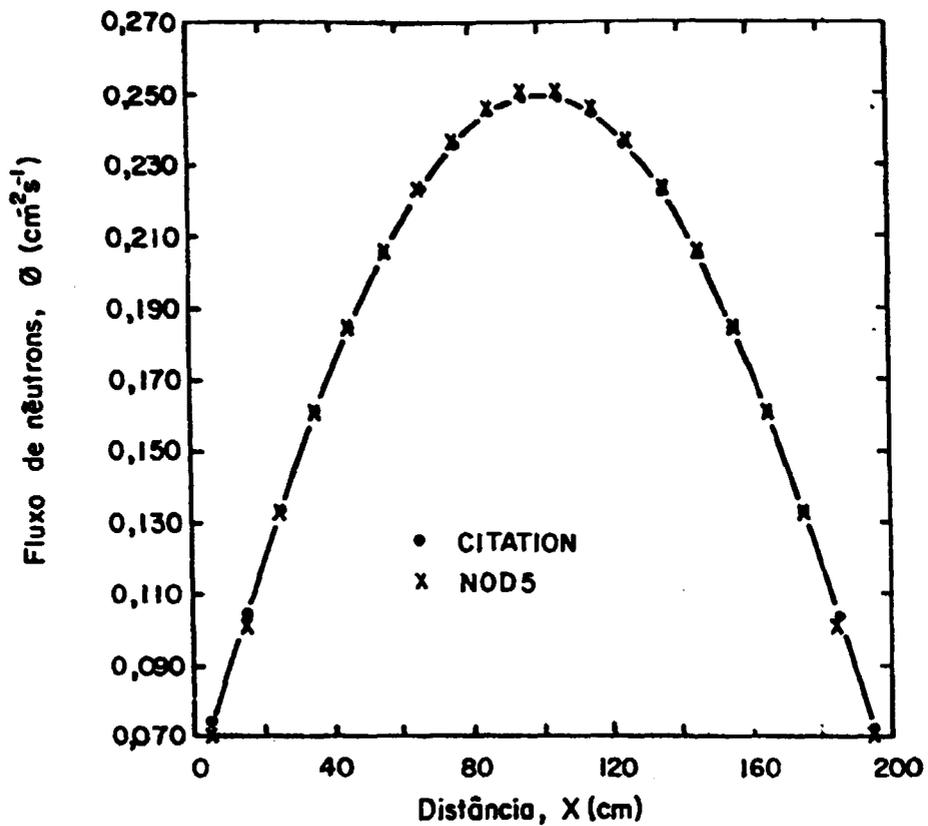


Figura 3.3 - Comparação das distribuições de fluxo de nêutrons calculadas pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X = 10 \text{ cm} = 1,280L$ ) para o Problema 1.

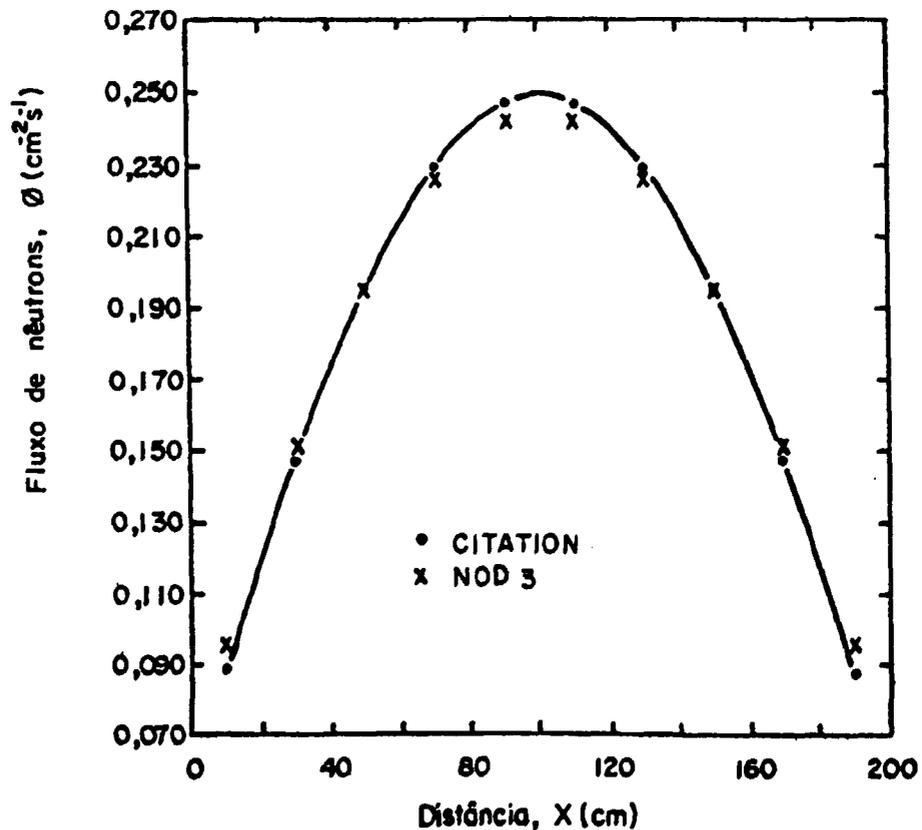


Figura 3.4 - Comparação das distribuições de fluxo de nêutrons calculadas pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X = 20 \text{ cm} = 2,560L$ ) para o Problema 1.

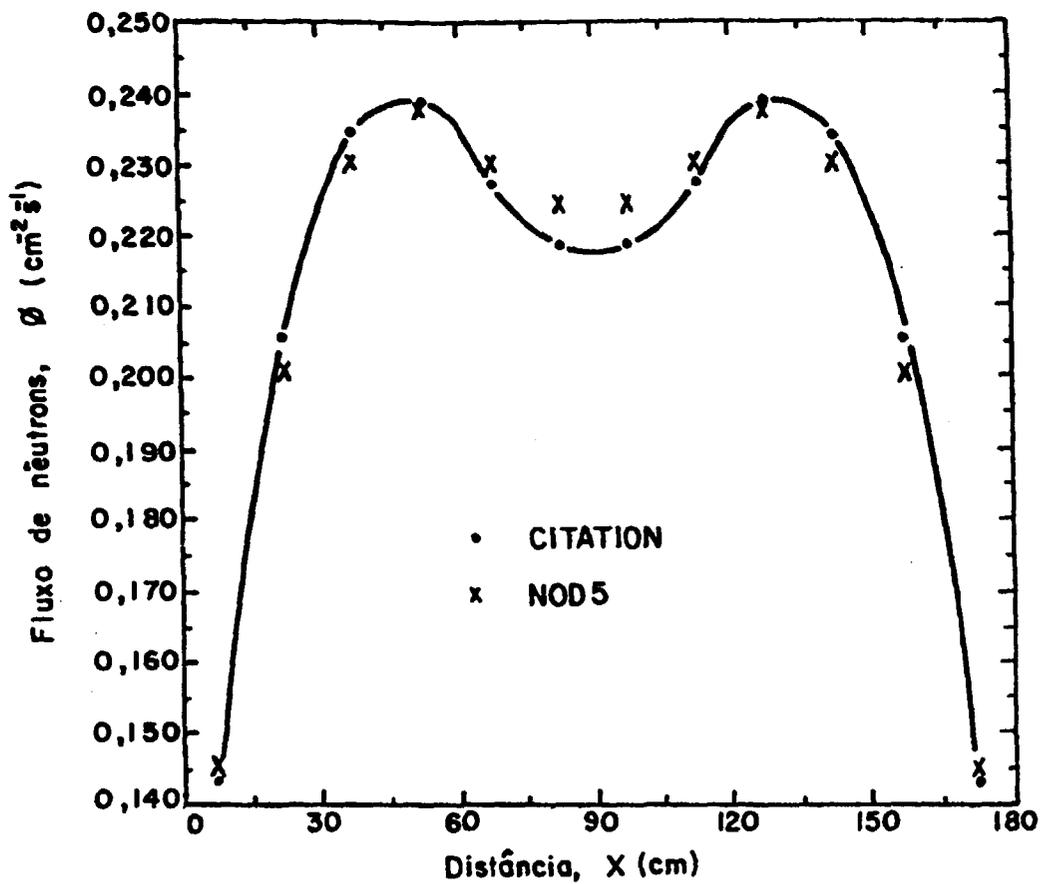


Figura 3.5 - Comparação das distribuições de fluxo de nêutrons calculados pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=15\text{cm} = 1,920\%$ ) para o Problema 2.

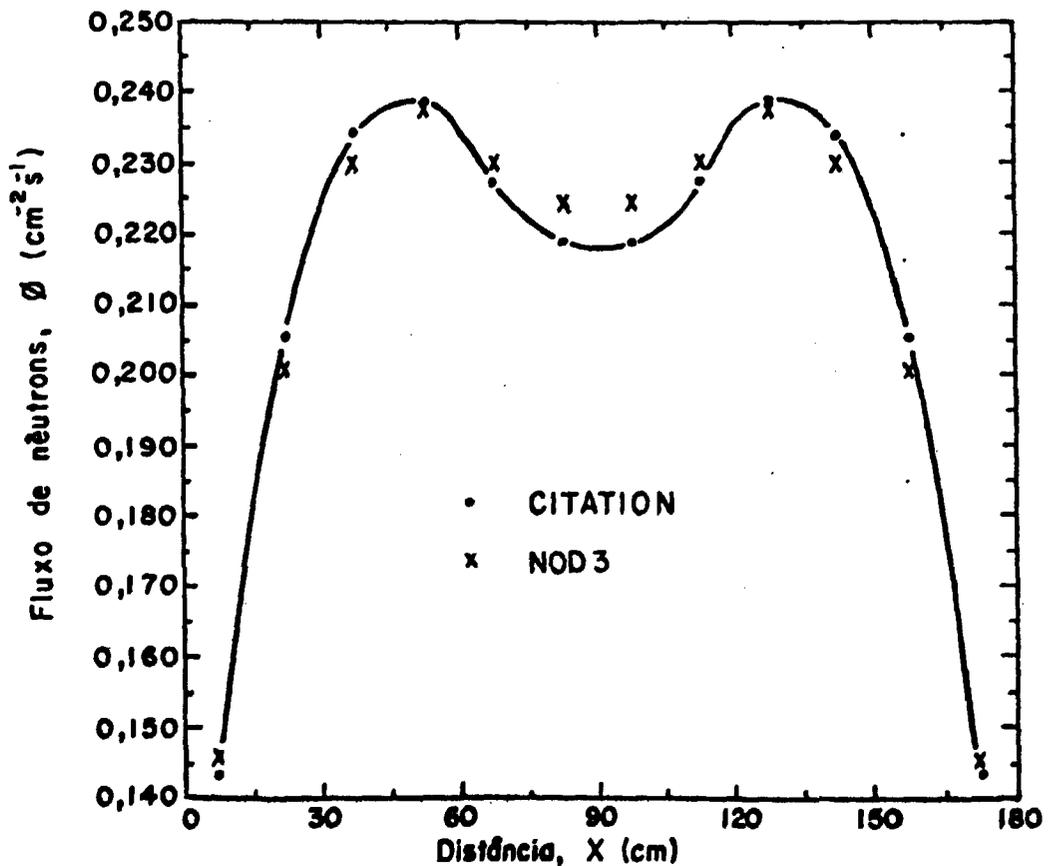


Figura 3.6 - Comparação das distribuições de fluxo de nêutrons calculados pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=15\text{cm}=1,920\%$ ) para o Problema 2.

Os desvios relativos máximos nas distribuições de fluxo de nêutrons apresentadas, respectivamente, nas Figuras 3.3 a 3.6, são: -3,31%, 7,14%, 2,51% e -4,74%.

Para completar as informações dos gráficos acima, reuniu-se na Tabela 3.5 os fatores efetivos de multiplicação de nêutrons e os tempos de CPU gastos.

	$K_{CIT}$	$K_{NOD3}$	$K_{NOD5}$	DFSVID (%)	$t_{CIT}$ (s)	$t_{NOD}$ (s)
Fig. 3.3	1,3120		1,3134	+0,11	22,1	4,1
Fig. 3.4	1,3120	1,3105		-0,11	21,2	1,6
Fig. 3.5	1,2633		1,2612	-0,17	17,9	2,6
Fig. 3.6	1,2633	1,2670		+0,29	17,9	2,6

Tabela 3.5 - Fatores efetivos de multiplicação de nêutrons e tempos de CPU para os Problemas 1 e 2.

Os resultados apresentados nas Figuras 3.3 a 3.6 e na Tabela 3.5, mostram uma concordância boa entre os resultados obtidos com o método nodal absorção-produção e os obtidos com o método de diferenças finitas.

Comparando-se os dois esquemas nodais entre si, isto é, com 3 e com 5 nodos interagentes, pode-se afirmar que eles são equivalentes. Esta equivalência e a concordância dos resultados nodais com os de diferenças finitas, depende apenas de uma escolha adequada dos tamanhos nodais usados nos cálculos (Secção 3.3).

Quanto ao tempo gasto de CPU, os programas nodais apresentam nítida vantagem em relação ao de diferenças finitas, (Tabelas 3.4 e 3.5). Quanto à quantidade de memória de computador utilizada, não foi feito um estudo comparativo explícito, mas, o seguinte argumento mostra que, também neste caso, o método nodal é muito mais econômico que o de diferenças finitas: no método de diferenças finitas solucionou-se um sistema com 210 equações, enquanto que, no método nodal o número máximo de equações foi igual a 20. Concluímos então que a economia de memória de computador e de tempo gasto de CPU, são as principais vantagens do método nodal absorção-produção sobre o método de diferenças finitas.

## CAPITULO 4

### 4. UTILIZAÇÃO DO MÉTODO NODAL ABSORÇÃO-PRODUÇÃO EM CÁLCULOS DINÂMICOS.

#### 4.1 Cálculos de Distribuições de Potência

Cálculos de distribuições de fluxo de nêutrons e de potência, considerando-se a queima do combustível nuclear são feitos como uma sequência de cálculos estáticos em que as constantes nucleares são geradas para vários valores discretos da queima do combustível. Nesses cálculos dinâmicos, os valores discretos da queima delimitam os intervalos de queima considerados.

Com o objetivo de realizar tais cálculos, elaborou-se o programa NOD1D (programa nodal para cálculos de distribuições de fluxo de nêutrons e de potência em uma dimensão e um grupo de energia), o qual engloba como subrotinas os programas NOD3 e NOD5 (Apêndice C). Paralelamente, efetua interpolações das constantes nucleares macroscópicas com a queima do combustível e/ou com a concentração de boro que torna o sistema crítico ( $k_{ef}=1$ ). Os resultados nodais foram comparados aos de diferenças finitas, os quais foram obtidos pelo programa CITATION.

As constantes nucleares foram geradas pelo programa LEONOD para entrada no programa NOD1D e pelo programa LFOCIT para entrada no programa CITATION. Ambos os programas, LFOCIT e LEONOD, são basicamente o programa LFOPARD com pequenas modificações (Apêndice C) <sup>(3,4)</sup>.

Deve-se mencionar aqui que os cálculos dinâmicos realizados pelo programa NOD1D apresentam uma outra aproximação, uma vez que, o programa NOD1D não considera a distribuição espacial, real, das concentrações de equilíbrio dos produtos de fissão. Ao invés disso, como os cálculos das constantes nucleares macroscópicas são feitos pelo programa LEONOD, para entrada no programa NOD1D, somente para uma distribuição média de densidade de potência, tem-se que a aproximação feita no programa nodal considera distribuições planas médias das concentrações de equilíbrio dos produtos de fissão, em cada intervalo de queima. Este procedimen

to acarreta algum erro nos cálculos nodais, dado que as concentrações de equilíbrio dos produtos de fissão (particularmente o Xenônio e o Samário) são maiores onde a distribuição do fluxo de nêutrons for maior.

#### 4.2 Problemas Solucionados

Os problemas solucionados são, essencialmente, os mesmos Problemas 1 e 2 propostos na Seção 3.2. Agora, porém, o tratamento é mais geral pois considera-se o caso dinâmico. Outras diferenças que devem ser assinaladas são as seguintes: as espessuras totais das regiões combustíveis das placas são iguais a 180cm tanto para o Problema 1 como para o Problema 2 e, neste último, a placa é composta de 5 zonas homogêneas de 36cm de espessura, seguindo a mesma seqüência de enriquecimentos do urânio da Figura 3.2.

Nos cálculos de diferenças finitas executados no programa CITATION usaram-se malhas de 1 cm e nos cálculos nodais feitos com o programa NOD1D tomaram-se nodos com 18 cm e 12 cm para os esquemas nodais de 3 e 5 nodos acoplados, respectivamente.

As constantes celulares para o programa NOD1D, no caso do Problema 1, foram geradas (através do programa LEONOD) para 13 intervalos de queima e 4 concentrações de boro, respectivamente, 200, 800, 2000MWD/MT, ... (o intervalo de queima de 2000MWD/MT é repetido sucessivamente a partir do terceiro intervalo) e 0, 1000, 2000 e 3000ppm de boro. No caso do Problema 2, as constantes nucleares foram geradas para 10 intervalos de queima (em alguns casos para menos intervalos) e para cinco concentrações de boro, respectivamente, 200, 800, 3000MWD/MT ... (o intervalo de queima de 3000MWD/MT é repetido sucessivamente a partir do terceiro intervalo) e 0, 1000, 2000, 3000 e 3500ppm de boro. Nos cálculos em que não é feita a interpolação para a concentração crítica de boro, essas constantes são geradas para uma única concentração de boro.

As constantes celulares para o programa CITATION, tanto no caso do Problema 1 como do Problema 2, foram geradas em correspondência às geradas para o programa NOD1D, mas normalmen

te para menos intervalos de queima, pois o programa CITATION apresenta uma limitação na quantidade de trocas possíveis de grupos de seções de choque. Além disso, o cálculo de concentrações críticas de boro pelo programa CITATION é feito de modo iterativo entre os programas LEOCIT e CITATION, onde, primeiramente, gera-se as constantes celulares pelo programa LEOCIT para uma dada concentração de boro e, em seguida, executa-se o programa CITATION para calcular as concentrações críticas (aproximadas) de boro para os intervalos de queima especificados. A seguir, usa-se estas concentrações como entrada no LEOCIT. Repete-se o processo pelo menos três vezes para obter-se um grau de convergência satisfatório (por exemplo, desvio em relação à iteração anterior menor do que 1%).

#### 4.3 Comparação dos Resultados Obtidos

Os resultados obtidos mais significantes são mostrados nos gráficos das Figuras 4.1 a 4.18 e tabelas 4.1 e 4.2. As Figuras 4.1 a 4.8 e 4.17 referem-se aos resultados do Problema 1 e as Figuras 4.9 a 4.16 e 4.18 referem-se aos resultados do Problema 2. As distribuições de potência foram graficadas apenas para dois ou três valores de queima para uma melhor visualização gráfica.

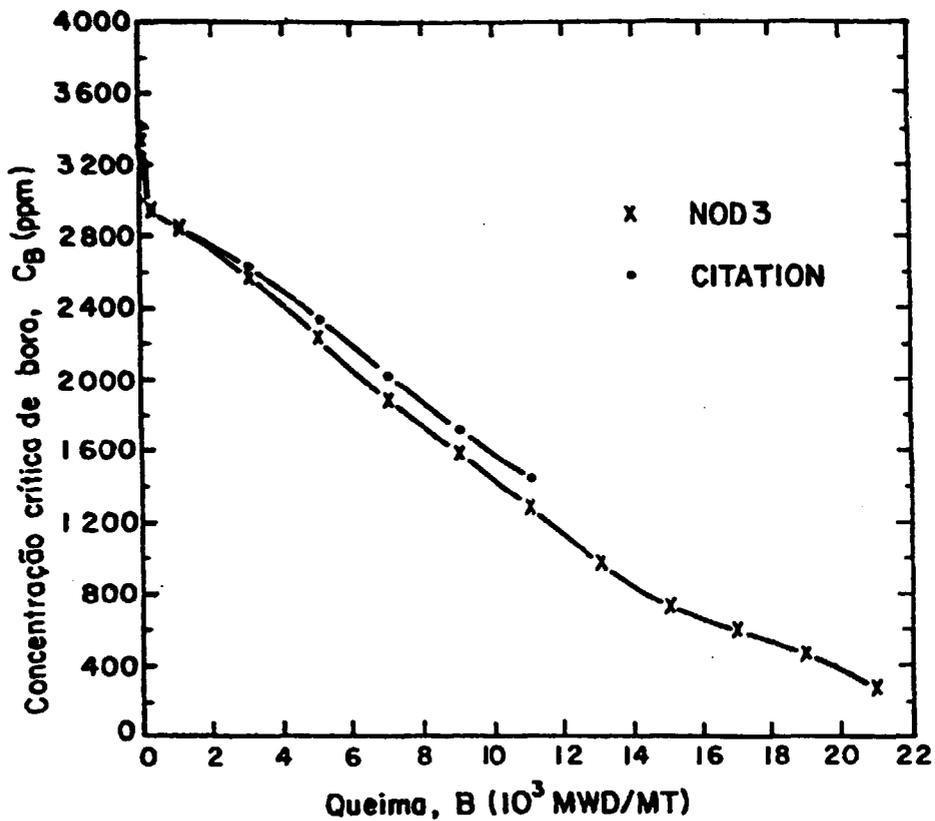


Figura 4.1 - Comparação das concentrações críticas de boro calculadas\* pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18\text{cm}=2,296\text{L}$ ) para o Problema 1.

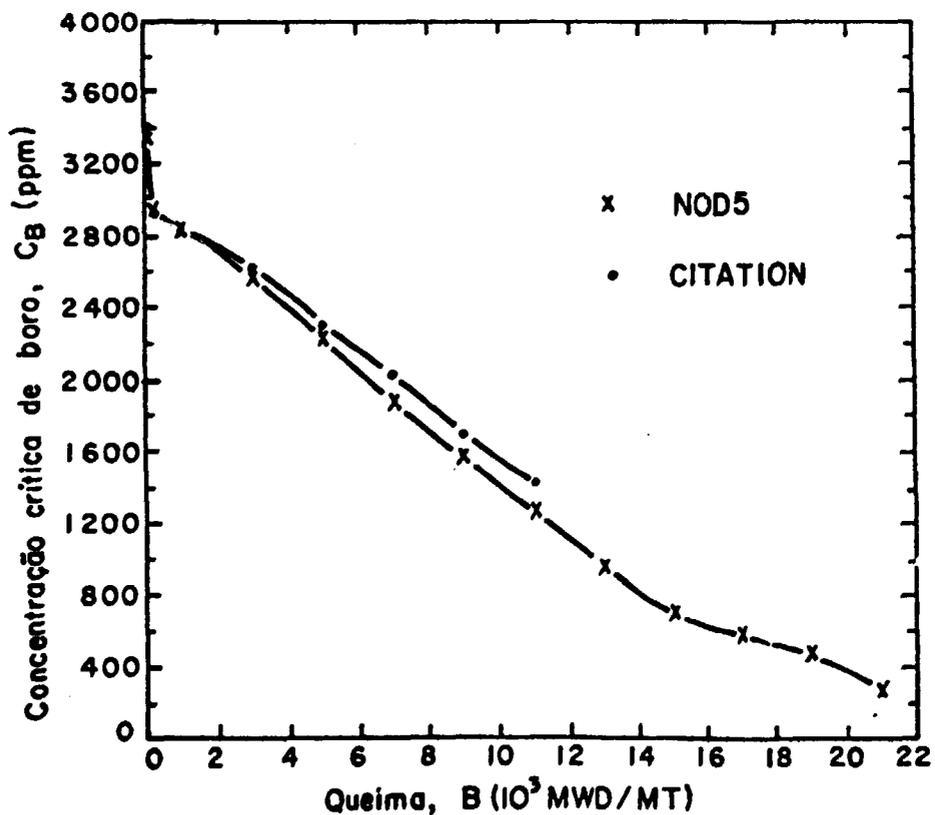


Figura 4.2 - Comparação das concentrações críticas de boro calculadas\* pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12\text{cm}=1,531\text{L}$ ) para o Problema 1.

\* em função da queima

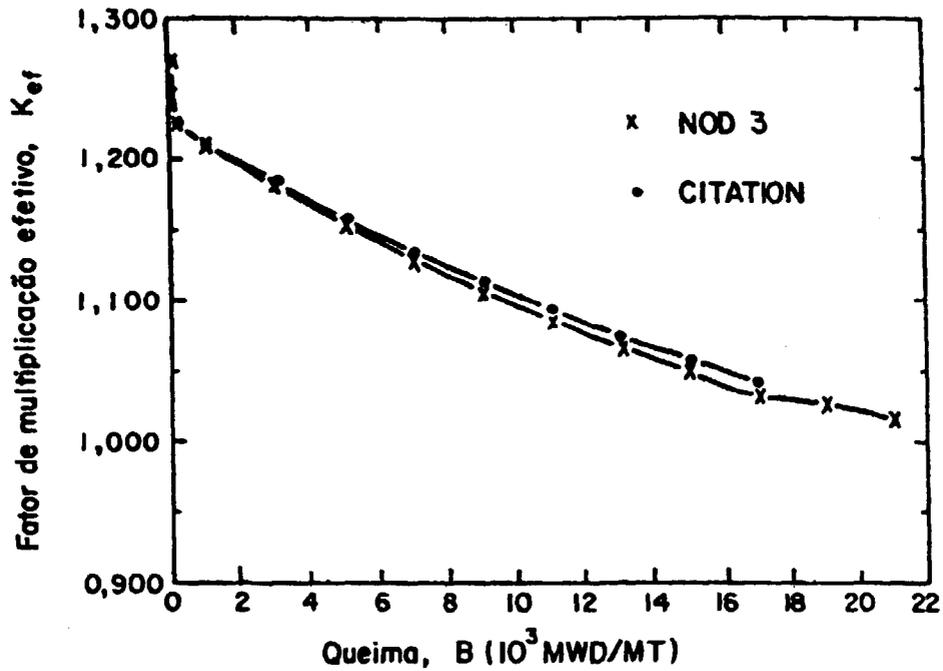


Figura 4.3 - Comparação dos fatores efetivos de multiplicação de nêutrons calculados, em função da queima, nos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18\text{cm}=2,296\text{L}$ ) para o Problema 1.

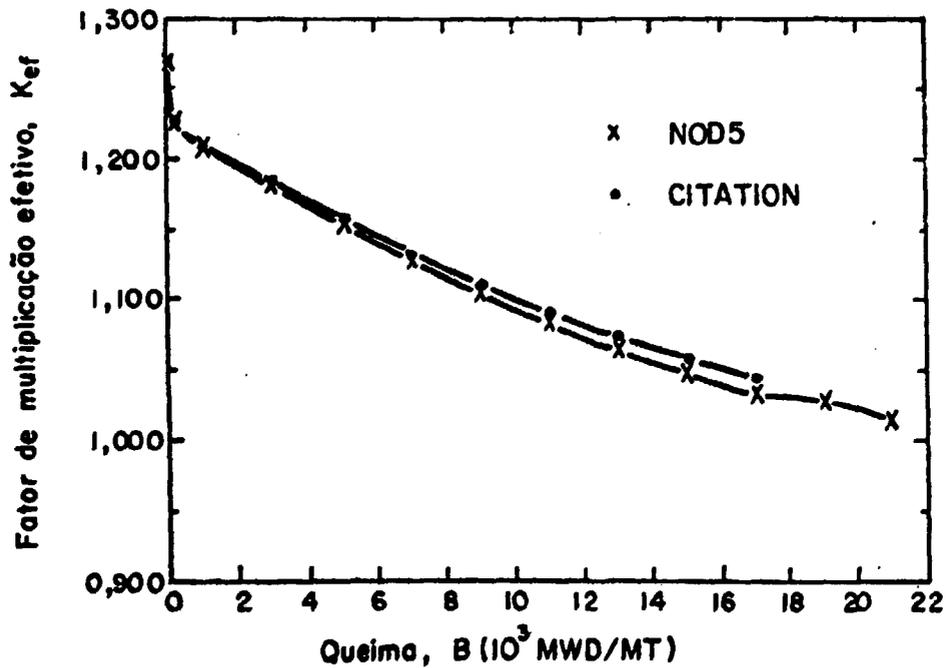


Figura 4.4 - Comparação dos fatores efetivos de multiplicação de nêutrons calculados, em função da queima, nos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12\text{cm}=1,531\text{L}$ ) para o Problema 1.

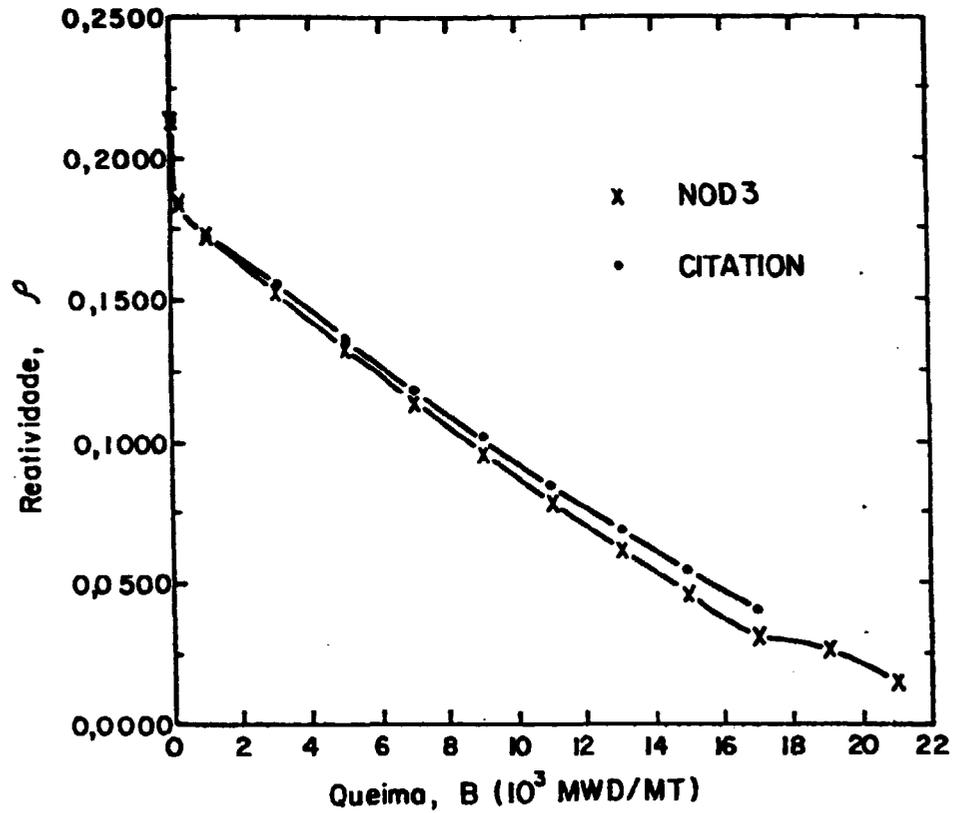


Figura 4.5 - Comparação da reatividade calculada, em função da queima, pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18\text{cm}=2,296\text{I.}$ ) para o Problema 1.

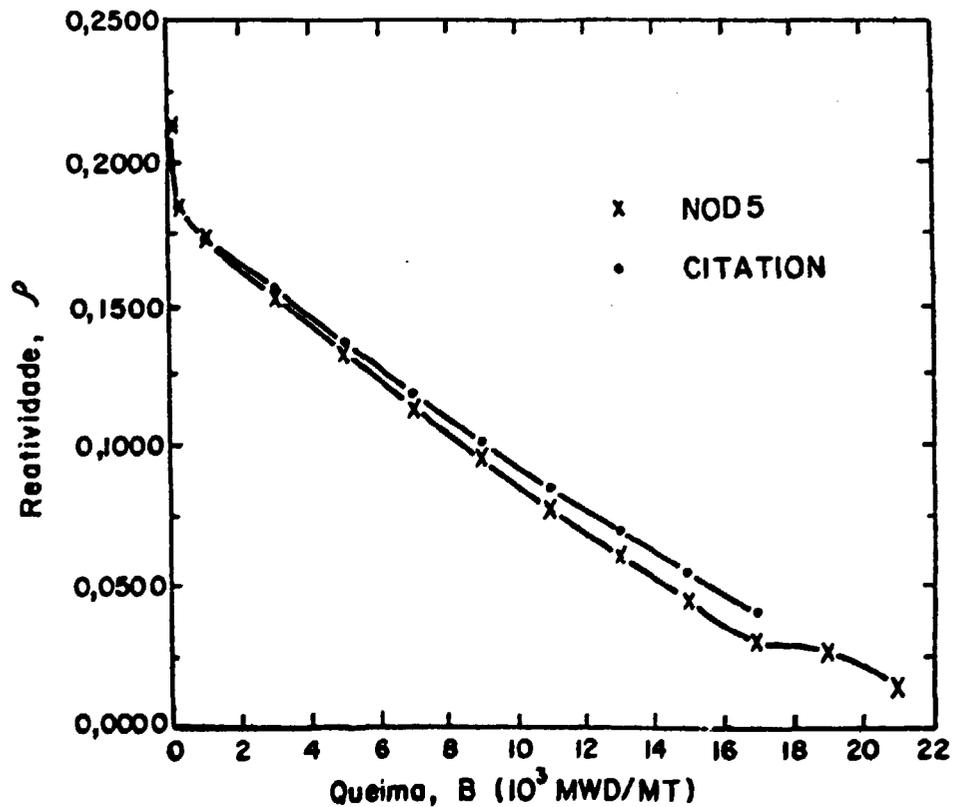


Figura 4.6 - Comparação da reatividade calculada, em função da queima, pelos programas CITATION e NOD 5 ( $\Delta X=12\text{cm}=1,531\text{I.}$ ) para o problema 1.

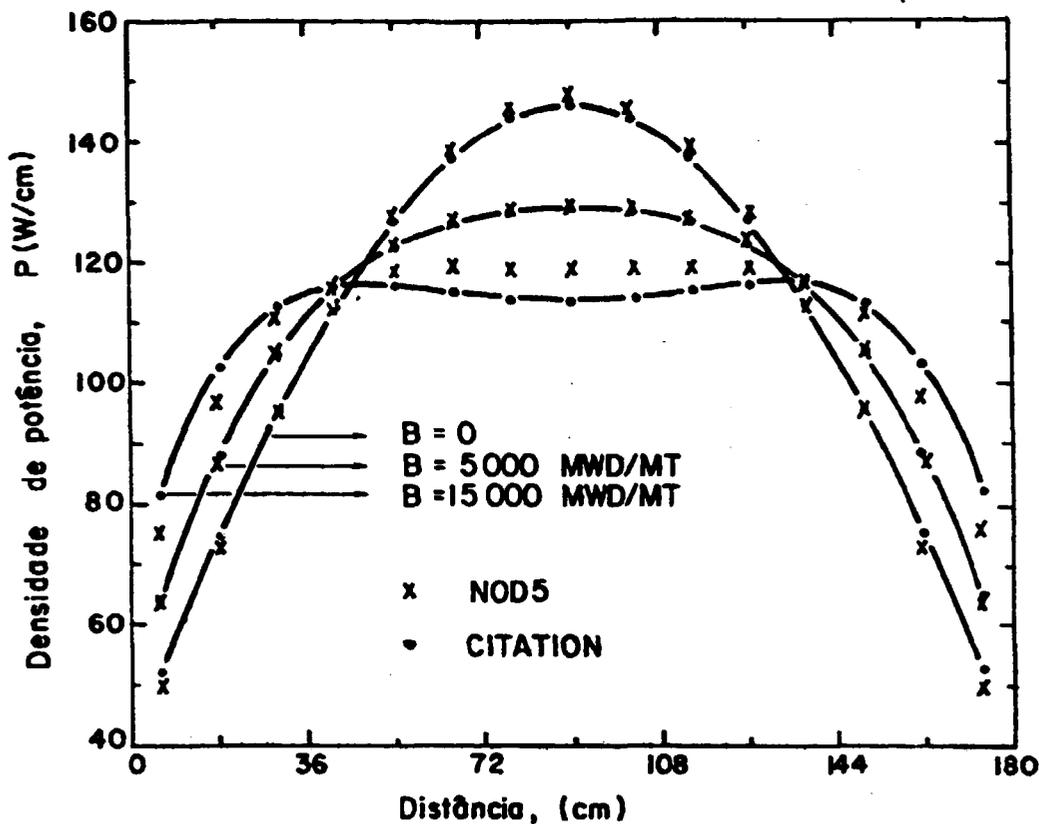


Figura 4.7 - Comparação das distribuições de potência calculadas, em função da queima, pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta x=12\text{cm}=1,531\text{L}$ ) para o Problema 1.

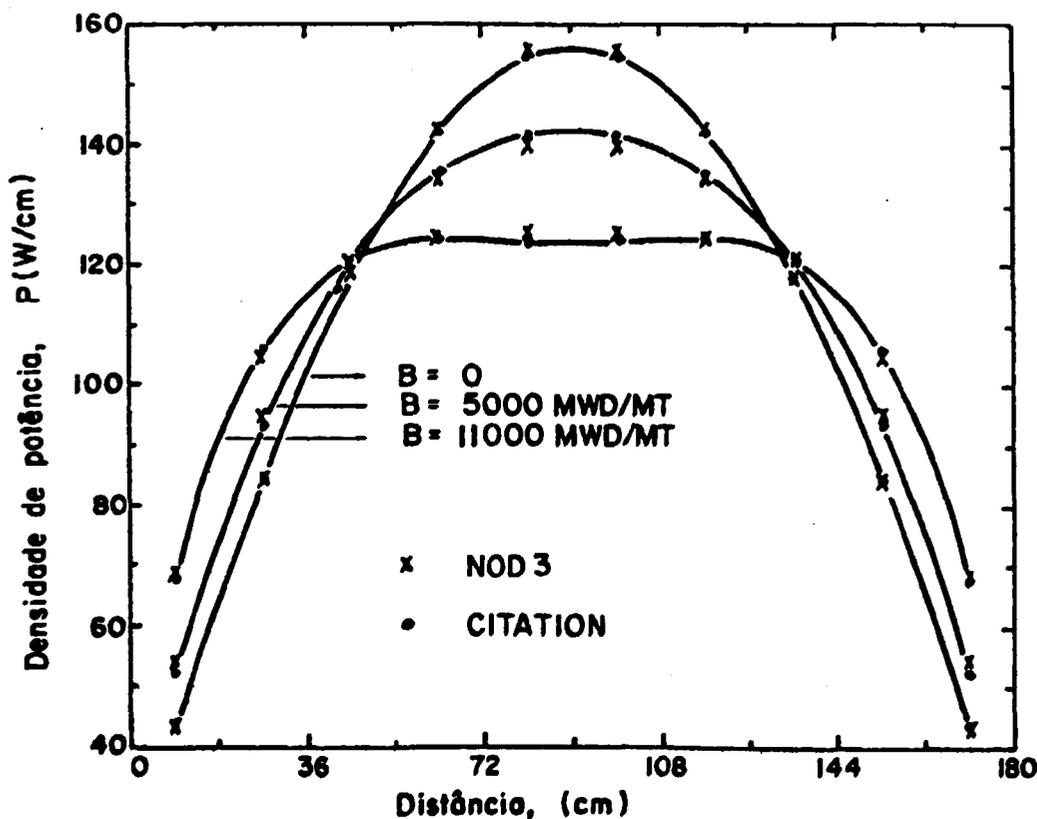


Figura 4.8 - Comparação das distribuições críticas calculadas, em função da queima, pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta x=18\text{cm}=2,296\text{L}$ ) para o Problema 1.

\* de potência

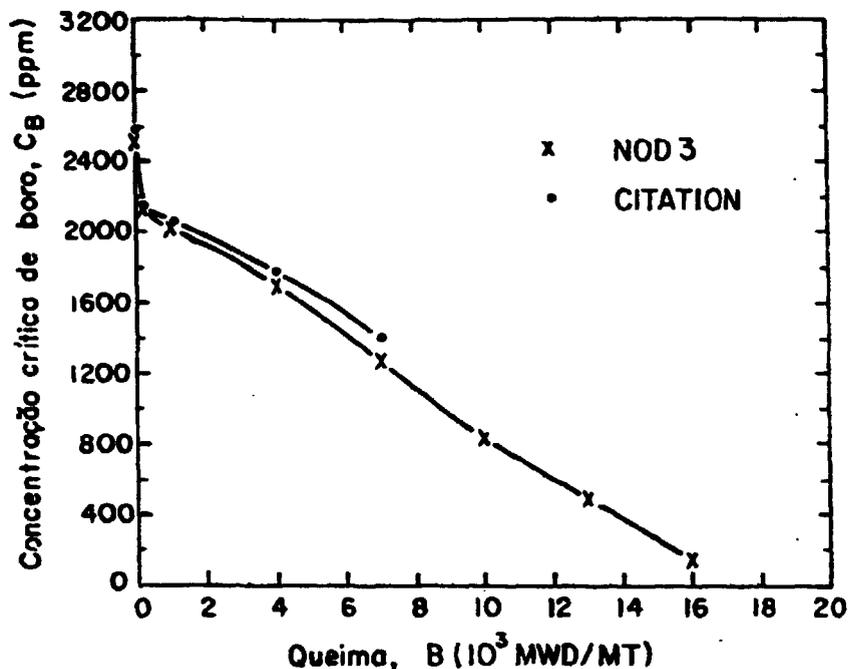


Figura 4.9 - Comparação das concentrações críticas de boro calculadas, em função da queima, pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18\text{cm}=2,296\text{L}$ ) para o Problema 2.

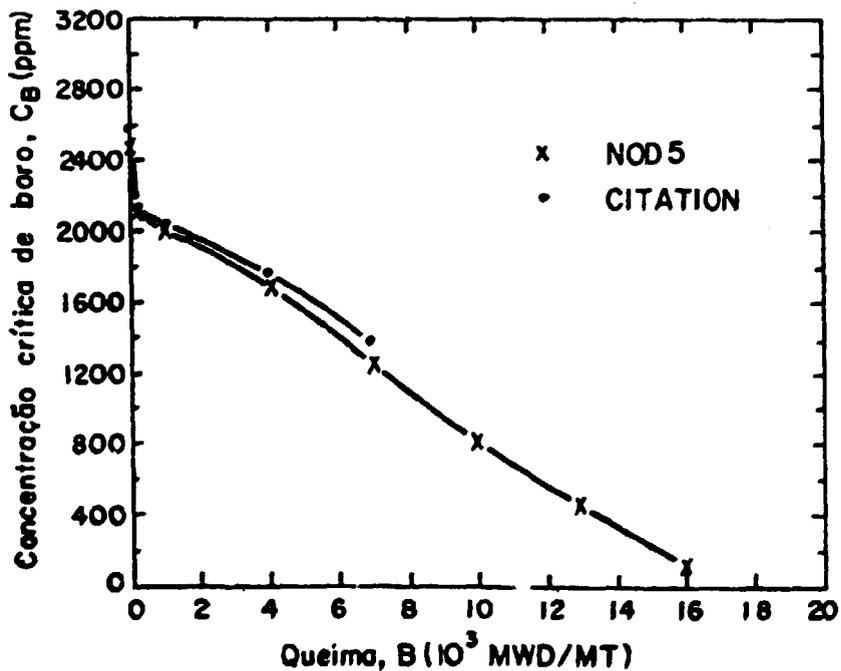


Figura 4.10 - Comparação das concentrações críticas de boro calculadas, em função da queima, pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12\text{cm}=1,531\text{L}$ ) para o Problema 2.

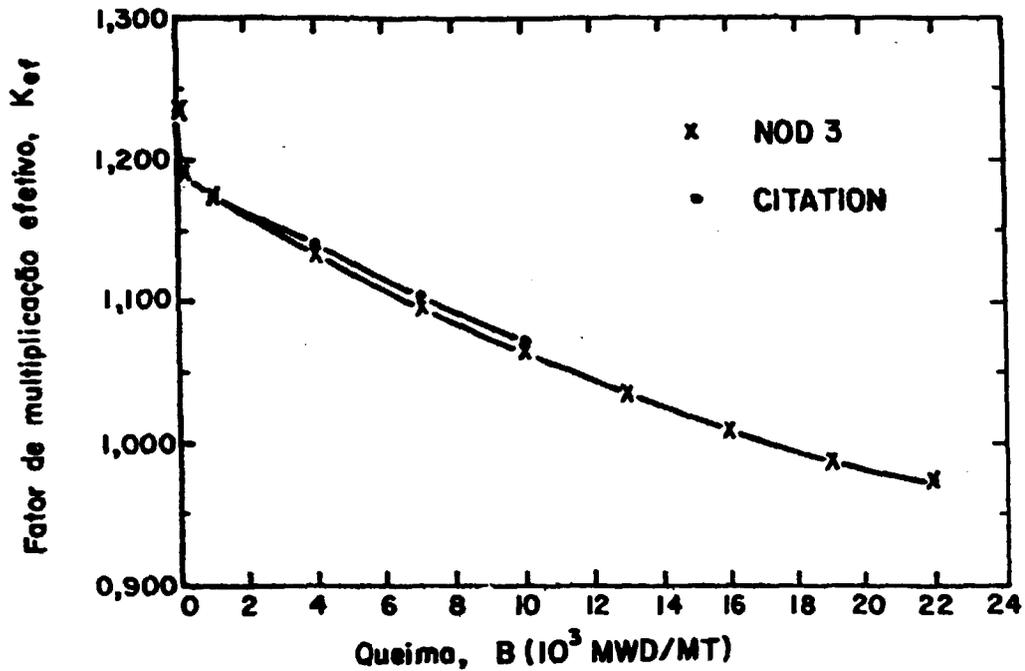


Figura 4.11 - Comparação dos fatores efetivos de multiplicação de nêutrons calculados, em função da queima, pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18\text{cm}=2,296\text{L}$ ) para o Problema 2.

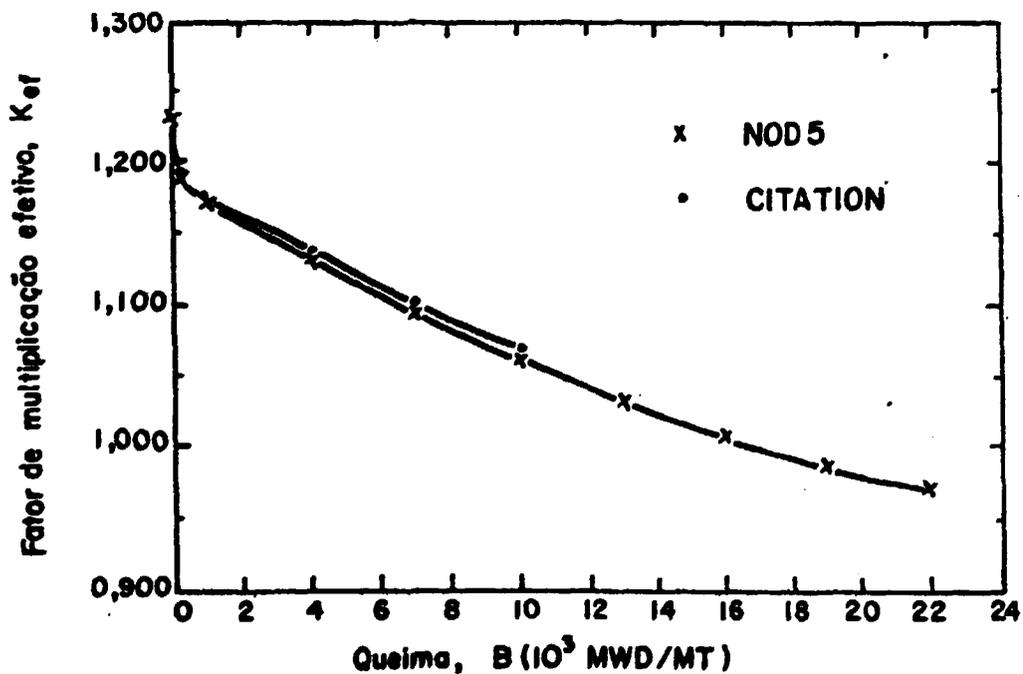


Figura 4.12 - Comparação dos fatores efetivos de multiplicação de nêutrons calculados, em função da queima, pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12\text{cm}=1,531\text{L}$ ) para o Problema 2.

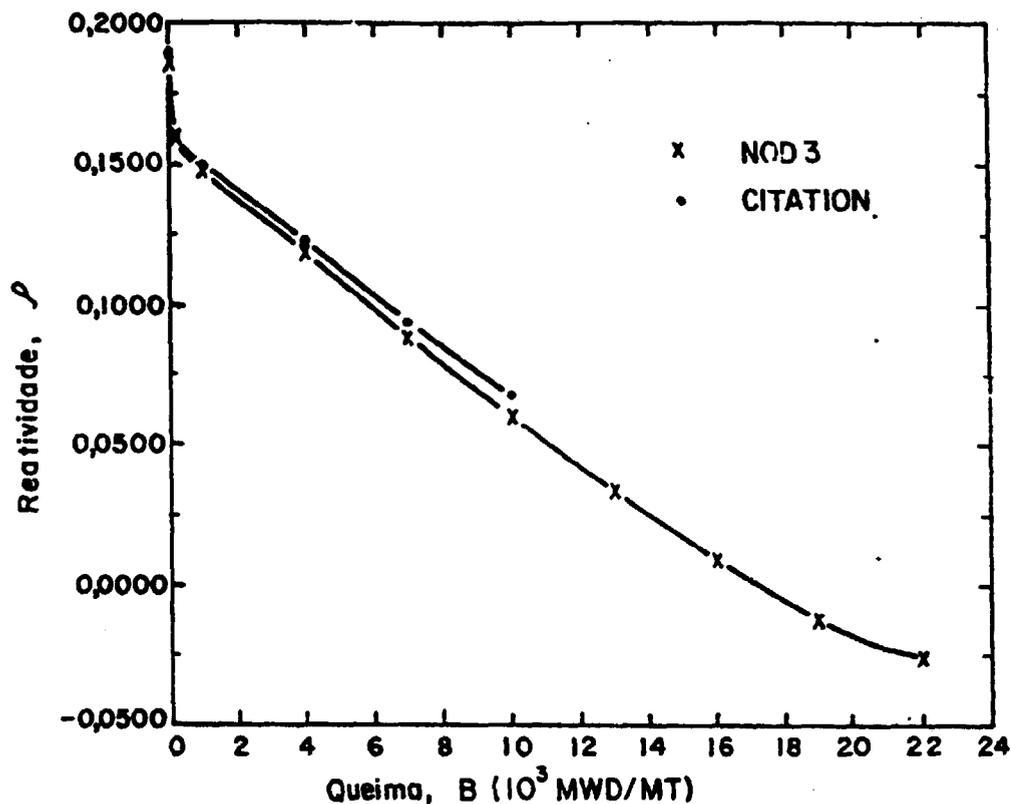


Figura 4.13 - Comparação da reatividade calculada em função da queima, pelos programas CITATION e NOD3 ( $\Delta X=18\text{cm}=2,296\text{L}$ ) para o Problema 2.

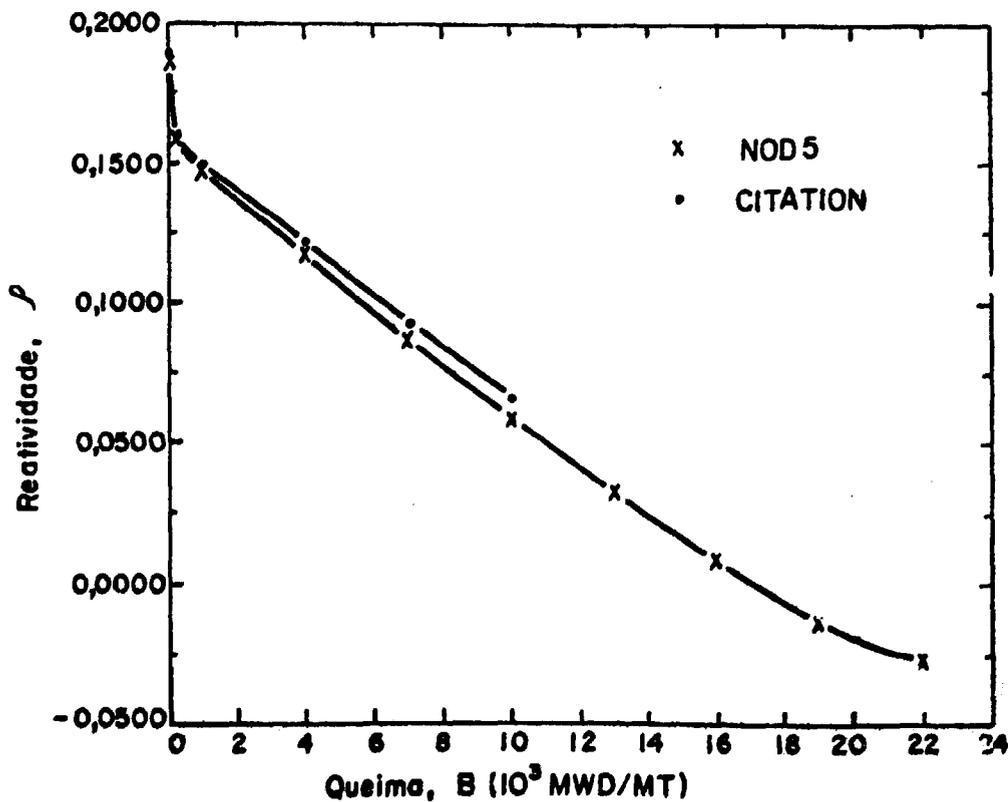


Figura 4.14 - Comparação da reatividade calculada, em função da queima, pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12\text{cm}=1,531\text{L}$ ) para o Problema 2.

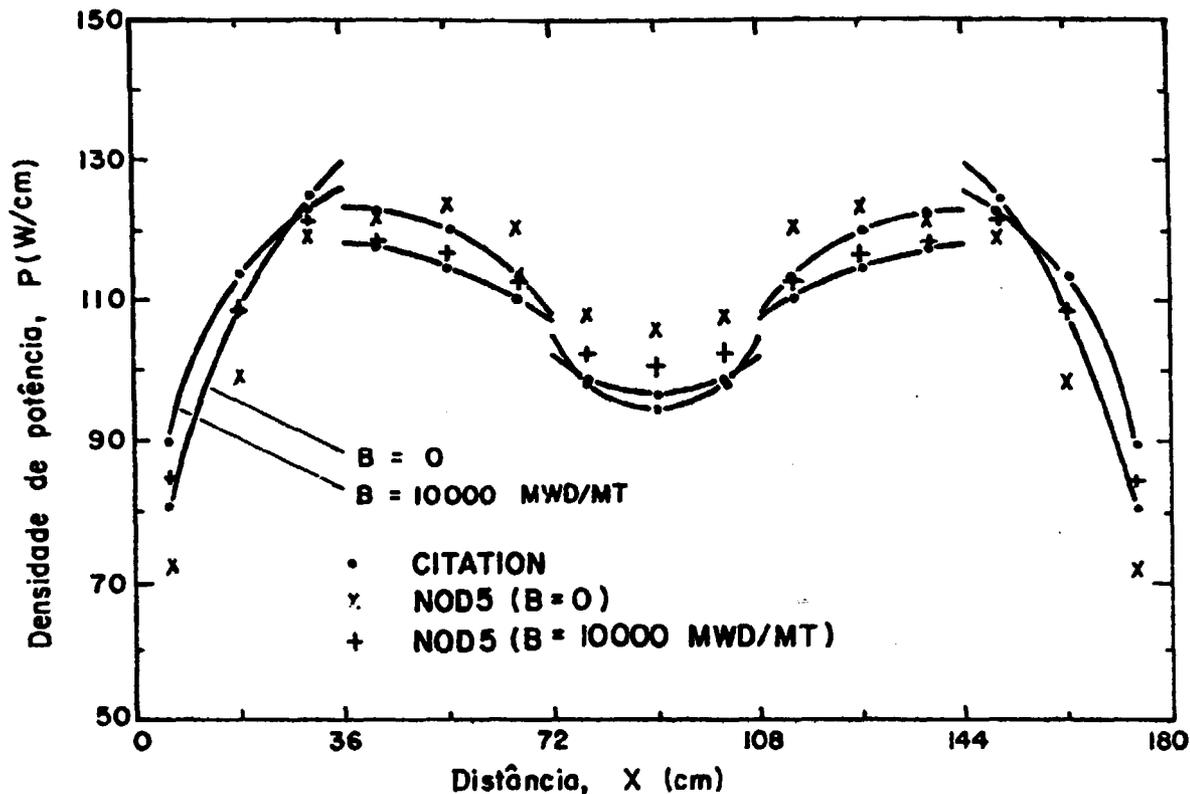


Figura 4.15 - Comparação das distribuições de potência calculadas em função da queima, pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12\text{cm}=1,531\text{L}$ ) para o Problema 2.

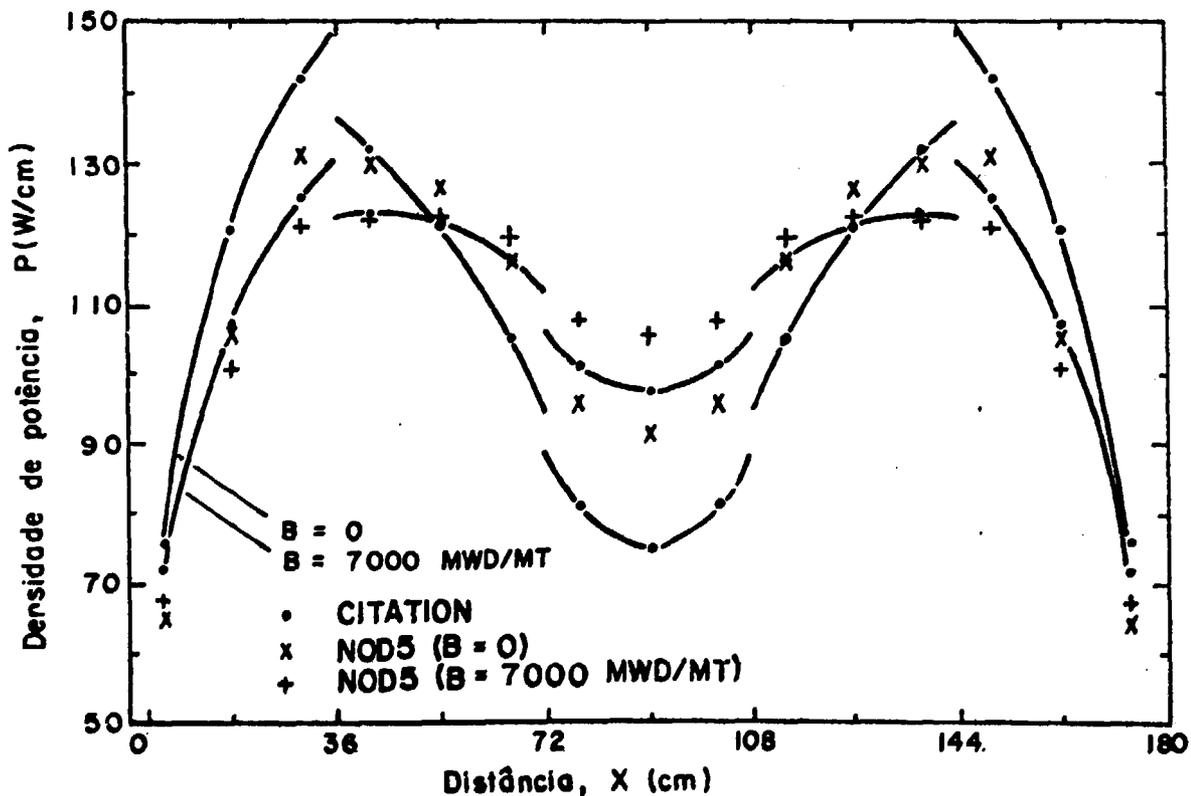


Figura 4.16 - Comparação das distribuições críticas de potência calculadas, em função da queima, pelos programas CITATION e NOD5 ( $\Delta X=12\text{cm}=1,531\text{L}$ ) para o Problema 2.

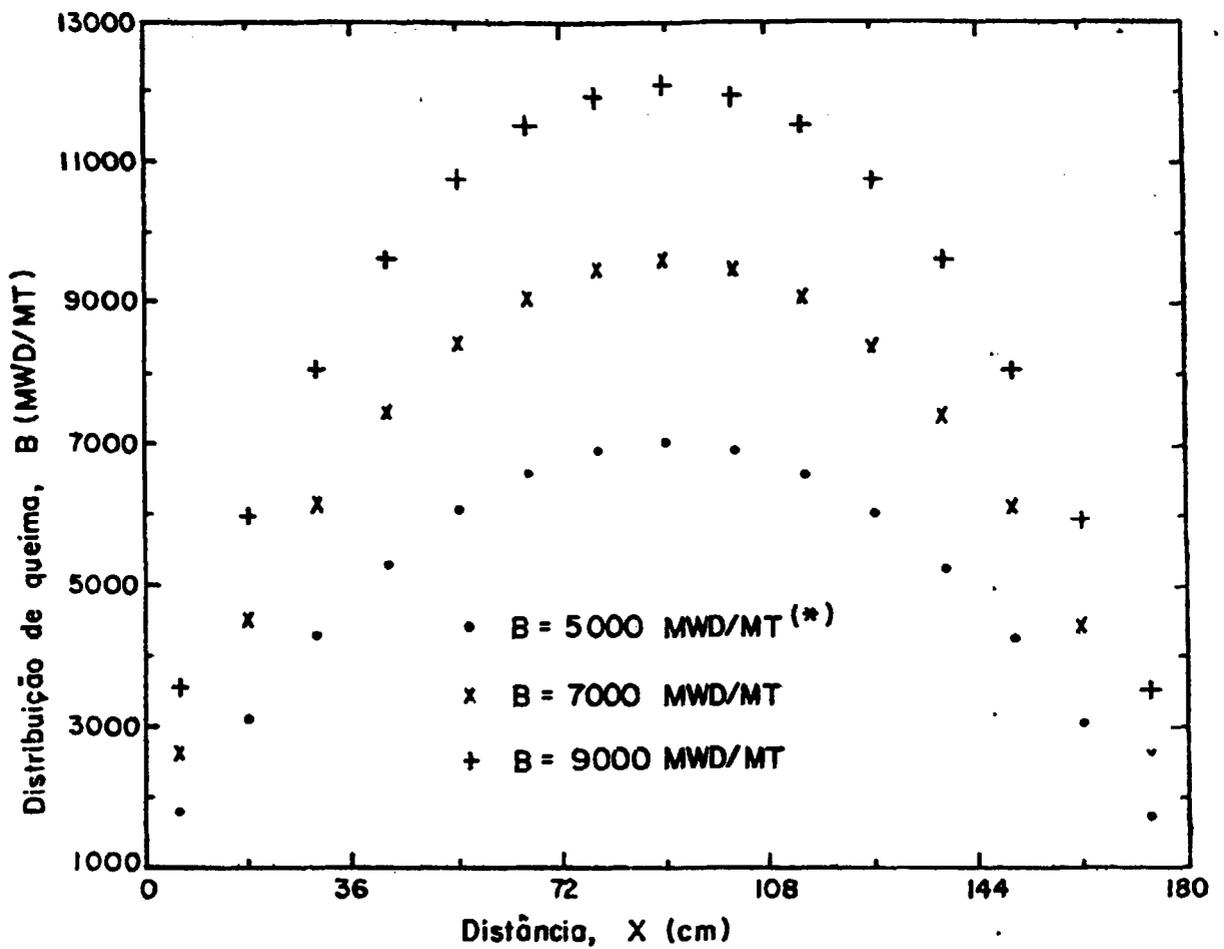


Figura 4.17 - Distribuições de queima calculadas pelo programa NOD5 ( $\Delta X=12\text{cm}=1,531\text{L}$ ) para o Problema 1 (sistema crítico)

\* Queima média acumulada no sistema.

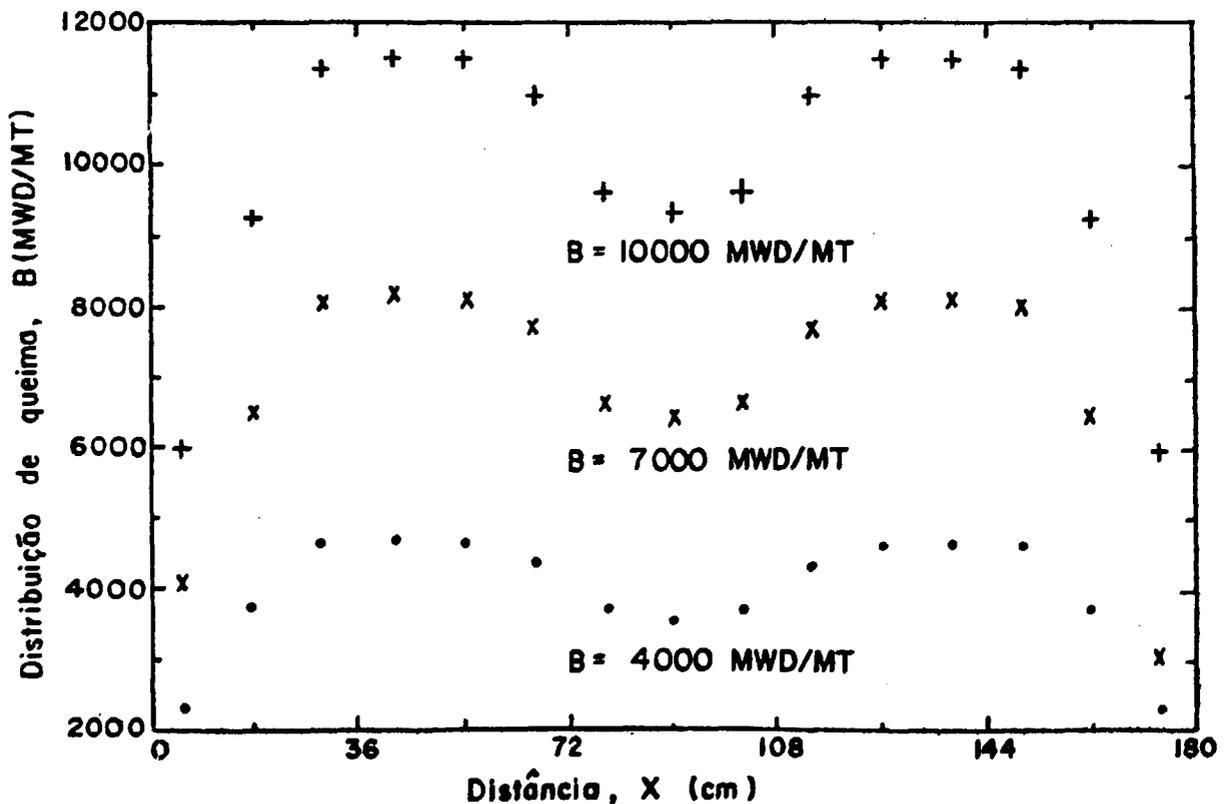


Figura 4.18 - Distribuições de queima calculadas pelo programa NOD5 ( $\Delta X=12\text{cm}=1,531\text{L}$ ) para o Problema 2 (sistema crítico).

Dos desvios máximos relacionados na Tabela 4.1, pode-se observar que as maiores discrepâncias do método nodal em relação ao de diferenças finitas, ocorrem para as distribuições de potência calculadas para a placa com três enriquecimentos (Problema 2.). Da Figura 4.16 temos que o desvio máximo da distribuição de potência crítica, calculada pelo programa NODID em relação a calculada pelo CITATION, é de 22,16%. No caso em evidência, acredita-se que malhas de 1 cm, para os cálculos de diferenças finitas não foram muito adequadas, o que torna esses resultados não muito precisos. Isto quer dizer que, se a largura dessas malhas pudesse ser reduzida (no caso não pode, devido ao número máximo de malhas permitidas no programa CITATION), melhorar-se-ia os resultados de diferenças finitas. Conclui-se então que, parte de cada um desses desvios deve-se realmente, à imprecisão do método de diferenças finitas, sendo que os resultados nodais concordariam em maior grau se comparados com resultados "exatos".

As principais fontes de erros nos cálculos realizados com o programa nodal resumem-se nas seguintes: (a) a aproximação de fonte plana de nêutrons feita na obtenção dos fatores de acoplamento nodais; (b) a limitação prática a poucos nodos considerados no acoplamento; (c) a interpolação linear das constantes nucleares macroscópicas em função da queima do combustível nuclear e/ou da concentração crítica de boro; (e) a distribuição espacial plana das concentrações de equilíbrio dos produtos de fissão (especialmente o Xenônio e o Samário).

Na Tabela 4.1, acentuou-se os piores resultados obtidos com o modelo nodal. Em contraste, deve-se enfatizar que, de maneira geral, os desvios distribuem-se com valores absolutos muito menores que os valores absolutos dos desvios máximos. Esta asserção pode ser constatada diretamente nos gráficos das Figuras 4.1 a 4.16. No entanto, a título de um exemplo mais claro, relacionou-se na Tabela 4.2 os valores numéricos dos desvios relativos das distribuições de potência com a queima representadas nas Figuras 4.7 e 4.15. Isto ilustra melhor a afirmação: os resultados obtidos com o método nodal apresentam boa concordância com os obtidos com o método de diferenças finitas, ou seja, que os resultados nodais são aceitáveis.

A Tabela 4.1 complementa as informações obtidas nos gráficos acima, fornecendo os desvios relativos percentuais máximos, referentes aos resultados comparados nos gráficos e também os tempos gastos de CPU nos programas CITATION e MODID nos cálculos das distribuições de potência apresentadas.

		Desvio (%) Máximo	$t_{CIT}$ (s)	$t_{MOD}$ (s)
$C_B$	Fig. 4.1	- 11,77		
$C_B$	Fig. 4.2	- 12,02		
$K_{ef}$	Fig. 4.3	- 1,04		
$K_{ef}$	Fig. 4.4	- 1,14		
$\rho$	Fig. 4.5	- 24,27		
$\rho$	Fig. 4.6	- 26,56		
P	Fig. 4.7	- 7,31	159,1	15,9
P	Fig. 4.8	+ 4,12	673,8	50,4
$C_B$	Fig. 4.9	- 9,33		
$C_B$	Fig. 4.10	- 9,51		
$K_{ef}$	Fig. 4.11	- 0,80		
$K_{ef}$	Fig. 4.12	- 0,86		
$\rho$	Fig. 4.13	- 11,18		
$\rho$	Fig. 4.14	- 12,09		
P	Fig. 4.15	- 11,30	155,3	15,2
P	Fig. 4.16	+ 22,16	703,5	94,8

Tabela 4.1 - Desvios máximos e tempos gastos de CPU.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.1 a 4.16 e na Tabela 4.1, mostram que o método nodal absorção-produção apresenta boa concordância com o método de diferenças finitas, sendo que, em geral, o desvio máximo na distribuição de potência situa-se abaixo de 10%. Confirmam também, o que já se afirmou na Seção 3.5, que os esquemas nodais com 3 e com 5 nodos acoplados são equivalentes para uma escolha adequada dos tamanhos nodais.

Fig. 4.7 - DESVIOS (%)

Fig.4.15 - DESVIOS (%)

I	P=0	P=5000MWD/MT	P=15000MWD/MT	P=0	P=10000 MWD/MT
1	-5,03	-1,87	-7,31	-11,30	-5,45
2	-2,97	-1,28	-5,57	- 8,95	-4,26
3	-0,31	0,43	-1,75	-4,39	-0,93
4	0,26	0,28	0,23	-0,72	0,91
5	0,74	0,33	2,04	2,63	1,60
6	1,01	0,35	3,33	5,96	2,00
7	1,16	0,36	4,12	9,92	3,72
8	1,20	0,37	4,38	11,72	4,32
9	1,16	0,36	4,12	9,93	3,72
10	1,01	0,35	3,33	5,97	2,00
11	0,74	0,33	2,04	2,63	1,60
12	0,26	0,28	0,23	-0,72	0,91
13	-0,31	0,43	-1,75	-4,39	-0,93
14	-2,97	-1,28	-5,58	-8,95	-4,26
15	-5,03	-1,87	-7,31	-11,30	-5,45

Tabela 4.2 - Desvios relativos das distribuições de potência em função da queima calculadas pelos programas MOD10 e CITATION, representadas nas Figuras 4.7 e 4.15.

Os gráficos das Figuras 4.17 e 4.18 mostram distribuições de queima do combustível nuclear, calculadas pelo programa MOD5, para três valores da queima média acumulada nos sistemas dos Problemas 1 e 2. A coerência dos resultados é concluída examinando-se as distribuições críticas de potência nas Figuras 4.8 e 4.16: é claro que a queima do combustível nuclear é maior nos nodos em que a distribuição de densidade de potência for maior!

As principais vantagens observadas do modelo nodal absorção-produção sobre o método de diferenças finitas são, sem dúvida, a economia obtida no tempo gasto de CPU e a economia de memória de computador. Uma comparação explícita dos tempos gastos de CPU, nos cálculos dinâmicos de distribuições de potência realizados, é dada na Tabela 4.1: a vantagem do programa MOD10 sobre o programa CITATION, neste caso, é óbvia. Quanto à memória de computador utilizada, não foi feita uma comparação dire

ta mas, como já foi dito no final do Capítulo 3, dado que o sistema de equações nodais encerra muito menos equações do que o sistema de equações de diferenças finitas ter-se, em consequência, que o método nodal requer menos memória de computador!

Algumas considerações e conclusões adicionais são dadas no capítulo final, a seguir.

## CAPÍTULO 5

### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

#### 5.1 Observações e Conclusões Finais

Como conclusões finais, à base das comparações realizadas nos Capítulos 3 e 4, nota-se que a precisão do método nodal absorção-produção depende de uma escolha conveniente dos tamanhos nodais. Se as expressões para os coeficientes de acoplamento nodais  $W_{ij}$  fossem exatas poder-se-ia assegurar determinada precisão do modelo nodal em relação ao de diferenças finitas, apenas, tomando-se nodos suficientemente largos. Porém, a suposição de distribuição plana de fontes neutrônicas, na obtenção dos coeficientes de acoplamento nodais  $W_{ij}$ , acarreta em suas expressões um erro intrínseco. Assim, por uma escolha conveniente de tamanhos nodais, deve-se entender uma escolha na qual os erros envolvidos se contrabalanceiem o máximo possível, minimizando o desvio global dos resultados nodais em relação aos resultados correspondentes obtidos pelo método de diferenças finitas, o qual serve de padrão. Felizmente, os erros mencionados parecem atuar em sentidos opostos e aproximadamente na mesma razão.

Nas seções 3.5 e 4.3, acentuou-se as vantagens do método nodal absorção-produção, em relação ao método de diferenças finitas no que diz respeito à utilização de tempo e memória de computador. Cabe observar aqui, que tais vantagens serão de grande importância em cálculos envolvendo duas ou três dimensões espaciais e mais de um grupo de energia (problemas não considerados neste trabalho, mas que, em princípio, podem ser estruturados de forma similar ao caso unidimensional)

Para não exaltar-se só as boas qualidades do método nodal absorção-produção, em relação ao de diferenças finitas, cita-se para finalizar, as suas principais limitações observadas até aqui:

- (a) A Eq. (2.8) de balanço neutrônico é formalmente exata, mas a determinação dos coeficientes  $W_{ij}$  de acoplamento

to nodais é feita de maneira aproximada. Isto significa que, essencialmente, a aplicação do modelo nodal absorção-produção conduz a resultados aproximados e, no fundo, a aferição de seus resultados é feita por comparação ao método de diferenças finitas. Em outras palavras, não há uma argumentação matemática absoluta para discutir-se a precisão do método em si, e avaliar-se os erros cometidos na resolução de determinado problema.

- (b) Como o balanço neutrônico é feito em regiões relativamente grandes (tipicamente de 10 a 20 cm), obtêm-se distribuições de fluxo de nêutrons médias em cada nodo. Isto quer dizer que o método nodal perde em detalhe para o método de diferenças finitas.
- (c) Outra desvantagem observada é que, para assegurar-se uma precisão satisfatória nos resultados, os tamanhos nodais devem ser escolhidos dentro de um pequeno intervalo em torno de um valor estabelecido como ótimo. Entretanto, nem sempre o sistema em estudo pode ser particionado em um número inteiro de nodos com tamanhos convenientes. Conseqüentemente, a aplicação do método nodal absorção-produção é melhor adequada a sistemas que apresentem grandes zonas combustíveis homogêneas (ou homogeneizadas), cujas medidas sejam múltiplos (ou aproximadamente múltiplos) dos tamanhos nodais ótimos.

## 5.2 Algumas Sugestões para Trabalhos Futuros

- (a) Incluir nos cálculos um tratamento mais rigoroso da distribuição espacial das concentrações de equilíbrio dos produtos de fissão (particularmente o Xênonio e o Samário).
- (b) Incluir a opção de simetria já que o tempo de CPU e a memória requerida seriam reduzidos bastante nos cálculos realizados pelo programa NOD1D.
- (c) Otimizar o programa NOD1D definindo melhor as subrotinas e incluindo outros métodos para a resolução do sis

tema de equações lineares para o fluxo de nêutrons e para a interpolação das constantes nucleares.

- (d) Acoplar, diretamente, o programa NOD1D ao programa LEONOD, tal que os dados nucleares gerados pelo programa LEONOD entrem automaticamente no programa NOD1D e, assim, esses programas possam ser executados, em conjunto, de uma vez.
- (e) Estender as análises realizadas neste trabalho a problemas com duas ou três dimensões espaciais.
- (f) Estendê-las, também, a dois ou mais grupos de energia neutrônica (por exemplo, um esquema para dois grupos de energia é examinado na Referência<sup>(11)</sup>; para três ou mais grupos, recomenda-se um estudo inicial quanto à sua viabilidade, pois, as expressões para os coeficientes de acoplamento nodais, tais como foram definidos, podem tornar-se muito extensas e a sua obtenção impraticável).
- (g) Repetir a análise feita neste trabalho e as análises sugeridas nos itens (e) e (f) acima, para coeficientes de acoplamento nodais  $W_{ij}$  obtidos por algum outro processo, independente da teoria de difusão de nêutrons. Por exemplo, utilizando-se alguma outra aproximação, mais rigorosa, da teoria do transporte da radiação.

De uma maneira geral, crê-se que os objetivos propostos no início deste trabalho foram atingidos, não havendo nada mais relevante a acrescentar.

APÊNDICE A

DEDUÇÃO DOS COEFICIENTES  $W_{ij}$  DE ACOPLAMENTO NODAIS

No Capítulo II, mostrou-se a sequência de idéias e as relações mais importantes na obtenção dos coeficientes de acoplamento nodais  $W_{ij}$ , presentes na Equação de balanço neutrônico, Eq. (2.8), para o problema unidimensional, em um grupo de energia. Aqui detalham-se as convenções e passagens algébricas e todas as relações intermediárias, necessárias ao cálculo numérico dos fatores  $W_{ij}$ . A dedução é feita para os dois casos seguintes: primeiro, considerando-se 3 nodos acoplados e, segundo, considerando-se 5 nodos acoplados.

A determinação dos coeficientes de acoplamento nodais, neste caso, é feita utilizando-se a equação de difusão de nêutrons em um grupo de energia e em uma dimensão <sup>(7,14)</sup>. O problema unidimensional consiste de uma placa, infinita nas direções y e z, dividida na direção x em N nodos homogêneos mais refletores de nêutrons, à esquerda e à direita, conforme a figura abaixo. A aproximação feita considera que o i-ésimo nodo apresenta uma distribuição plana de fontes neutrônicas  $S_i$ .

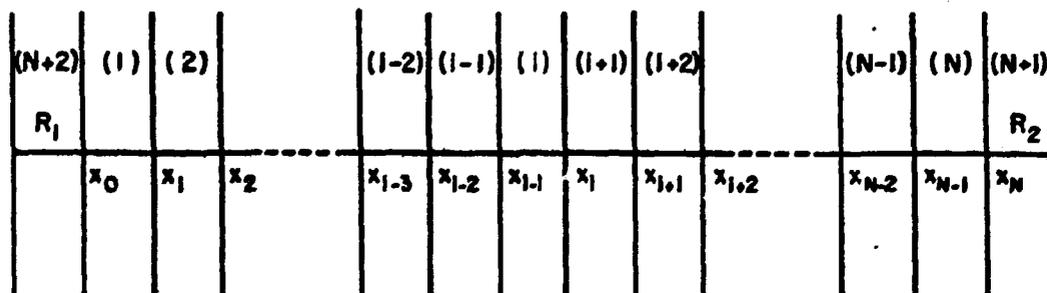


Figura A.1 - Esquema para dedução dos fatores  $W_{ij}$

### A.1 Obtenção dos Coeficientes $V_{ij}$ para 3 nós intera tes

Definimos,

$$V_{i(i-1)} = \left| \frac{J_i X_{(i-1)}}{S_i \Delta X_i} \right|$$

$$V_{ii} = \frac{\sum a_i}{S_i \Delta X_i} \int_{X_{j-1}}^{X_i} \phi_i (X) dX$$

(A.1)

$$V_{i(i+1)} = \left| \frac{J_i (X_i)}{S_i \Delta X_i} \right|$$

Aplicando-se a equação de difusão de nêutrons a região  $i$ , tem-se:

$$\frac{d^2 \phi_i}{dX^2} - \frac{1}{L_i^2} \phi_i (X) = - \frac{S_i}{\rho_j} \quad (A.2)$$

Esta equação está sujeita às seguintes condições de contorno de albedo:

$$\frac{1}{\phi_i} D_i \left. \frac{d\phi_i}{dX} \right|_{X=X_{i-1}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_{i-1}}{1 + a_{i-1}} \right) = r_{i-1}$$

(A.3)

$$\frac{1}{\phi_i} D_i \left. \frac{d\phi_i}{dX} \right|_{X=X_i} = - \frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_{i+1}}{1 + a_{i+1}} \right) = r_{i+1}$$

onde o coeficiente de reflexão de nêutrons (albedo) da  $i$ -ésima região é dado por:

$$a_i = \frac{1 - \frac{2D_i}{L_i} \operatorname{cotgh} \frac{\Delta X_i}{L_i}}{1 + \frac{2D_i}{L_i} \operatorname{cotgh} \frac{\Delta X_i}{L_i}} \quad (\text{A.4})$$

A solução geral da Eq. (A.2) é da forma,

$$\phi_i(x) = A_1 \cosh\left(\frac{x - x_{i-1}}{L_i}\right) + A_2 \sinh\left(\frac{x - x_{i-1}}{L_i}\right) + \frac{S_i}{L_{ai}} \quad (\text{A.5})$$

Substituindo a Eq. (A.5) nas Eqs. (A.1), chega-se às seguintes expressões aproximadas para os coeficientes  $v_{ij}$  de acoplamento nodais:

$$v_{i(i-1)} = \frac{D_i |A_2|}{L_i \Delta X_i}$$

$$v_{ii} = \frac{L_{ai} L_i}{\Delta X_i} \left[ A_1 \sinh \frac{\Delta X_i}{L_i} + A_2 \left( \cosh \frac{\Delta X_i}{L_i} - 1 \right) \right] + 1 \quad (\text{A.6})$$

$$v_{i(i+1)} = \frac{D_i}{L_i \Delta X_i} \left| A_1 \sinh \frac{\Delta X_i}{L_i} + A_2 \cosh \frac{\Delta X_i}{L_i} \right|.$$

Resta, apenas, determinar as constantes  $A_1$  e  $A_2$ , presentes nas Eqs. (A.6). Isto é feito, substituindo-se a Eq. (A.5) nas condições de contorno dadas pelas Eqs. (A.3). Obtém-se, então, o seguinte sistema de equações:

$$A_2 = \alpha_1 A_1 + \alpha_2 \tag{A.7}$$

$$A_2 = \alpha_3 A_1 + \alpha_4$$

no qual, para simplificar a notação, foram feitas as seguintes convenções algébricas:

$$\alpha_1 = \frac{b_{i-1} L_i}{D_i} \qquad \alpha_2 = \frac{b_{i-1} L_i s_i}{D_i \sum_{ai}}$$

$$\alpha_3 = \frac{b_{i+1} \cosh \frac{\Delta X_i}{L_i} - \frac{D_i}{L_i} \sinh \frac{\Delta X_i}{L_i}}{\frac{D_i}{L_i} \cosh \frac{\Delta X_i}{L_i} - b_{i+1} \sinh \frac{\Delta X_i}{L_i}} \tag{A.8}$$

$$\alpha_4 = \frac{b_{i+1} s_i}{\sum_{ai} \left( \frac{D_i}{L_i} \cosh \frac{\Delta X_i}{L_i} - b_{i+1} \sinh \frac{\Delta X_i}{L_i} \right)}$$

Resolvendo o sistema (A.7), obtêm-se, finalmente,

$$A_1 = \frac{\alpha_4 - \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_3} \qquad A_2 = \alpha_1 A_1 + \alpha_2 \tag{A.9}$$

Dessa forma, os coeficientes  $V_{ij}$  de acoplamento no o dais, para 3 nós acoplados, ficam completamente determinados e a equação de balanço netrônico, Eq. (2.8), pode ser aplicada.

## A.2 Obtenção dos Coeficientes $V_{ij}$ para 5 Nós Interagentes

Define-se,

$$w_{ij} = \frac{\int_{x_{j-1}}^{x_j} \sum_{aj} \phi_j(x) dx}{\int_{x_{i-1}}^{x_i} s_i dx} = \frac{\sum_{aj}}{s_i \Delta x_i} \int_{x_{i-1}}^{x_j} \phi_j(x) dx,$$

$$j = i-1, i, i+1$$

$$w_{ij} = \left| \frac{J_{j+1}(x_j)}{s_i \Delta x_i} \right|, \quad j = i - 2$$

(A.10)

$$w_{ij} = \left| \frac{J_{j-1}(x_{j-1})}{s_i \Delta x_i} \right|, \quad j = i + 2$$

Aplica-se, agora, a equação de difusão de nêutrons, em uma velocidade e uma dimensão, para meios homogêneos, às regiões  $i - 1$ ,  $i$  e  $i + 1$ , isto é,

$$\frac{d^2 \phi_{i-1}}{dx^2} - \frac{1}{L_{i-1}^2} \phi_{i-1}(x) = 0$$

$$\frac{d^2 \phi_i}{dx^2} - \frac{1}{L_i^2} \phi_i(x) = -\frac{s_i}{D_i} \quad (\text{A.11})$$

$$\frac{d^2 \phi_{i+1}}{dx^2} - \frac{1}{L_{i+1}^2} \phi_{i+1}(x) = 0$$

Este sistema de equações diferenciais acopladas está sujeito a condições de contorno de albedo em  $x_{i-2}$  e  $x_{i+1}$  e condições de continuidade do fluxo e da corrente de nêutrons em  $x_{i-1}$  e  $x_i$ ; a saber:

$$\frac{1}{\phi_{i-1}} D_{i-1} \left. \frac{d\phi_{i-1}}{dx} \right|_{x=x_{i-2}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_{i-2}}{1 + a_{i-2}} \right) = r_{i-2}$$

$$\phi_{i-1}(x_{i-1}) = \phi_i(x_{i-1}) \quad J_{i-1}(x_{i-1}) = J_i(x_{i-1})$$

(A.12)

$$\phi_i(x_i) = \phi_{i+1}(x_i) \quad J_i(x_i) = J_{i+1}(x_i)$$

$$\frac{1}{\phi_{i+1}} D_{i+1} \left. \frac{d\phi_{i+1}}{dx} \right|_{x=x_{i+1}} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_{i+2}}{1 + a_{i+2}} \right) = r_{i+2}$$

As soluções gerais do sistema (A.11), seguem-se:

$$\phi_{i-1}(x) = A_1 \cosh\left(\frac{x - x_{i-2}}{L_{i-1}}\right) + A_2 \sinh\left(\frac{x - x_{i-2}}{L_{i-1}}\right)$$

$$\phi_i(x) = A_3 \cosh\left(\frac{x - x_{i-1}}{L_i}\right) + A_4 \sinh\left(\frac{x - x_{i-1}}{L_i}\right) + \frac{F_i}{\sum a_i}$$

(A.13)

$$\phi_{i+1}(x) = A_5 \cosh\left(\frac{x - x_i}{L_{i+1}}\right) + A_6 \sinh\left(\frac{x - x_i}{L_{i+1}}\right)$$

Inserindo as Fcs. (A.13) nas Fcs. (A.10) e utilizando a lei de Fick, Eq. (2.14), chega-se às seguintes expressões analíticas, aproximadas, para os coeficientes  $v_{ij}$  de acoplamento no dais, no caso de 5 nodos interagentes:

$$v_{i(i-2)} = \frac{D_{i-1} |A_2|}{L_{i-1} \Delta X_i}$$

$$v_{i(i-1)} = \frac{\sum_{ai-1} L_{i-1}}{\Delta X_i} \left[ A_1 \sinh \frac{\Delta X_{i-1}}{L_{i-1}} + A_2 \left( \cosh \frac{\Delta X_{i-1}}{L_{i-1}} - 1 \right) \right]$$

$$v_{ii} = \frac{\sum_{ai} L_i}{\Delta X_i} \left[ A_3 \sinh \frac{\Delta X_i}{L_i} + A_4 \left( \cosh \frac{\Delta X_i}{L_i} - 1 \right) \right] + 1$$

(A.14)

$$v_{i(i+1)} = \frac{\sum_{ai+1} L_{i+1}}{\Delta X_i} \left[ A_5 \sinh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}} + A_6 \left( \cosh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}} - 1 \right) \right]$$

$$v_{i(i+2)} = \frac{D_{i+1}}{L_{i+1} \Delta X_i} \left| A_5 \sinh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}} + A_6 \cosh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}} \right|$$

Para completar, obtêm-se as constantes  $A_i$ , de acordo com o contorno das equações diferenciais, pela aplicação das condições de contorno. Assim, substituindo as Fcs. (A.13) nas Fcs. (A.12) e usando a Eq. (2.14), vem,

$$\begin{aligned} \alpha_1 A_1 - A_3 &= \alpha_2 \\ \alpha_3 A_1 + \alpha_4 A_4 &= 0 \\ \alpha_5 A_3 + \alpha_6 A_4 - A_5 &= \alpha_7 \\ \alpha_8 A_3 + \alpha_9 A_4 + \alpha_{10} A_5 &= 0 \\ A_2 &= \alpha_{11} A_1 \\ A_6 &= \alpha_{12} A_5 \end{aligned}$$

(A.15)

No sistema (A.15), fizeram-se as seguintes substituições, por simplicidade algébrica:

$$\alpha_1 = \cosh \frac{\Delta X_{i-1}}{L_{i-1}} + \frac{r_{i-2} L_{i-1}}{D_{i-1}} \sinh \frac{\Delta X_{i-1}}{L_{i-1}} ; \quad \alpha_2 = \frac{S_i}{\sum_{ai}}$$

$$\alpha_3 = \frac{D_{i-1}}{L_{i-1}} \sinh \frac{\Delta X_{i-1}}{L_{i-1}} + r_{i-2} \cosh \frac{\Delta X_{i-1}}{L_{i-1}} ; \quad \alpha_4 = -\frac{D_i}{L_i}$$

$$\alpha_5 = \cosh \frac{\Delta X_i}{L_i} ; \quad \alpha_6 = \sinh \frac{\Delta X_i}{L_i} ; \quad \alpha_7 = -\frac{S_i}{\sum_{ai}} = -\alpha_2$$

(A.16)

$$\alpha_8 = \frac{D_i}{L_i} \sinh \frac{\Delta X_i}{L_i} ; \quad \alpha_9 = \frac{D_i}{L_i} \cosh \frac{\Delta X_i}{L_i}$$

$$\alpha_{10} = -\frac{D_{i+1}}{L_{i+1}} \left( \frac{b_{i+2} \cosh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}} - \frac{D_{i+1}}{L_{i+1}} \sinh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}}}{\frac{D_{i+1}}{L_{i+1}} \cosh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}} - b_{i+2} \sinh \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}}} \right)$$

$$\alpha_{11} = \frac{b_{i-2} L_{i-1}}{D_{i-1}} ; \quad \alpha_{12} = -\frac{L_{i+1}}{D_{i+1}} \alpha_{10}$$

Resolvendo o sistema (A.15), obtem-se finalmente,

$$A_3 = \frac{\alpha_2 \alpha_3 (\alpha_6 \alpha_{10} + \alpha_9) + \alpha_1 \alpha_4 \alpha_7 \alpha_{10}}{\alpha_1 \alpha_4 (\alpha_5 \alpha_{10} + \alpha_8) - \alpha_3 (\alpha_6 \alpha_{10} + \alpha_9)}$$

$$A_1 = \frac{1}{\alpha_1} A_3 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$$

$$A_2 = a_{11} A_1$$

$$A_4 = - \frac{a_3}{a_4} A_1$$

$$A_5 = a_5 A_3 + a_6 A_4 - a_7$$

$$A_6 = a_{12} A_5$$

(A.17)

Com isso, os fatores  $W_{ij}$  de acoplamento nodais, para os nodos de números  $i=2$  até  $i=N-1$ , no caso de 5 nodos acoplados, ficam determinados.

Necessita-se, agora, para completar, os coeficientes  $W_{ij}$  para as regiões  $i=1$  e  $i=N$ . A obtenção dos  $W_{ij}$ , neste caso, é feita de modo particular, sendo, porém, semelhante em princípio ao caso acima. Relaciona-se a seguir, na Seção A.3, os passos e relações principais da dedução.

### A.3 Obtenção dos fatores $W_{ij}$ para $i=1$ e $i=N$

As definições estabelecidas nas Figs. (A.10) são mantidas, mas restritas aos casos  $W_{11}$ ,  $W_{12}$ ,  $W_{13}$  e  $W_{N(N-2)}$ ,  $W_{N(N-1)}$  e  $W_{NN}$ . A equação de difusão de nêutrons é escrita, agora, para  $i=1$  e  $i=2$ ,  $i=N-1$  e  $i=N$ , isto é,

$$\frac{d^2 \phi_1}{dx^2} - \frac{1}{L_1^2} \phi_1 (x) = - \frac{S_1}{D_1}$$

(A.18)

$$\frac{d^2 \phi_2}{dx^2} - \frac{1}{L_2^2} \phi_2 (x) = 0$$

$$\frac{d^2 \phi_{N-1}}{dX^2} - \frac{1}{L_{N-1}^2} \phi_{N-1}(X) = 0$$

(A.19)

$$\frac{d^2 \phi_N}{dX^2} - \frac{1}{L_N^2} \phi_N(X) = -\frac{\epsilon_N}{D_N}$$

As Eqs. (A.18) e (A.19) estão sujeitas, respectivamente, às condições de contorno e interface, seguintes:

$$\frac{1}{\phi_1} D_1 \left. \frac{d\phi_1}{dX} \right|_{X=0} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_{N+2}}{1 + a_{N+2}} \right) = b_{N+2}$$

(A.20)

$$\phi_1(X_1) = \phi_2(X_1) \quad J_1(X_1) = J_2(X_1)$$

$$\frac{1}{\phi_2} D_2 \left. \frac{d\phi_2}{dX} \right|_{X=X_2} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_3}{1 + a_3} \right) = b_3$$

$$\frac{1}{\phi_{N-1}} D_{N-1} \left. \frac{d\phi_{N-1}}{dX} \right|_{X=X_{N-2}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_{N-2}}{1 + a_{N-2}} \right) = b_{N-2}$$

$$\phi_{N-1}(X_{N-1}) = \phi_N(X_{N-1}) \quad J_{N-1}(X_{N-1}) = J_N(X_{N-1})$$

(A.21)

$$\frac{1}{\phi_N} D_N \left. \frac{d\phi_N}{dX} \right|_{X=X_N} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - a_{N+1}}{1 + a_{N+1}} \right) = b_{N+1}$$

onde os índices N+1 e N+2 foram atribuídos, sucessivamente, aos refletores à direita e à esquerda.

Finalmente, procedendo de maneira análoga ao que foi feito no Item A.2, obtém-se os coeficientes  $V_{ij}$  para os nós

$i=1$  e  $i=N$ , a saber:

$$w_{11} = \frac{\sum a_1 L_1}{\Delta X_1} \left[ A_1 \operatorname{senh} \frac{\Delta X_1}{L_1} + A_2 \left( \cosh \frac{\Delta X_1}{L_1} - 1 \right) \right] + 1$$

$$w_{12} = \frac{\sum a_2 L_2}{\Delta X_1} \left[ A_3 \operatorname{senh} \frac{\Delta X_2}{L_2} + A_4 \left( \cosh \frac{\Delta X_2}{L_2} - 1 \right) \right] \quad (\text{A.22})$$

$$w_{13} = \frac{D_2}{L_2 \Delta X_1} \left[ A_3 \operatorname{senh} \frac{\Delta X_2}{L_2} + A_4 \cosh \frac{\Delta X_2}{L_2} \right]$$

$$w_{N(N-2)} = \frac{D_{N-1} |A_2|}{L_{N-1} \Delta X_N}$$

$$w_{N(N-1)} = \frac{\sum a_{N-1} L_{N-1}}{\Delta X_N} \left[ A_1 \operatorname{senh} \frac{\Delta X_{N-1}}{L_{N-1}} + A_2 \left( \cosh \frac{\Delta X_{N-1}}{L_{N-1}} - 1 \right) \right] \quad (\text{A.23})$$

$$w_{NN} = \frac{\sum a_N L_N}{\Delta X_N} \left[ A_3 \operatorname{senh} \frac{\Delta X_N}{L_N} + A_4 \left( \cosh \frac{\Delta X_N}{L_N} - 1 \right) \right] + 1$$

Nas Eqs. (A.22), por um procedimento similar ao do Item A.2, obtêm-se:

$$A_1 = \frac{\alpha_2 \alpha_4 + \alpha_5}{\alpha_1 \alpha_4 + \alpha_3} \quad ; \quad A_2 = \alpha_6 A_1 + \alpha_7 \quad (\text{A.24})$$

$$A_3 = \alpha_1 A_1 - \alpha_2 \quad ; \quad A_4 = \alpha_8 A_3$$

com,

$$\alpha_1 = \cosh \frac{\Delta X_1}{L_1} + \frac{h_{N+2} L_1}{D_1} \sinh \frac{\Delta X_1}{L_1} ;$$

$$\alpha_2 = - \frac{S_1}{\sum_{a1}} \left( \frac{b_{N+2} L_1}{D_1} \sinh \frac{\Delta X_1}{L_1} + 1 \right)$$

$$\alpha_3 = \frac{D_1}{L_1} \sinh \frac{\Delta X_1}{L_1} + h_{N+2} \cosh \frac{\Delta X_1}{L_1} ;$$

$$\alpha_4 = - \frac{D_2}{L_2} \left( \frac{b_3 \cosh \frac{\Delta X_2}{L_2} - \frac{D_2}{L_2} \sinh \frac{\Delta X_2}{L_2}}{\frac{D_2}{L_2} \cosh \frac{\Delta X_2}{L_2} - b_3 \sinh \frac{\Delta X_2}{L_2}} \right)$$

(A.25)

$$\alpha_5 = - \frac{S_1}{\sum_{a1}} h_{N+2} \cosh \frac{\Delta X_1}{L_1} ; \quad \alpha_6 = \frac{h_{N+2} L_1}{D_1} ;$$

$$\alpha_7 = \frac{h_{N+2} L_1 S_1}{D_1 \sum_{a1}}$$

$$\alpha_8 = \frac{b_3 \cosh \frac{\Delta X_2}{L_2} - \frac{D_2}{L_2} \sinh \frac{\Delta X_2}{L_2}}{\frac{D_2}{L_2} \cosh \frac{\Delta X_2}{L_2} - b_3 \sinh \frac{\Delta X_2}{L_2}}$$

Da mesma forma, para as Eqs. (A.23), obter-se:

$$A_1 = \frac{a_2 a_4 + a_5}{a_1 a_4 + a_3} ; \quad A_2 = a_6 A_1 \quad (\text{A.26})$$

$$A_3 = a_1 A_1 - a_2 ; \quad A_4 = a_7 A_3 + a_8$$

onde,

$$a_1 = \cosh \frac{\Delta X_{N-1}}{L_{N-1}} + \frac{b_{N-2} L_{N-1}}{D_{N-1}} \sinh \frac{\Delta X_{N-1}}{L_{N-1}} ; \quad a_2 = \frac{S_N}{\sum a_N}$$

$$a_3 = \frac{D_{N-1}}{L_{N-1}} \sinh \frac{\Delta X_{N-1}}{L_{N-1}} + b_{N-2} \cosh \frac{\Delta X_{N-1}}{L_{N-1}} ; \quad (\text{A.27})$$

$$a_4 = - \frac{D_N}{L_N} \left( \frac{b_{N+1} \cosh \frac{\Delta X_N}{L_N} - \frac{D_N}{L_N} \sinh \frac{\Delta X_N}{L_N}}{\frac{D_N}{L_N} \cosh \frac{\Delta X_N}{L_N} - b_{N+1} \sinh \frac{\Delta X_N}{L_N}} \right)$$

$$a_5 = b_{N+1} L_N S_N \left/ \left( \frac{D_N}{L_N} \cosh \frac{\Delta X_N}{L_N} - b_{N+1} \sinh \frac{\Delta X_N}{L_N} \right) \right. ;$$

$$a_6 = \frac{b_{N-2} L_{N-1}}{D_{N-1}}$$

$$a_7 = \frac{h_{N+1} \cosh \frac{\Delta X_N}{L_N} - \frac{D_N}{L_N} \sinh \frac{\Delta X_N}{L_N}}{\frac{D_N}{L_N} \cosh \frac{\Delta X_N}{L_N} - h_{N+1} \sinh \frac{\Delta X_N}{L_N}} = - \frac{L_N}{D_N} a_4$$

$$a_8 = \frac{h_{N+1} S_N}{\sum_{aN}} \left/ \left( \frac{D_N}{L_N} \cosh \frac{\Delta X_N}{L_N} - h_{N+1} \sinh \frac{\Delta X_N}{L_N} \right) \right.$$

Com isso, completou-se a determinação dos coeficientes  $V_{ij}$  de acoplamento nodais para o caso de 5 rodos acoplados. Logo a equação nodal de balanço neutrônico, Eq. (2.8), pode ser aplicada.

## APÊNDICE P

### INTERPOLAÇÃO DAS CONSTANTES NUCLEARES

O programa LEOMOD (Seção C.1-2) gera constantes celulares para diversos valores de queima e para várias concentrações de  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ . Entretanto, como a distribuição do fluxo de nêutrons na placa é variável, a queima acumulada em cada nódo também o é, sendo dada por:

$$P_{i,s} = P_{i,s-1} + \frac{P_i}{P} \cdot \frac{M}{M_i} \Delta P_s \quad (\text{B.1})$$

onde,  $P_{i,s}$  = queima acumulada no nódo  $i$  até o intervalo de queima  $s$ ;

$P_{i,s-1}$  = queima acumulada no nódo  $i$  até o intervalo de queima  $s-1$ ;

$P_i$  = potência gerada no nódo  $i$ ;

$P$  = potência total do sistema;

$M_i$  = massa inicial de urânio ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) no nódo  $i$ ;

$M$  = massa inicial total de urânio no sistema;

$\Delta P_s$  = intervalo de queima  $s$ .

Uma vez calculada a queima acumulada no nódo  $i$ , selecionam-se os intervalos de queima dentre os quais ela se insere e realizam-se as interpolações lineares das constantes nucleares, especificadas em função da queima, como segue:

$$\{ (P_{i,s}) = \left( \frac{B_{i,s} - P_{K-1}}{P_K - P_{K-1}} \right) \left[ \{ (P_K) - \{ (P_{K-1}) \right] + \{ (P_{K-1}) \} \quad (\text{P.2})$$

Nesta expressão,  $\{$  está representando genericamente uma das seguintes constantes nucleares especificada em função da queima, para a região  $i$ :  $D$ ,  $\Sigma_f$ ,  $\nu \Sigma_f$ ,  $\Sigma_a$  e  $\epsilon_f$ ; os  $P_K$  são os valores

de queima escolhidos, para os quais foram calculadas as constantes nucleares.

Para efetuar as interpolações lineares das constantes nucleares em relação a concentração crítica de boro, procede-se da seguinte forma: primeiro é feita uma interpolação linear para acharmos a concentração crítica de boro, usando-se a expressão seguinte:

$$C_3 = \left( \frac{\lambda_{CR} - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) (C_2 - C_1) + C_1 \quad ; \quad \lambda_{CR} = 1,0 \quad (P.3)$$

Segundo, interpola-se as constantes nucleares pela expressão:

$$\Sigma(C_3) = \left( \frac{C_3 - C_1}{C_2 - C_1} \right) \left[ \Sigma(C_2) - \Sigma(C_1) \right] + \Sigma(C_1) \quad (P.4)$$

Nas expressões acima os  $C_1$  representam concentrações de boro,  $\lambda_{CR} = 1,0$  é o fator crítico de multiplicação de nêutrons,  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os maiores auto-valores ( $K$ -efetivos) dos sistemas de equações nodais para a distribuição do fluxo de nêutrons, onde as constantes celulares foram geradas, inicialmente, para as concentrações de boro  $C_1$  e  $C_2$ . As constantes nucleares  $\Sigma$ , especificadas para cada concentração de boro, tem o mesmo significado que na Eq. (B.2).

As Fns. (B.1) a (B.4) foram incluídas no programa MODD (Seção C.3), em conexão com as subrotinas MOD3 e MOD5. As Fns. (P.3) e (P.4) são calculadas várias vezes em cada intervalo de queima, num processo iterativo, até que a concentração de boro tenha convergido para o valor crítico e, conseqüentemente, tenha-se obtido as distribuições críticas de fluxo de nêutrons e potência em cada passo de queima.

APÊNDICE CPROGRAMAS UTILIZADOS NOS CÁLCULOS

Descreve-se neste Apêndice algumas características qualitativas gerais dos programas utilizados nos cálculos cujos resultados foram discutidos nos Capítulos 3 e 4. Esta descrição é bastante resumida e objetiva, a não ser para o programa NOD1D o qual foi desenvolvido como parte integrante deste trabalho e, por isso, dá-se-lhe uma descrição completa, juntamente com um problema exemplo.

### C.1 Programa LEOPARD

O programa LEOPARD<sup>(3)</sup> destina-se a cálculos celulares para reatores moderados a água, fornecendo fatores de multiplicação de nêutrons e seções de choque em 2 e 4 grupos de energia, considerando ou não a queima do combustível nuclear. Este programa baseia-se em modificações dos modelos de cálculos neutrônicos utilizados nos programas MUFT-IV e SOFOCATE<sup>(4)</sup>, para levar em conta células heterogêneas, e requer como entrada somente dados básicos de geometria, temperatura e composição.

O programa SOFOCATE determina as constantes térmicas utilizando o modelo de gás de prótons de Wigner-Wilkins enquanto que o MUFT-IV calcula as constantes rápidas utilizando os seguintes modelos<sup>(7)</sup>: aproximação  $B_1$  da equação de transporte, modelo de moderação contínua de Greuling-Goertzel para tratar o espalhamento elástico, sendo que o espalhamento inelástico é considerado por meio de uma matriz de transferência de multigrupo. Os cálculos térmicos são feitos em 172 grupos de energia e os rápidos em 54; as seções de choque são colapsadas em seguida para 1 grupo térmico e 1 ou 3 grupos rápidos, respectivamente, para entrada em códigos de difusão. A estrutura dos grupos condensados é a seguinte; térmico: 0 a 0,625eV; rápidos: 0,625eV a 5530eV; 5,53KeV a 821KeV e 0,821MeV a 10MeV ou 0,625eV a 10MeV.

Estritamente falando, os cálculos das constantes nucleares utilizadas como entrada nos programas NOD1D (Seção C.3) e CITATION (Seção C.2) foram geradas pelos programas LEONOR e

LEOCIT, respectivamente. Estes programas, descritos abaixo, são versões do programa LEOPARD onde foram inseridas modificações na subrotina de saída de resultados.

#### C.1.1 Programa LEOCIT

O programa LEOCIT<sup>(4)</sup> é uma versão modificada do programa LEOPARD, onde foram inseridas subrotinas que preparam h bibliotecas de seções de choque em 1, 2 e 4 grupos de energia, ar vando-as em disco ou fita, em formato próprio para serem uti lizadas diretamente pelo programa CITATION.

Aqui não são dados detalhes quanto a essas modi ficações uma vez que o leitor interessado as encontrará desenvol vidas por completo na Referência (4).

#### C.1.2 Programa LEONOD

O programa LEONOD é uma outra versão modificada do program LEOPARD, na qual as constantes nucleares macroscôni cas são colapsadas para um grupo de energia para serem utiliza das diretamente como entrada no programa nodal MOD1D. Neste ca so, porém, a modificação no programa LEOPARD é bastante pequena consistindo da subrotina INPNOD, cuja listagem encontra-se a se guir.

A única mudança nos dados de entrada, do progra ma LEONOD em relação ao LEOPARD, consiste em inserir o número de intervalos de queima na coluna 69, para a célula de água.

```

SUBROUTINE INPNOC                                0000010
C                                                    0000020
C A SUBROTINA INPNOC COLAPSA DE DOIS GRUPOS PARA UM GRUPO DE  0000030
C ENERGIA AS SECCES DE CHOQUE MACROSCOPICAS GERADAS PELU PRU  0000040
C GRAMA LEOPARD, GRAVANDU-AS EM ARQUIVU EM DISCO NO FORMATO  0000050
C DE ENTRADA PARA O PROGRAMA NOUO  0000060
C                                                    0000070
COMMON INDEX(35),FACTOR(5,7),WDRD(35,2),CTE(4,3,6),YIELDU(27,27),  0000080
1 TFOUE(4,2),SSMOD(25),SSCAPA(25),CORREL(25),SPVOLM(25)  0000090
COMMON ONEVRY,TAUVRY,SSAMND(25),SFMND(25),SSGMND(25),  0000100
1 SAMND,SFMND,SGMND,BIGA(4),FSTFLX,FLSA,FLSU,FIFX,F1GX,FLSR,TAU(4),  0000110
2 ONEFST(25,5),FLUX(2),XST(5,6),XSA(5,7),XSRM(5,4),BALNCE(30,5),  0000120
3 PNL,CFISN(6),CELHTX,CURHTX,CURERA,LDREB,CUREC,CURERU,CMEGAN,  0000130
4 STOM,CAYINF,SPBRX,PDX,VIE,ENEOS(27),TEMX(4),RADX(4),FLUXED(2)  0000140
COMMON /INDATA/ ICON(24),MACRO,MACX(35),GENMAC(35,4),MILRO,  0000150
1 MILX(35),DENMIC(35),TEFC,TEM(3),REFBUC,GBUCKL,B SQUARE,MEDUE,  0000160
2 RAD(5),PITCH,SHARE,RHOH2C,KMCO2C,RHOOU2,RHUP02,RHOTC2,PRESSH,  0000170
3 PRESSD,CUTOFF,PUTINL,VOLUME,PDNSTY,LCADNO,FMSCAL,STEPS(4),  0000180
4 POISGN(40),PUREN(35,4),VFAST(27),MXIS,FRACVL(3)  0000190
COMMON /TRSLT/ SDMND,SSTMND(25),SUCCN,SSTCCN(25),SSACGN(25),  0000200
1 SSFCUN(25),SSGCON(25),RELPHI(3),DL25NT,UL26NT,PHI,vPI(27),SACGN,  0000210
2 SFCCN,SGCCN  0000220
COMMON /HEAD/ TITLE(18),NDSTEP,TIMBOS,BUBOS,TIMEDS,BUEOS,NSTEPS  0000230
REAL*8 WDRD,CTE,DMOD,SAMOD,SFMOD,SGMOD,ERMOD,FLMOD,XM  0000240
XNA = C.6022045  0000250
XM = (VFAST(10)*235.04 + VFAST(12)*236.05)/XNA  0000260
FLMOD = FSTFLX + PHI  0000270
DMOD = (FLSU*FSTFLX + SDCUN*PHI)/FLMOD  0000280
SAMOD = (FLSA*FSTFLX + SACUN*PHI)/FLMOD  0000290
SFMOD = (FIFX*FSTFLX + SFCUN*PHI)/FLMOD  0000300
SGMOD = (F1GX*FSTFLX + SGCUN*PHI)/FLMOD  0000310
IF(ICON(23).GE.1) GO TO 10  0000320
ERMOD = 1.0000263E-24*PDNSTY/(FIFX*FLUX(1) + SFCCN*FLUX(2))  0000330
10 IF(ICON(14).EQ.0) WRITE(2) XM  0000340
IF(ICON(14).GE.1.AND.NSTEP.EQ.1) WRITE(2) XM  0000350
IF(ICON(14).EQ.0.AND.ICON(23).GE.1) GO TO 20  0000360
WRITE(2) DMOD,SAMOD,SFMOD,SGMOD,ERMOD  0000370
GO TO 40  0000380
20 ERMOD = 0.0  0000390
NITER = ICON(23)  0000400
GO TO ITER=1,NITER  0000410
WRITE(2) DMOD,SAMOD,SFMOD,SGMOD,ERMOD  0000420
30 CONTINUE  0000430
40 WRITE(6,50) DMOD,SAMOD,SFMOD,SGMOD,ERMOD,FLMOD,XM  0000440
50 FORMAT(1H ,///7(5X,E12.6))  0000450
IF(ICON(14).EQ.0.AND.ICON(24).EQ.1) END FILE 2  0000460
IF(ICON(14).EQ.1.AND.ICON(24).EQ.1.AND.NSTEP.EQ.NSTEPS)  0000470
1 END FILE 2  0000480
RETURN  0000490
END  0000500

```

## C.2 Programa CITATION

O programa CITATION<sup>(9)</sup> foi elaborado para solucionar a equação de difusão de nêutrons expressa em multigrupo de energia, pelo método de diferenças finitas. Este programa é bastante geral e inclui problemas de depleção do combustível nuclear, permitindo a análise de ciclos combustíveis. Problemas uni, bi e tridimensionais são tratados e várias geometrias são permitidas: x-y-z,  $\theta$ -R-Z, Hexagonal-Z e triangular-7. Cálculos estáticos e dinâmicos podem ser elaborados, sendo que alguns dos resultados fornecidos são os seguintes: fator de multiplicação efetivo, distribuições de fluxo de nêutrons e potência (críticas ou não), taxas de reações, concentrações de núclídeos, concentrações críticas de boro, dimensões críticas etc.

O programa CITATION é utilizado neste trabalho em cálculos de distribuições de fluxo de nêutrons e potência em uma dimensão e um grupo de energia. Os resultados obtidos com o CITATION servem de base de comparação para os resultados correspondentes obtidos com o programa nodal NOD1D.

## C.3 Programa NOD1D

O programa NOD1D (programa nodal para cálculos de distribuições de fluxo de nêutrons e potência em uma dimensão e um grupo de energia), escrito em linguagem FORTRAN-IV, foi elaborado como parte integrante deste trabalho, incluindo as relações do método nodal absorção-produção obtidas no Apêndice A e as relações de interpolações lineares das constantes nucleares com a geometria do combustível e com a concentração crítica de boro obtidas no Apêndice B.

Este programa inclui como subrotinas os programas NOD3 e NOD5, construídas com as relações do Apêndice A, para os esquemas nodais com 3 e 5 nodos acoplados, respectivamente, (Secção 3.1). Como já foi dito anteriormente, tais programas calcular os coeficientes de acoplamento nodais  $W_{ij}$  e  $C_{ij}$  que aparecer na equação nodal de balanço neutrônico (Eq. 2.8) e a seguir resolver o sistema de equações lineares para o fluxo de nêutrons originado por esta equação, pelo método iterativo de Gauss-Seidel,

fornecendo como resultados o fator de multiplicação efetivo de nêutrons e distribuições de fluxo de nêutrons e potência para o problema estático .

O programa NOD1D realiza, em conexão com as subrotinas NOD3 e NOD5, as interpolações das constantes nucleares com a queima do combustível e/ou com a concentração de boro que torna o sistema crítico ( $K_{ef} = 1$ ). Obtêm-se dessa forma, além dos cálculos estáticos referidos acima, os seguintes resultados dinâmicos: fatores de multiplicação efetivos de nêutrons, distribuições de fluxo de nêutrons, potência e queima do combustível nuclear e concentrações críticas de boro; tudo isso, para cada intervalo de queima especificado.

Um diagrama geral dos principais blocos do programa NOD1D é dado no esquema abaixo, sendo que mais detalhes acerca deste programa seguem-se nas próximas seções:

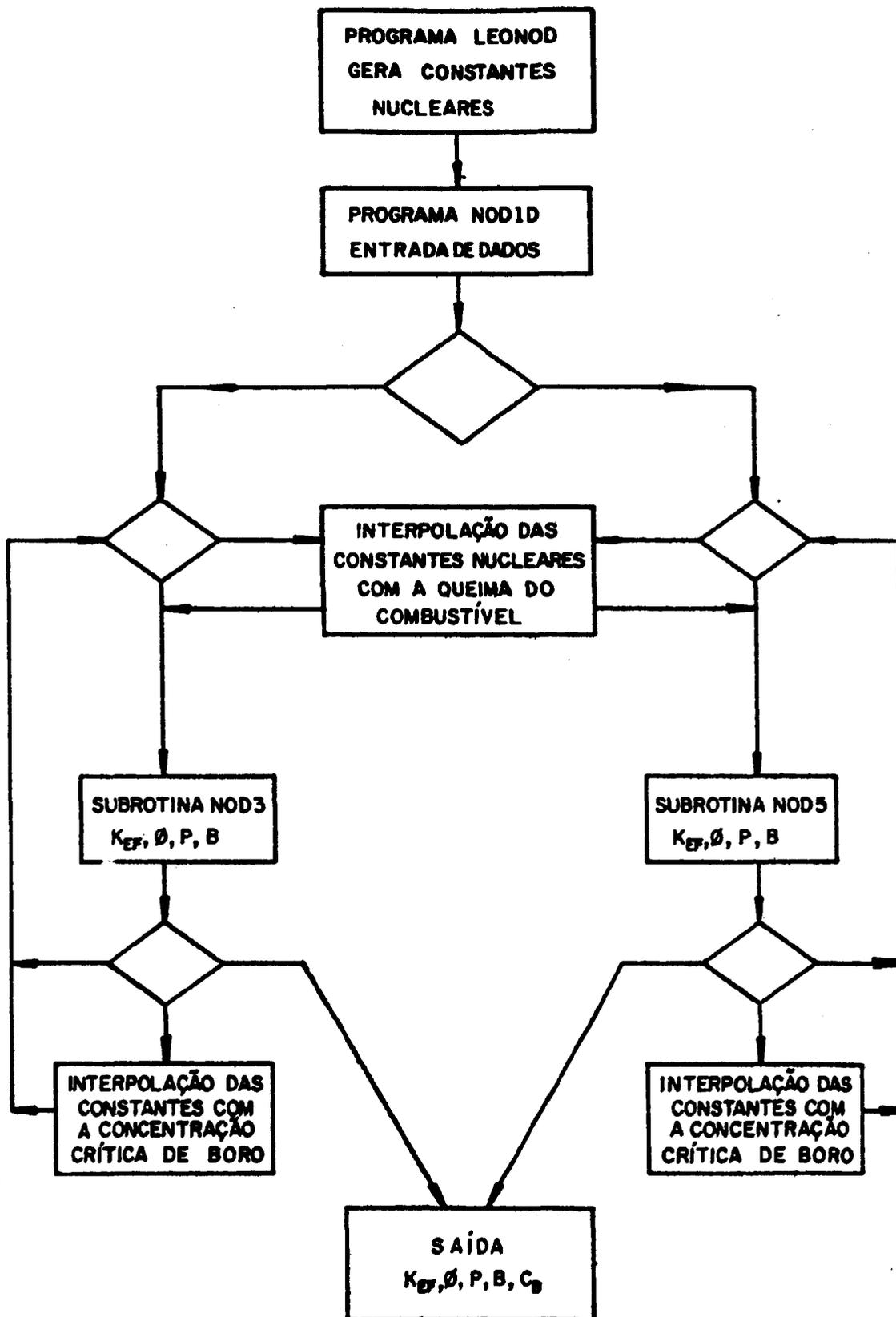


Figura C.1 - Fluxograma geral do Programa NOD1D.

APÊNDICE DVARIÁVEIS DE ENTRADA PARA O PROGRAMA NOD1D

Além das constantes nucleares, poucos dados de entrada são necessários para o programa NOD1D. Estes dados são especificados abaixo, por cartão, com os respectivos formatos de entrada.

Cartão 1 (7I3): N, JM, KM, LLM, IC1, IC2, NZM

- N = número de nodos (regiões) em que a placa foi dividida (N-máximo = 30)
- JM = número de tipos de constantes nucleares ( $JM = 5 + D, \sum_f, \nu \sum_f, \sum_a, \epsilon_f$ ).
- KM = número de concentrações de boro para as quais foram geradas as constantes nucleares (KM-máximo = 5)
- LLM = número de intervalos de queima para os quais foram geradas as constantes nucleares (LLM-máximo = 15)
- IC1 = variável de controle: se IC1 = 0, a subrotina MOD3 é executada; se IC1 = 1, a subrotina MOD5 é executada.
- IC2 = variável de controle: IC2 = 0 (valor não utilizado no programa).
- NZM = número de zonas (composições diferentes) incluindo-se os refletores (NZM-máximo = 5).

Cartão 2 (4E12.6) : PT, EPS1, EPS2, EPS3

- PT = potência total do sistema ( $W/cm^2$ )
- EPS1 = tolerância na convergência do fluxo de nêutrons (sugestão:  $EPS1 = 10^{-6}$ )
- EPS2 e
- EPS3 = tolerâncias na convergência do  $K_{ef}$  (sugestão:  $EPS2 = EPS3 = 10^{-7}$ ).

Cartão 3 (6E12.6) : (DX(I), I=1, N1)

DX(I) = espessura do nodo i (cm)

N1=N+2 = número de nodos em que foi dividida a placa incluindo-se os dois refletores.

Obs.: Os dois últimos valores lidos nesta sequência correspondem as espessuras dos refletores esquerdo e direito respectivamente.

Cartão 4 (6E12.6): (BORO (K), K=1, KM)

BORO(K) = concentrações de boro para as quais foram geradas as constantes nucleares (partes por milhão do elemento boro natural em solução de ácido bórico em água em peso → ppm).

Cartão 5 (6E12.6) : (BR(LL), LL=1, LM)

BR(LL) = valores de queima para os quais foram geradas as constantes nucleares (MWD/MT).

LM=LLM+1 = número de pontos que delimitam os intervalos de queima.

Cartão 6 (24I3) : (NREG(I), I=1, N1)

NREG(I) = número (de 1 a 5 no máximo) que identifica a que zona (composição) pertence um nodo: nodos com a mesma composição recebem o mesmo número. A especificação dos nodos é feita da esquerda para a direita para o combustível; a especificação dos refletores é feita após a do combustível primeiro para o refletor à esquerda.

Obs.: Dependendo do problema, os cartões de números 3, 5 e 6 podem, na realidade, corresponder a mais de 1 cartão de dados.

Os demais dados a serem lidos são as constantes nucleares ( $D_f$ ,  $\sum_f$ ,  $v \sum_f$ ,  $\sum_a$ ,  $c_f$  e as densidades de massas de U-235 e U-238) os quais são lidos diretamente de arquivo em disco, gerado pelo programa LEONOD.

Os resultados de saída já foram mencionados na seção C.3 .

Quer-se acrescentar aqui que as opções de saída (ou seja, as opções de cálculos do programa NOD1D) são selecionadas automaticamente pelos próprios valores KM e LLM, do número de concentrações de boro e do número de intervalos de queima considerados, respectivamente. Dessa forma, as opções de cálculo são as seguintes:

- (a)  $KM = 1$  e  $LLM = 1$ : executa-se o problema estático, obtendo-se o  $K_{ef}$  e distribuições de fluxo de nêutrons e potência;
- (b)  $KM > 1$  e  $LLM = 1$ : executa-se o problema estático com o ajuste da concentração crítica de boro, obtendo-se a concentração crítica de boro e distribuições críticas de fluxo de nêutrons e potência;
- (c)  $KM = 1$  e  $LLM > 1$ : executa-se o problema dinâmico sem o ajuste das concentrações críticas de boro, obtendo-se os  $K_{ef}$  e as distribuições de fluxo de nêutrons, potência e de queima do combustível nuclear em função da queima do combustível nuclear;
- (d)  $KM > 1$  e  $LLM > 1$ : executa-se o problema dinâmico com o ajuste das concentrações críticas de boro, obtendo-se as concentrações críticas de boro, os  $K_{ef}$  e as distribuições de fluxo de nêutrons, de potência e de queima do combustível nuclear em função da queima do combustível nuclear.

Apêndice E: Problema amostra

Problema 2: Placa infinita refletida com três composições com bustíveis (sistema crítico) - Figuras 3.2, 4.10, 4.16 e 4.18.

F.1 Listagem dos cartões de controle do programa LEONOD

```
//ENRDEER# JOB (145,206,                                00000010
// 0090), CARLOS ',TIME=0090,CLASS=D,                  00000020
//          TYPRUN=HCLC,ACTIFY=EA206                    00000030
//          EXEC FORTHCLG,PARM=FCAT=*MAP,ID',REGION=240K,TYPE=90 00000040
//FORTH.SYSFINT DC CLPMY                                00000050
//FORTH.SYSLIN DD SPACE=1TRK,(10,5),RLSE)              00000060
//FORTH.SYSIN CC DSN=EA206.LEONOD.FORT,DISP=SHR        00000070
//GD.FT06F001 DD DUMPY                                  00000080
//GD.FT01F001 CC DSN=CP668.LEOPAMU.LIBR,DISP=SHR      00000090
//GD.FT02F001 CC DSN=EA206.NOD2.CAUGS,DISP=SHR        00000100
//GD.SYSIN DD DSN=EA206.LEONOD2.DATA,DISP=SHR        00000110
//                                                       00000120
```

E.2 Listagem dos cartões de controle do programa NOD1P

```
//ENLARRUN# JCB (145,206,                                00000010
// 0003), CARLOS ',TIME=0003,CLASS=N,                  00000020
//          TYPRUN=HCLC,NOTIFY=EN206                    00000030
//          EXEC FORTHCLG,PARM=FCAT=*MAP,ID',REGION=330K 00000040
//FORTH.SYSLIN DD SPACE=1TRK,(10,5),RLSE)              00000050
//FORTH.SYSIN DD DSN=EN206.NOD1D.FORT,DISP=SHR        00000060
//GD.FT01F001 DD DSN=EN206.NOD2.DADOS,DISP=SHR        00000070
//GD.SYSIN DD DSN=EN206.NOD3.DATA,DISP=SHR            00000080
//                                                       00000090
```

F.3 Listagem dos cartões de dados de entrada do programa NOD1D

```
15 5 5 10 1 0 4                                         00000010
1.45e50+E+04 0.000001 0.000001 0.000001              00000020
12.          12.          12.          12.          12.          12.          00000030
12.          12.          12.          12.          12.          12.          00000040
12.          12.          12.          15.          15.          12.          00000050
0.           1000.         2000.         3000.         3500.         00000060
0.           200.          1000.         4000.         7000.          10000.        00000070
10000.       16000.        19000.        22000.        25000.         00000080
1 1 1 2 2 2 3 3 3 2 2 2 1 1 1 4 4                    00000090
```

Obs.: Os demais dados de entrada do programa NOD1D são as massas iniciais de urânio e as constantes nucleares  $D$ ,  $\lambda_f$ ,  $\nu \lambda_f$ ,  $\lambda_a$  e  $c_f$ , calculadas (para cada enriquecimento, cada concentração de boro e cada intervalo de queima) pelo programa LEONOD e gravadas em arquivo em disco.

E.4 Listagem dos cartões de dados de entrada do programa LFCMOD

```

.....
PROGRAMA LEGNCO-CELULA U02 3.18 ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO = 0.0
1 3 0 0 0 1 1 1
59 1.0
5 -0.41783
100 1.0
777 0.0 0.0 0.0
10 -0.031
29 0.0
777 0.0
012.777 770.888 352.805 307.8 0.0002042
0.409575 0.47498 1.2319
2250.0 0.95
1.0 108.658 0.0 0.84
1 -200.
2 -800.
10 -3000.
777 0.0
PROGRAMA LEGNCO-CELULA U02 3.18 ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO = 1000.0
1 3 0 0 0 1 1 1
59 1.0
5 -0.41783
100 1.0
777 0.0 0.0 0.0
18 -0.031
29 1000.
777 0.0
012.777 770.888 352.805 307.8 0.0002042
0.409575 0.47498 1.2319
2250.0 0.95
1.0 108.658 0.0 0.84
1 -200.
2 -800.
10 -3000.
777 0.0 0.0
PROGRAMA LEGNCO-CELULA U02 3.18 ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO = 2000.0
1 3 0 0 0 1 1 1
59 1.0
5 -0.41783
100 1.0
777 0.0 0.0 0.0
18 -0.031
29 2000.
777 0.0
012.777 778.888 352.805 307.8 0.0002042
0.409575 0.47498 1.2319
2250.0 0.95
1.0 108.658 0.0 0.84
1 -200.
2 -800.
10 -3000.
777 0.0 0.0
PROGRAMA LEGNCO-CELULA U02 3.18 ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO = 3000.0
1 3 0 0 0 1 1 1
59 1.0
5 -0.41783
100 1.0
777 0.0 0.0 0.0
10 -0.031
29 3000.
777 0.0
012.777 770.888 352.805 307.8 0.0002042
0.409575 0.47498 1.2319
2250.0 0.95

```

1.0	100.050		C.C	0.04	00000640
1	-200.				00000650
2	-800.				00000660
10	-3000.				00000670
777	C.C	0.0			00000680
PROGRAMA LEGNOC-CELULA UOZ 3.12 ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO=3500.0					
1	3	0	0	0	1
59	1.0				00000700
3		-0.41783			00000710
100			1.0		00000720
777	C.C	0.0	0.0		00000730
10	-0.021				00000740
29	3500.0				00000750
777	C.C				00000760
012.777	778.888	352.805	307.8	0.0002642	00000770
0.409575	0.47498	1.2319			00000780
2250.0		0.95			00000790
1.0	100.698		0.0	0.04	00000800
1	-200.				00000810
2	-800.				00000820
10	-3000.				00000830
777	C.C	C.C			00000840
PROGRAMA LEGNOC-CELULA UOZ 2.6% ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO = 0.0					
1	3	0	0	0	1
99	1.0				00000850
3		-0.41783			00000860
100			1.0		00000870
777	0.0	0.0	0.0		00000880
10	-0.026				00000890
29	C.C				00000900
777	0.0				00000910
012.777	778.888	352.805	307.8	0.0002642	00000920
0.409575	0.47498	1.2319			00000930
2250.0		0.95			00000940
1.0	100.658		0.0	0.04	00000950
1	-200.				00000960
2	-800.				00000970
10	-3000.				00000980
777	C.C	0.0			00000990
PROGRAMA LEGNOC-CELULA UOZ 2.6% ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO = 100J.					
1	3	0	0	0	1
99	1.0				00001000
3		-0.41783			00001010
100			1.0		00001020
777	C.C	0.0	0.0		00001030
10	-0.026				00001040
29	1000.				00001050
777	C.C				00001060
012.777	778.888	352.805	307.8	0.0002642	00001070
0.409575	0.47498	1.2319			00001080
2250.0		0.95			00001090
1.0	100.658		0.0	0.04	00001100
1	-200.				00001110
2	-800.				00001120
10	-3000.				00001130
777	C.C	0.0			00001140
PROGRAMA LEGNOC-CELULA UOZ 2.6% ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO = 2000.					
1	3	0	0	0	1
99	1.0				00001150
3		-0.41783			00001160
100			1.0		00001170
777	C.C	0.0	0.0		00001180
10	-0.026				00001190
29	1000.				00001200
777	C.C				00001210
012.777	778.888	352.805	307.8	0.0002642	00001220
0.409575	0.47498	1.2319			00001230
2250.0		0.95			00001240
1.0	100.658		0.0	0.04	00001250
1	-200.				00001260
2	-800.				00001270
10	-3000.				00001280
777	C.C	0.0			00001290
10	-0.026				00001300

29	2000.					00001270
777	C.C					00001280
012.777	778.868	352.805	0.0002642			00001290
0.409575	0.47456	1.2319				00001300
2250.0		0.95				00001310
1.0	108.698		0.0	0.84		00001320
1	-200.					00001330
2	-800.					00001340
10	-3000.					00001350
777	C.C					00001360
PROGRAMA LECNOC-CELULA UO2 2.1 ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO=3000.						
1	3	0	0	1	1	1
99	1.0					00001370
3		-0.41783				00001380
100			1.0			00001390
777	0.0	0.0	0.0			00001400
10	-0.026					00001410
29	3000.0					00001420
777	0.0					00001430
012.777	778.888	352.805	307.8	0.0002642		00001440
0.409575	0.47498	1.2319				00001450
2250.0		0.95				00001460
1.0	108.698		0.0	0.84		00001470
1	-200.					00001480
2	-800.					00001490
10	-3000.					00001500
777	C.C	0.0				00001510
PROGRAMA LECNOC-CELULA UO2 2.08 ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO=5500.0						
1	3	0	0	1	1	1
99	1.0					00001520
3		-0.41783				00001530
100			1.0			00001540
777	0.0	0.0	0.0			00001550
10	-0.026					00001560
29	3500.0					00001570
777	0.0					00001580
012.777	778.868	352.805	307.8	0.0002642		00001590
0.409575	0.47456	1.2319				00001600
2250.0		0.95				00001610
1.0	108.698		0.0	0.84		00001620
1	-200.					00001630
2	-800.					00001640
10	-3000.					00001650
777	0.0	0.0				00001660
PROGRAMA LECNOC-CELULA UO2 2.18 ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO = 0.0						
1	3	0	0	1	1	1
99	1.0					00001670
3		-0.41783				00001680
100			1.0			00001690
777	C.C	0.0	0.0			00001700
10	-0.021					00001710
29	0.0					00001720
777	C.C					00001730
012.777	778.888	352.805	307.8	0.0002642		00001740
0.409575	0.47458	1.2319				00001750
2250.0		0.95				00001760
1.0	108.698		0.0	0.84		00001770
1	-200.					00001780
2	-800.					00001790
10	-3000.					00001800
777	C.C	0.0				00001810
PROGRAMA LECNOC-CELULA UO2 2.18 ENRIQUECIDO EM U-235 - CONC.BORO = 1000.						
1	3	0	0	1	1	1
99	1.0					00001820
3		-0.41783				00001830
100			1.0			00001840
777	C.C	0.0	0.0			00001850
10	-0.021					00001860
29	0.0					00001870
777	C.C					00001880
012.777	778.888	352.805	307.8	0.0002642		00001890
0.409575	0.47458	1.2319				
2250.0		0.95				
1.0	108.698		0.0	0.84		
1	-200.					
2	-800.					
10	-3000.					
777	C.C	0.0				

59	1.0					00001900
3		-0.41783				00001910
100			1.0			00001920
777	0.0	0.0	0.0			00001930
18	-0.021					00001940
29	1000.					00001950
777	0.0					00001960
612.777	778.888	352.805	307.8	0.0002642		00001970
0.409575	0.47498	1.2319				00001980
2250.0		0.95				00001990
1.0	108.650		0.0	0.84		00002000
1	-200.					00002010
2	-800.					00002020
10	-3000.					00002030
777	0.0	0.0				00002040
PROGRAMA LEONOC-CELULA UOZ 2.1% ENRIQUECICDO EM U-235 - CONC.0000 = 2000.00002050						
1	3	0	0	0	1	1
59	1.0					00002060
3		-0.41783				00002070
100			1.0			00002080
777	0.0	0.0	0.0			00002090
18	-0.021					00002100
29	2000.					00002110
777	0.0					00002120
612.777	778.888	352.805	307.8	0.0002642		00002130
0.409575	0.47498	1.2319				00002140
2250.0		0.95				00002150
1.0	108.650		0.0	0.84		00002160
1	-200.					00002170
2	-800.					00002180
10	-3000.					00002190
777	0.0	0.0				00002200
PROGRAMA LEANOC-CELULA UOZ 2.1% ENRIQUECICDO EM U-235 - CONC.0000 = 3000.00002210						
1	3	0	0	0	1	1
59	1.0					00002220
3		-0.41783				00002230
100			1.0			00002240
777	0.0	0.0	0.0			00002250
18	-0.021					00002260
29	3000.					00002270
777	0.0					00002280
612.777	778.888	352.805	307.8	0.0002642		00002290
0.409575	0.47498	1.2319				00002300
2250.0		0.95				00002310
1.0	108.698		0.0	0.84		00002320
1	-200.					00002330
2	-800.					00002340
10	-3000.					00002350
777	0.0	0.0				00002360
PROGRAMA LEANOC-CELULA UOZ 2.1% ENRIQUECICDO EM U-235 - CONC.0000 = 3500.00002370						
1	3	0	0	0	1	1
59	1.0					00002380
3		-0.41783				00002390
100			1.0			00002400
777	0.0	0.0	0.0			00002410
18	-0.021					00002420
29	3500.					00002430
777	0.0					00002440
612.777	778.888	352.805	307.8	0.0002642		00002450
0.409575	0.47498	1.2319				00002460
2250.0		0.95				00002470
1.0	108.656		0.0	0.84		00002480
1	-200.					00002490
						00002500
						00002510
						00002520

2	-800.								00002530
10	-3000.								00002540
777	0.0	0.0	0.0	0.0					00002550
PROGRAMA LEGNOD - CELULA H2O - CONCENTRACAO DE BORG = 0.0									
1	3	0	0	0	1	1			10 00002560
100	1.0	1.0	1.0	1.0					00002570
777	0.0	0.0	0.0	0.0					00002580
29	0.0								00002590
777	0.0								00002600
307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	0.0002642				00002610
0.409575	0.47498	1.2319							00002620
2250.0									00002630
PROGRAMA LEGNOD - CELULA H2O - CONCENTRACAO DE BORG = 1000.									
1	3	0	0	0	1	1			10 00002640
100	1.0	1.0	1.0	1.0					00002650
777	0.0	0.0	0.0	0.0					00002660
29	1000.								00002670
777	0.0								00002680
307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	0.0002642				00002690
0.409575	0.47498	1.2319							00002700
2250.0									00002710
PROGRAMA LEGNOD - CELULA H2O - CONCENTRACAO DE BORG = 2000.									
1	3	0	0	0	1	1			10 00002720
100	1.0	1.0	1.0	1.0					00002730
777	0.0	0.0	0.0	0.0					00002740
29	2000.								00002750
777	0.0								00002760
307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	0.0002642				00002770
0.409575	0.47498	1.2319							00002780
2250.0									00002790
PROGRAMA LEGNOD - CELULA H2O - CONCENTRACAO DE BORG = 3000.									
1	3	0	0	0	1	1			10 00002800
100	1.0	1.0	1.0	1.0					00002810
777	0.0	0.0	0.0	0.0					00002820
29	3000.								00002830
777	0.0								00002840
307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	0.0002642				00002850
0.409575	0.47498	1.2319							00002860
2250.0									00002870
PROGRAMA LEGNOD - CELULA H2O - CONCENTRACAO DE BORG = 4000.									
1	3	0	0	0	1	1			10 00002880
100	1.0	1.0	1.0	1.0					00002890
777	0.0	0.0	0.0	0.0					00002900
29	4000.								00002910
777	0.0								00002920
307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	0.0002642				00002930
0.409575	0.47498	1.2319							00002940
2250.0									00002950
PROGRAMA LEGNOD - CELULA H2O - CONCENTRACAO DE BORG = 5000.									
1	3	0	0	0	1	1			10 00002960
100	1.0	1.0	1.0	1.0					00002970
777	0.0	0.0	0.0	0.0					00002980
29	5000.								00002990
777	0.0								00003000
307.8	307.8	307.8	307.8	307.8	0.0002642				
0.409575	0.47498	1.2319							
2250.0									



SAIDA DOS RESULTADOS

INTERVALO DE QUEIMA NUMERO = 1 QUEIMA TOTAL ACUMULADA = 0.0 SISTEMA CRITICO

POTENCIA TOTAL DO SISTEMA = 0.1956360 05

FATOR DE MULTIPLICACAO EFETIVO DO SISTEMA = 0.1000000 01

CONCENTRACAO CRITICA DE VOMU = 0.2404216 04

NUMERAO	POT TOTAL	FOT MEDIA	POT NORMALIZ	FLUXO TOTAL	FLUXO MEDIO	FLUXO NORMALIZ	QUEIMA
1	0.7751610 03	0.6454670 02	G.364650D-01	0.2559160 10	0.2132050 15	0.3775070-01	0.1100020 03
2	0.1262510 04	0.1052100 03	U.645271C-01	0.4100160 10	0.3473400 15	0.6140200-01	0.1433410 03
3	0.1572320 04	0.1316320 03	G.603643C-01	0.5191170 10	0.4325970 15	0.7657560-01	0.2411030 03
4	0.1554400 04	0.1244420 03	U.7472050-01	0.3443400 10	0.4334000 15	0.6023710-01	0.2371760 03
5	G.1516330 04	0.1202610 03	U.7744930-01	0.3200420 10	0.4407430 15	0.7401720-01	0.2324450 03
6	0.1344400 04	0.1162440 03	G.7124470-01	0.4063400 10	0.4034470 15	0.7177100-01	0.2130010 03
7	0.1132510 04	0.4044220 02	U.3004400-01	0.4322570 10	0.3602100 15	0.6370200-01	0.1707000 03
8	G.1657030 04	0.4144700 02	0.3011130-01	0.4117020 10	0.3451330 15	0.6073440-01	0.1603210 03
9	0.1132530 04	0.4044300 02	0.3040300-01	0.4322070 10	0.3602220 15	0.6370340-01	0.1707030 03
10	G.1344470 04	0.1162470 03	U.7124460-01	0.4063020 10	0.4034000 15	0.7177010-01	0.2130000 03
11	0.1516330 04	0.1202630 03	G.7750240-01	0.3200410 10	0.4407000 15	0.7401700-01	0.2324400 03
12	0.1554470 04	0.1244470 03	U.7472440-01	0.3443110 10	0.4334200 15	0.6023600-01	0.2371870 03
13	0.1572350 04	0.1316300 03	U.6036010-01	0.5191130 10	0.4325010 15	0.7657420-01	0.2411170 03
14	U.1262500 04	0.1052130 03	U.6453030-01	0.4100300 10	0.3473600 15	0.6140000-01	0.1433010 03
15	G.7751640 03	G.6454640 02	0.3646400-01	0.2559110 10	0.2132100 15	0.3775230-01	0.1100070 03

INTERVALO DE QUEIMA NUMERO = 2 QUEIMA TOTAL ACUMULADA = 0.2000000 03 SISTEMA CRITICO

POTENCIA TOTAL DO SISTEMA = 0.1450360 05

FATOR DE MULTIPLICACAO EFETIVO DO SISTEMA = 0.100000 01

CONCENTRACAO CRITICA DE MURU = 0.211940 04

NREGLIAO	POT TOTAL	POT MEDIA	POT NORMALIZ	FLUXO TOTAL	FLUXO MEDIO	FLUXO NORMALIZ	QUEIMA
1	0.7803490 03	0.0504560 02	0.3549340-C1	0.2306730 10	0.2130440 15	0.3702000-01	0.5576130 03
2	0.1242370 04	0.1033400 03	0.6350790-01	0.4112020 10	0.3426000 15	0.0060330-01	0.4537230 03
3	0.1540390 04	0.1203000 03	0.7872520-01	0.5102200 10	0.4231030 15	0.7514670-01	0.1105000 04
4	0.1538410 04	0.1202000 03	0.7802790-01	0.5072020 10	0.4470000 15	0.7017330-01	0.1102700 04
5	0.1505010 04	0.1250170 03	0.7710020-01	0.5271920 10	0.4593200 15	0.7704000-01	0.1150400 04
6	0.1400700 04	0.1173070 03	0.7200100-01	0.4410400 10	0.4090700 15	0.7244100-01	0.1077000 04
7	0.1156430 04	0.0920200 02	0.6004310-01	0.4447190 10	0.3703490 15	0.6554320-01	0.4007010 03
8	0.1143070 04	0.0933050 02	0.5005200-01	0.4204770 10	0.3350140 15	0.0242030-01	0.0047010 03
9	0.1186440 04	0.0920330 02	0.6004330-01	0.4447220 10	0.3700020 15	0.6554300-01	0.4007000 03
10	0.1400700 04	0.1173070 03	0.7200170-01	0.4410330 10	0.4090700 15	0.7244000-01	0.1077000 04
11	0.1504030 04	0.1250170 03	0.7710730-01	0.5272000 10	0.4593330 15	0.7704330-01	0.1150300 04
12	0.1538410 04	0.1202000 03	0.7802940-01	0.5072110 10	0.4470700 15	0.7017470-01	0.1102700 04
13	0.1540390 04	0.1203000 03	0.7873070-C1	0.5102240 10	0.4231100 15	0.7514700-01	0.1105300 04
14	0.1242370 04	0.1033400 03	0.6350800-01	0.4112000 10	0.3426100 15	0.0060440-01	0.4537400 03
15	0.7803490 03	0.0504000 02	0.3504330-C1	0.2306770 10	0.2130470 15	0.3702400-01	0.5576000 03

INTERVALO DE QUEIMA NUMERO = 3 QUEIMA TOTAL ACUMULADA = 0.100000 04 SISTEMA CRITICO

POTENCIA TOTAL DO SISTEMA = 0.195500 03

FATOR DE MULTIPLICACAO EFETIVO DO SISTEMA = 0.100000 01

CONCENTRACAO CRITICA DE MURU = 0.201400 04

NREGLIAO	POT TOTAL	POT MEDIA	POT NORMALIZ	FLUXO TOTAL	FLUXO MEDIO	FLUXO NORMALIZ	QUEIMA
1	0.7530490 03	0.0402430 02	0.3033130-C1	0.4443330 10	0.2079010 15	0.3000300-01	0.2331000 04
2	0.1211170 04	0.1000310 03	0.6100240-01	0.4027100 10	0.3370200 15	0.3500300-01	0.3701300 04
3	0.1512000 04	0.1200000 03	0.7330010-C1	0.5030300 10	0.4142000 15	0.7502200-01	0.4004000 04
4	0.1531070 04	0.1273000 03	0.7023010-01	0.5350010 10	0.4400010 15	0.7071000-01	0.4700000 04
5	0.1526020 04	0.1200000 03	0.7700000-01	0.5310300 10	0.4402100 15	0.7010000-01	0.4004000 04
6	0.1434740 04	0.1150000 03	0.7334300-01	0.5017300 10	0.4101200 15	0.7071000-01	0.4570000 04
7	0.1227700 04	0.1023000 03	0.6274770-01	0.4301000 10	0.3601000 15	0.6701000-01	0.3701000 04
8	0.1100000 04	0.0900000 02	0.6000000-01	0.4410000 10	0.3607000 15	0.6000000-01	0.3500000 04
9	0.1227710 04	0.1023000 03	0.6274000-01	0.4301000 10	0.3601000 15	0.6701000-01	0.3700000 04
10	0.1434760 04	0.1150000 03	0.7330070-01	0.5017020 10	0.4101300 15	0.7071770-01	0.4571700 04
11	0.1520050 04	0.1200710 03	0.7700000-01	0.5310000 10	0.4402000 15	0.7010000-01	0.4004000 04

12	0.1531110 04	0.1275930 03	0.7400000 01	0.7500000 10	0.4400000 15	0.7070000 01	0.4700000 04
13	0.1512000 04	0.1200000 03	0.7400000 01	0.7500000 10	0.4400000 15	0.7070000 01	0.4700000 04
14	0.121210 04	0.1000000 03	0.6100000 01	0.7500000 10	0.3300000 15	0.5000000 01	0.3700000 04
15	0.7539170 03	0.0200000 02	0.0000000 01	0.7500000 10	0.3700000 15	0.5000000 01	0.3700000 04

INTERVALO DE QUEIMA NUMERO = 4 QUEIMA TOTAL ACUMULADA = 0.4000000 04 SISTEMA CRITICO

POTENCIA TOTAL DO SISTEMA = 0.1950560 03

FATOR DE MULTIPLICACAO EFETIVO DO SISTEMA = 0.1000000 01

CONCENTRACAO CRITICA DE NUMO = 0.1000000 01

NUMERO	POT TOTAL	POT MEDIA	POT NORMALIZ	FLUXO TOTAL	FLUXO MEDIO	FLUXO NORMALIZ	QUEIMA
1	0.7033920 03	0.0370270 02	0.3911920 01	0.2539920 10	0.2112430 15	0.3092970 01	0.0000000 04
2	0.1192720 04	0.5735930 02	0.0000000 01	0.3391110 10	0.3325940 15	0.5019900 01	0.0000000 04
3	0.1407070 04	0.1223000 03	0.7500000 01	0.4400000 10	0.4121300 15	0.7200000 01	0.0000000 04
4	0.1493700 04	0.1244750 03	0.7034320 01	0.5200000 10	0.4400000 15	0.7000000 01	0.0000000 04
5	0.1502750 04	0.1252270 03	0.7000000 01	0.5319900 10	0.4400000 15	0.7742510 01	0.0000000 04
6	0.1451150 04	0.1200000 03	0.7000000 01	0.5121970 10	0.4400000 15	0.7000000 01	0.0000000 04
7	0.1403000 04	0.1000000 03	0.0000000 01	0.4700000 10	0.3700000 15	0.0000000 01	0.0000000 04
8	0.1231200 04	0.1000000 03	0.0000000 01	0.4000000 10	0.3000000 15	0.0000000 01	0.0000000 04
9	0.1203000 04	0.1000000 03	0.0000000 01	0.4700000 10	0.3700000 15	0.0000000 01	0.0000000 04
10	0.1451150 04	0.1200000 03	0.7000000 01	0.5121970 10	0.4400000 15	0.7000000 01	0.0000000 04
11	0.1502750 04	0.1252270 03	0.7000000 01	0.5319900 10	0.4400000 15	0.7742510 01	0.0000000 04
12	0.1493700 04	0.1244750 03	0.7034320 01	0.5200000 10	0.4400000 15	0.7000000 01	0.0000000 04
13	0.1407070 04	0.1223000 03	0.7500000 01	0.4400000 10	0.4121300 15	0.7200000 01	0.0000000 04
14	0.1192720 04	0.5735930 02	0.0000000 01	0.3391110 10	0.3325940 15	0.5000000 01	0.0000000 04
15	0.7033920 03	0.0370270 02	0.3911920 01	0.2539920 10	0.2112430 15	0.3092970 01	0.0000000 04

INTERVALO DE QUEIMA NUMERO = 5 QUEIMA TOTAL ACUMULADA = 0.7000000 04 SISTEMA CRITICO

POTENCIA TOTAL DO SISTEMA = 0.1950560 03

FATOR DE MULTIPLICACAO EFETIVO DO SISTEMA = 0.1000000 01

CONCENTRACION CRITICA DE UNIC = 0.1234567890

MESURAS	PCI TOTAL	PUI MEJIA	PUI NORMALIZ	FLUJO TOTAL	FLUJO MEJIA	FLUJO NORMALIZ	JUEJMA
1	0.0153200 03	0.0781570 02	0.0163026-01	0.0090400 10	0.0244370 13	0.0097000-01	0.5700720 04
2	0.1211500 04	0.1000000 03	0.0194220-01	0.0011000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.5421200 04
3	0.1033000 04	0.1210000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
4	0.1000000 04	0.1200000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
5	0.1000000 04	0.1200000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
6	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
7	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
8	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
9	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
10	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
11	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
12	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
13	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
14	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
15	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03

.....

INTERVALO DE USUJMA NUMERIC = 6 CUBIJA TOTAL ALUMBRADO UJ SISTEMA CRITICO

.....

PUEJMA TOTAL CU SISTEMA = 0.1000000 03

FATOR DE MULTIPLICACION EFETIVO DL SISTEMA = 0.1000000 01

CONCENTRACION CRITICA DE UNIC = 0.1234567890

MESURAS	PCI TOTAL	PUI MEJIA	PUI NORMALIZ	FLUJO TOTAL	FLUJO MEJIA	FLUJO NORMALIZ	JUEJMA
1	0.0153200 03	0.0781570 02	0.0163026-01	0.0090400 10	0.0244370 13	0.0097000-01	0.5700720 04
2	0.1211500 04	0.1000000 03	0.0194220-01	0.0011000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.5421200 04
3	0.1033000 04	0.1210000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
4	0.1000000 04	0.1200000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
5	0.1000000 04	0.1200000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
6	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
7	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
8	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
9	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
10	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
11	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
12	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
13	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
14	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03
15	0.1000000 04	0.1000000 03	0.0200000-01	0.0000000 10	0.0000000 10	0.0000000-01	0.1100000 03

15 0.6715310 03 0.7262760 02 0.4459400-01 0.4670030 10 0.2340000 15 0.4132950-01 0.7471170 04

INTERVALU DE QUEIMA NUMERIC = 7 QUEIMA TOTAL ACUMULADA= 0.1300000 03 SISTEMA CRITICO

POTENCIA TOTAL DO SISTEMA = 0.1936360 03

FATOR DE MULTIPLICACAO EFETIVO DO SISTEMA = 0.1000000 01

CONCENTRACAO CRITICA DE BURCO = 0.4772630 03

REGIAC	PCI TOTAL	PCI MLCIA	POT NORMALIZ	FLUXO TOTAL	FLUXO MEDIO	FLUXO NORMALIZ	QUEIMA
1	0.4737160 03	0.0114300 02	0.4470000-01	0.2225200 10	0.2067720 15	0.4340450-01	0.1061000 03
2	0.1242500 04	0.1077000 03	0.0002500-01	0.4410000 10	0.3002000 15	0.6240000-01	0.1000000 01
3	0.1457240 04	0.1214300 03	0.7440070-01	0.3075210 10	0.4221300 15	0.7230000-01	0.1000000 01
4	0.1421170 04	0.1104300 03	0.7200000-01	0.3100000 10	0.4321300 15	0.7240000-01	0.1000000 01
5	0.1404530 04	0.1170400 03	0.7170000-01	0.3120000 10	0.4270000 15	0.7300000-01	0.1000000 01
6	0.1306200 04	0.1130000 03	0.6000000-01	0.4400000 10	0.4130000 15	0.7070000-01	0.1000000 01
7	0.1250770 04	0.1042310 03	0.6342710-01	0.4740000 10	0.3570000 15	0.6700000-01	0.1000000 01
8	0.1232470 04	0.1027000 03	0.6301700-01	0.4670000 10	0.3520000 15	0.6670000-01	0.1000000 01
9	0.1220700 04	0.1042300 03	0.6342700-01	0.4740000 10	0.3570000 15	0.6700000-01	0.1000000 01
10	0.1166300 04	0.1130000 03	0.6400000-01	0.4400000 10	0.4130000 15	0.7070000-01	0.1000000 01
11	0.1404500 04	0.1170400 03	0.7170000-01	0.3120000 10	0.4270000 15	0.7300000-01	0.1000000 01
12	0.1421100 04	0.1104300 03	0.7200000-01	0.3100000 10	0.4321300 15	0.7240000-01	0.1000000 01
13	0.1457200 04	0.1214300 03	0.7440000-01	0.3075200 10	0.4221300 15	0.7230000-01	0.1000000 01
14	0.1292550 04	0.1077100 03	0.0000000-01	0.4410000 10	0.3002000 15	0.6240000-01	0.1000000 01
15	0.4737300 03	0.0114300 02	0.4470000-01	0.2225370 10	0.2067610 15	0.4340710-01	0.1021110 03

INTERVALU DE QUEIMA NUMERIC = 8 QUEIMA TOTAL ACUMULADA= 0.1000000 03 SISTEMA CRITICO

POTENCIA TOTAL DO SISTEMA = 0.1936360 03

FATOR DE MULTIPLICACAO EFETIVO DO SISTEMA = 0.1000000 01

CONCENTRACAO CRITICA DE BURCO = 0.1270310 03

NUMERO	PCI TOTAL	PLT MEDIA	POT NOMINAL	FLUXO TOTAL	FLUXO MEDIO	FLUXO NOMINAL	QUEIMA
1	0.1001140 04	0.5004400 02	0.3323440-01	0.3000700 10	0.3000000 10	0.3004310-01	0.1204700 05
2	0.1346370 04	0.1122140 03	0.0002310-01	0.4000710 10	0.3074140 10	0.0573000-01	0.1014710 05
3	0.1400070 04	0.1222200 03	0.7401300-01	0.3100000 10	0.4000000 10	0.7000000-01	0.2000000 05
4	0.1500000 04	0.1100710 03	0.7145300-01	0.3100000 10	0.4000000 10	0.7000000-01	0.2000000 05
5	0.1300070 04	0.1130720 03	0.0771740-01	0.3020000 10	0.4140000 10	0.7112000-01	0.2110000 05
6	0.1310000 04	0.1000100 03	0.0741740-01	0.4000000 10	0.4000000 10	0.0000000-01	0.2000000 05
7	0.1200000 04	0.1000000 03	0.0104100-01	0.4000000 10	0.4000000 10	0.0000000-01	0.1000000 05
8	0.1100170 04	0.0000100 02	0.0000000-01	0.4000000 10	0.3700000 10	0.0000000-01	0.1700000 05
9	0.1200000 04	0.1000000 03	0.0104100-01	0.4000000 10	0.3000000 10	0.0000000-01	0.1000000 05
10	0.1310070 04	0.1000100 03	0.0741740-01	0.4000000 10	0.4000000 10	0.0000000-01	0.2000000 05
11	0.1300000 04	0.1100710 03	0.0771740-01	0.3000000 10	0.4140000 10	0.7112000-01	0.2110000 05
12	0.1300000 04	0.1100000 03	0.7145300-01	0.3100000 10	0.4000000 10	0.7000000-01	0.2000000 05
13	0.1400000 04	0.1222200 03	0.7401300-01	0.3100000 10	0.4000000 10	0.7000000-01	0.2000000 05
14	0.1300000 04	0.1122100 03	0.0002310-01	0.4000000 10	0.3074140 10	0.0573000-01	0.1014710 05
15	0.1001100 04	0.5004400 02	0.3323400-01	0.3000000 10	0.3000000 10	0.3004300-01	0.1204700 05

.....  
 INTERVALO DE QUEIMA NOMINAL = 9 QUEIMA TOTAL ACUMULADA = 0.1400000 05 SISTEMA SUBCRITICO  
 .....

POTENCIA TOTAL DO SISTEMA = 0.1400000 05  
 FATOR DE MULTIPLICAÇÃO EFETIVO DO SISTEMA = 0.1000000 01  
 CONCENTRAÇÃO CRITICA DE BORO = -.2000000 03

Anêndice F - Listagem do programa NODIP

```

.....
*****J00J0010
*****J00J0020
C      0000030
C      0000040
C      0000050
C      0000060
C      0000070
*****J00J0080
*****0000090
C      0000100
C      0000110
C      0000120
C      0000130
C      0000140
C      0000150
C      0000160
C      0000170
C      0000180
C      0000190
C      0000200
C      0000210
C      0000220
C      0000230
C      0000240
C      0000250
C      0000260
C      0000270
C      0000280
C      0000290
C      0000300
C      0000310
C      0000320
C      0000330
C      0000340
C      0000350
C      0000360
C      0000370
C      0000380
C      0000390
C      0000400
C      0000410
C      0000420
C      0000430
C      0000440
C      0000450
C      0000460
C      0000470
C      0000480
C      0000490
C      0000500
C      0000510
C      0000520
C      0000530
C      0000540
C      0000550
C      0000560
C      0000570
C      0000580
C      0000590
C      0000600
C      0000610
C      0000620
C      0000630
C
      IMPLICIT REAL*(A-H,G-Z)
      REAL*8 N,NT,LAMB,NISIGF
      COMMON N,IC1,IC2,LL,LLM,KR
      COMMON BGRG(5),BGRGC,BGR1,BGR2,LAMB,EPS1,EPS2,EPS3
      COMMON F1(30),F11(30),F111(30),FIT,P1(30),P11(30),PM1(30),PT,
      *S2(32,5,5,15)
      COMMON DX(32),D(32),SIGA(32),SIGF(32),NISIGF(32),ENF(32)
      DIMENSION A1(5,5,15),A2(5,5,15),A3(5,5,15),A4(5,5,15),A5(5,5,
      *15),S1(32,5,5,15),B(30,15),BB(16),DB(15),M(30),AREG(32)
C
      LEITURA DOS DADOS DE ENTRADA
C
      READ(5,1) N,JM,KR,LLM,IC1,IC2,NZM
      FORMAT(7I3)
      NA = N + 2
      WRITE(6,2) N,JM,KR,LLM,IC1,IC2,NZM
      FORMAT(11H0,'D A D O S D E E N T R A D A',5(1),7I3)
      READ(5,3) PT,EPS1,EPS2,EPS3
      FORMAT(4E12.6)
      WRITE(6,4) PT,EPS1,EPS2,EPS3
      FORMAT(11H0,4(E12.6,5X))
      READ(5,5) (DX(I),I=1,NI)
      FORMAT(6E12.6)
      WRITE(6,6) (DX(I),I=1,NI)
      FORMAT(11H0,6(E12.6,5X)/(11H0,6(E12.6,5X))
      READ(5,51) (BCHC(K),K=1,KR)
      FORMAT(6E12.6)
      WRITE(6,52) (BCHC(K),K=1,KR)
      FORMAT(11H0,6(E12.6,5X))
      LM = LLM + 1
      READ(5,53) (BB(LL),LL=1,LM)
      FORMAT(6E12.6)
      WRITE(6,54) (BB(LL),LL=1,LM)
      FORMAT(11H0,6(E12.6,5X)/(11H0,6(E12.6,5X))
      DO 55 LL=1,LLM
      DB(LL) = BB(LL+1) - BB(LL)
      CONTINUE
      READ(5,6) (AREG(I),I=1,NI)
      FORMAT(24I3)
      WRITE(6,7) (AREG(I),I=1,NI)
      FORMAT(11H0,24I3)
C      LEITURA DAS SECCOES DE CHECKE DE ARQUIVO GERADO PELO PROGRAMA
      DO 57 K=1,KR
      READ(1) XP1
      DO 56 LL=1,LLM
      READ(1) A1(1,K,LL),A1(2,K,LL),A1(3,K,LL),A1(4,K,LL),A1(5,K,LL)
      CONTINUE
      CONTINUE
      (PRINT*,LL,2) GC TC 00
      DO 59 K=1,KR
      READ(1) XP2
      DO 58 LL=1,LLM

```

```

READ(I) A2(1,K,LL),A2(2,K,LL),A2(3,K,LL),A2(4,K,LL),A2(5,K,LL) 00000640
CONTINUE 00000650
CONTINUE 00000660
IF(INZM.LT.3) GC TC 60 00000670
00000680
DO 61 K=1,KM 00000690
READ(I) XP3 00000700
DO 50 LL=1,LLM 00000710
READ(I) A3(1,K,LL),A3(2,K,LL),A3(3,K,LL),A3(4,K,LL),A3(5,K,LL) 00000720
CONTINUE 00000730
CONTINUE 00000740
IF(INZM.LT.4) GC TC 60 00000750
00000760
DO 63 K=1,KM 00000770
READ(I) XM4 00000780
DO 62 LL=1,LLM 00000790
READ(I) A4(1,K,LL),A4(2,K,LL),A4(3,K,LL),A4(4,K,LL),A4(5,K,LL) 00000800
CONTINUE 00000810
CONTINUE 00000820
IF(INZM.LT.5) GC TC 60 00000830
00000840
DO 65 K=1,KM 00000850
READ(I) XM5 00000860
DO 64 LL=1,LLM 00000870
READ(I) A5(1,K,LL),A5(2,K,LL),A5(3,K,LL),A5(4,K,LL),A5(5,K,LL) 00000880
CONTINUE 00000890
CONTINUE 00000900
00000910
00000920
00000930
00000940
00000950
00000960
00000970
WRITE(6,70) XM1,XM2,XM3,XM4,XM5 00000980
FORMAT(1H0,5(E12.0,5X)) 00000990
00001000
DO 55 I=1,N1 00001010
IF(INREG(I).EQ.1) M(I) = XM1*DX(I) 00001020
IF(INREG(I).EQ.1) GO TO(10,11),11 00001030
IF(INREG(I).EQ.2) M(I) = XM2*DX(I) 00001040
IF(INREG(I).EQ.2) GO TO(15,16),12 00001050
IF(INREG(I).EQ.3) M(I) = XM3*DX(I) 00001060
IF(INREG(I).EQ.3) GC TC(20,21),13 00001070
IF(INREG(I).EQ.4) M(I) = XM4*DX(I) 00001080
IF(INREG(I).EQ.4) GO TO(25,26),14 00001090
IF(INREG(I).EQ.5) M(I) = XM5*DX(I) 00001100
IF(INREG(I).EQ.5) GC TC(30,31),15 00001110
00001120
00001130
00001140
00001150
00001160
00001170
00001180
00001190
00001200
00001210
00001220
00001230
00001240
00001250
00001260

```

```

CJ 16 K=1,KM
CJ 17 J=1,JM
S1(I,J,K,LL) = A2(I,J,K,LL)
S2(I,J,K,LL) = A2(I,J,K,LL)
17 CONTINUE
18 CONTINUE
19 CONTINUE
CJ TC 25
C
20 WRITE(6,37) ((I A3(J,K,LL),J=1,JM),K=1,KM),LL=1,LLM)
13 = 2
21 CQ 24 LL=1,LLM
CQ 23 K=1,KM
CQ 22 J=1,JM
S1(I,J,K,LL) = A3(I,J,K,LL)
S2(I,J,K,LL) = A3(I,J,K,LL)
22 CONTINUE
23 CONTINUE
24 CONTINUE
CQ TC 35
C
25 WRITE(6,37) ((I A4(J,K,LL),J=1,JM),K=1,KM),LL=1,LLM)
14 = 2
26 CQ 25 LL=1,LLM
CQ 28 K=1,KM
CQ 27 J=1,JM
S1(I,J,K,LL) = A4(I,J,K,LL)
S2(I,J,K,LL) = A4(I,J,K,LL)
27 CONTINUE
28 CONTINUE
29 CONTINUE
CQ TC 35
C
30 WRITE(6,37) ((I A5(J,K,LL),J=1,JM),K=1,KM),LL=1,LLM)
15 = 2
31 CQ 34 LL=1,LLM
CQ 33 K=1,KM
CQ 32 J=1,JM
S1(I,J,K,LL) = A5(I,J,K,LL)
S2(I,J,K,LL) = A5(I,J,K,LL)
32 CONTINUE
33 CONTINUE
34 CONTINUE
35 CONTINUE
C
M1 = 0.0
CQ 36 I=1,N1
M1 = M1 + M(I)
36 CONTINUE
WRITE(6,27) (M(I),I=1,N1)
37 FORMAT(1H0,5(E12.6,5X)/(1H0,5(E12.6,5X)))
WRITE(6,28)
38 FORMAT(1H1,/,4CX,'*****
***//,45X,'S A I D A C O S R E S U L T A D O S'//,40X,'*****
*****')
C
IAM = KM - 1
IF(KM.EQ.1) IKM = 1
IC2 = C
CQ 39 LL=1,LLM
CQ 240 K=1,KM,IAM
CQ 260 J = 1,JM
CQ 100 I=1,N1

```

```

J0001270
J0001280
J0001290
J0001300
J0001310
J0001320
00001330
J0001340
00001350
J0001360
00001370
J0001380
J0001390
00001400
00001410
J0001420
00001430
00001440
00001450
00001460
00001470
J0001480
J0001490
J0001500
00001510
J0001520
00001530
00001540
00001550
00001560
00001570
00001580
00001590
J0001600
00001610
00001620
J0001630
00001640
00001650
00001660
J0001670
00001680
00001690
00001700
J0001710
00001720
J0001730
00001740
00001750
J0001760
00001770
J0001780
00001790
00001800
00001810
00001820
J0001830
00001840
J0001850
J0001860
00001870
00001880
J0001890

```

```

IF(J.EQ.1) GO TO 130
IF(J.EQ.2) GO TO 140
IF(J.EQ.3) GO TO 150
IF(J.EQ.4) GO TO 160
IF(J.EQ.5) GO TO 170

C
130 G(I) = S2(I,J,K,LL)
GO TO 12C
140 SIGA(I) = S2(I,J,K,LL)
GO TO 18C
150 SIGF(I) = S2(I,J,K,LL)
GO TO 18C
160 NISIGF(I) = S2(I,J,K,LL)
GO TO 18C
170 ERF(I) = S2(I,J,K,LL)
C
180 CONTINUE
C
IF(J.LT.JM) GO TO 28C
IC2 = IC2 + 1
BOR1 = BORU(I)
BOR2 = BORU(KM)
C
IF(IC1.EQ.1) GO TO 187
IF(IC1.EQ.0) CALL NUD3
GO TO 18E
187 IF(IC1.EQ.1) CALL NUD3
C
188 IF(KM.EQ.1) GO TO 189
IF(MGC1(IC2,Z).NE.0) GO TO 280
C
189 DO 200 I=1,N
IF(ILL.GT.1) GO TO 190
B(I,LL) = P(I)*MT*DB(ILL)/(PT*M(I))
GO TO 200
190 B(I,LL) = B(I,LL-1) + P(I)*MT*CB(ILL)/(PT*M(I))
200 CONTINUE
IF(BCRCC.LT.0.) GO TO 251
C
CU 250 IK=1,KM
CU 240 IJ=1,JM
CU 230 I =1,N
CU 220 IL=2,LLM
C
IF(B(I,LL) - BB(IL)) 21C,210,220
210 S2(I,IJ,IK,LL+1) = (B(I,LL) - BB(IL-1))*(S1(I,IJ,IK,IL) - S1(I,IJ,
*IK,IL-1))/(B(I,LL) - BB(IL-1)) + S1(I,IJ,IK,IL-1)
GO TO 230
220 CONTINUE
230 CONTINUE
240 CONTINUE
250 CONTINUE
GO TO 254
251 WRITE(6,252)LL,CB(ILL)
252 FORMAT(1H ,///,5X,'*****
*****//1X,'INTERVALO DE QUERIMA NUMEROS = '13,5X,'QUERIMA TOTAL
*ACUMULADA = 'E12.0,5X,'SISTEMA SUBCRITICO'//,5X,'*****
*****')
WRITE(6,253) PT,LAMB,BORCL
253 FORMAT(1H ,///,15X,'POENCIA TOTAL DO SISTEMA = 'E12.0

```

```

00001900
00001910
00001920
00001930
00001940
00001950
00001960
00001970
00001980
00001990
00002000
00002010
00002020
00002030
00002040
00002050
00002060
00002070
00002080
00002090
00002100
00002110
00002120
00002130
00002140
00002150
00002160
00002170
00002180
00002190
00002200
00002210
00002220
00002230
00002240
00002250
00002260
00002270
00002280
00002290
00002300
00002310
00002320
00002330
00002340
00002350
00002360
00002370
00002380
00002390
00002400
00002410
00002420
00002430
00002440
00002450
00002460
00002470
00002480
00002490
00002500
00002510
00002520

```

```

*,///,15X,'FATOR DE MULTIPLICACAO EFETIVO DO SISTEMA = '          00002530
*E12.0,///,15X,'CONCENTRACAO CRITICA DE BORO = 'E12.0)          00002540
  STOP                                                                00002550
254  IFILAME.LT.0.999) GO TO 261                                     00002560
    WRITE(6,260) LL,BB(1LL),PT,LAMB,BCRCL                          00002570
260  FORMAT(1H ,///,5X,'*****')                                  00002580
    *****                                                         00002590
    *****//18X,'INTERVALO DE QUEIMA NUMERO = '13,5X,'QUEIMA TOTAL 00002600
    * ACUMULADA = 'E12.0,5X,'SISTEMA CRITICO'//5X,'*****'          00002610
    *****                                                         00002620
    *****//15X,'POTENCIA TOTAL DO SISTEMA = '00002630
    *TEMA = 'E12.0//15X,'FATOR DE MULTIPLICACAO EFETIVO DO SISTEMA = '00002640
    *E12.0//15X,'CONCENTRACAO CRITICA DE BORO = 'E12.0)          00002650
    GO TO 263
261  WRITE(6,262) LL,BB(1LL),PT,LAMB,BCRCL                          00002660
262  FORMAT(1H ,///,5X,'*****')                                  00002670
    *****                                                         00002680
    *****//18X,'INTERVALO DE QUEIMA NUMERO = '13,5X,'QUEIMA TOTAL 00002700
    * ACUMULADA = 'E12.0,5X,'SISTEMA SUPERCRITICO'//5X,'*****'    00002710
    *****                                                         00002720
    *****//15X,'POTENCIA TOTAL DO SISTEMA = 'E12.0//15X,'FATOR DE MULTIPLICACAO EFETIVO DO SIST 00002730
    *TEMA = 'E12.0//15X,'CONCENTRACAO DE BORO = 'E12.0)          00002740
    *E12.0//15X,'CONCENTRACAO DE BORO = 'E12.0)                  00002750
263  WRITE(6,270)      (I,P(1),PH(1),P1(1),F1(1),F1M(1),F11(1)), 00002760
    *B(1,LL),I=1,N)                                               00002770
270  FORMAT(1H ,///,1'      NREGIAU          PUT TOTAL          POT MEDIA          00002780
    = POT NORMALIZ          FLUXO TCTAL          FLUXO MEDIO          FLUXO NORMALIZ          00002790
    *      QUEIMA'//,15X,13,10X,E12.0,4X,E12.0,4X,E12.0,4X,E12.0,4X, 00002800
    *E12.0,4X,E12.0,4X,E12.0)                                  00002810
    00002820
    00002830
280  CONTINUE                                                    00002840
290  CONTINUE                                                    00002850
300  CONTINUE                                                    00002860
    00002870
    00002880
    STOP                                                         00002890
    END                                                         00002900
    00002910
    00002920
    SUBROUTINE NED3                                             00002930
    00002940
    00002950
    SUBROUTINA PARA CALCULO DE DISTRIBUICOES DE FLUXO DE NEUTRONS E 00002960
    POTENCIA, EM UM GRUPO DE ENERGIA E EM UMA DIMENSAO, UTILIZANDO O 00002970
    METODO REGAL ABSORCAC-PRODUCAC COM 3 NUCOS ACOPLAOS          00002980
    00002990
    00003000
    IMPLICIT REAL*8(A-H,C-Z)                                     00003010
    REAL*8 L,LAMB,LANO1,LANO2,KEF,KEFF,NISIGF,NISGF1,NISGF2       00003020
    COMMON N,IC1,IC2,LL,LLM,KH                                  00003030
    COMMON BORO(5),BCRCL,BOR1,BOR2,LAMB,EP51,EP52,EP53          00003040
    COMMON F1(30),F11(30),F1M(30),FIT,P(30),P1(30),PH(30),PT, 00003050
    *S(32,5,5,15)
    COMMON UX(32),D(32),SIGA(32),SIGF(32),NISIGF(32),ERF(32)    00003060
    DIMENSION N(30,30),C(30,30),QS(130),FLUX(30),FLUXO(30),    00003070
    *TEST(30),DOUR(5)
    DIMENSION U(132),E2(32),SIGA1(32),SIGA2(32),SIGF1(32),SIGF2(32), 00003080
    *NISGF1(32),NISGF2(32),ERF1(32),ERF2(32),ALB(32),L(32),    00003090
    *SM(32),LMI(32)
    DATA N/500*0./,C/500*0./,FLUX/30*1./,FLUXO/30*1./,KEF/1./,KEFF/1./,00003100
    N1 = N + 2
    IF(KM.EQ.1) GO TO 103
    IF(MC(1C2,2).EQ.0) GO TO 101
    00003110
    00003120
    00003130
    00003140
    00003150
  
```

```

I1 = 0
J1 = 0
K1 = 0
C
DO 100 I=1,N1
D1(I) = D(I)
SIGA1(I) = SIGA(I)
SIGF1(I) = SIGF(I)
NISGF1(I) = NISIGF(I)
ERF1(I) = ERF(I)
100 CONTINUE
GO TO 103
101 DO 102 I=1,N1
D2(I) = D(I)
SIGA2(I) = SIGA(I)
SIGF2(I) = SIGF(I)
NISGF2(I) = NISIGF(I)
ERF2(I) = ERF(I)
102 CONTINUE
103 DO 104 I=1,N1
L(I) = DSQRT(D(I)/SIGA(I))
SH(I) = [SINH(CX(I))/L(I)]
CH(I) = [COSH(CX(I))/L(I)]
ALB(I) = (L(I)*SH(I) - 2.*D(I)*CH(I))/(L(I)*SH(I) + 2.*D(I)*CH(I))
104 CONTINUE
C
CALCULO DOS COEFICIENTES W(I,J) E C(I,J) DE ACOPLAMENTO MODAIS
C
COEFICIENTES W(I,J) E C(I,J). PARA C NODO I = 1
C
100 B1 = (1. - ALB(N+1))/(2. + 2.*ALB(N+1))
B2 = -(1. - ALB(2))/(2. + 2.*ALB(2))
ALFA1 = B1*L(1)/C(1)
ALFA2 = ALFA1/SIGA(1)
ALFA3 = (B2*CH(1) - C(1)*SH(1)/L(1))/(D(1)*CH(1)/L(1) - B2*SH(1))
ALFA4 = B2/(SIGA(1)*(D(1)*CH(1)/L(1) - B2*SH(1)))
A1 = (ALFA4 - ALFA2)/(ALFA1 - ALFA3)
A2 = (ALFA1*A1 + ALFA2)
C
W(1,1) = SIGA(1)*L(1)*(A1*SH(1) + A2*(CH(1) - 1.))/DX(1) + 1
W(1,2) = D(1)*DABS(A1*SH(1) + A2*CH(1))/(L(1)*CX(1))
C
C(1,1) = NISIGF(1)*W(1,1)/SIGA(1)
C(1,2) = NISIGF(1)*W(1,2)/SIGA(2)
C
CS(1) = 1./(W(1,1) + W(1,2))
C
COEFICIENTES W(I,J) E C(I,J) PARA OS NODOS I = 2 ATE I = N-1
C
N2 = N - 1
DO 107 I = 2,N2
B1 = (1. - ALB(I-1))/(2. + 2.*ALB(I-1))
B2 = -(1. - ALB(I+1))/(2. + 2.*ALB(I+1))
ALFA1 = B1*L(I)/C(I)
ALFA2 = ALFA1/SIGA(I)
ALFA3 = (B2*CH(I) - D(I)*SH(I)/L(I))/(D(I)*CH(I)/L(I) - B2*SH(I))
ALFA4 = B2/(SIGA(I)*(D(I)*CH(I)/L(I) - B2*SH(I)))
A1 = (ALFA4 - ALFA2)/(ALFA1 - ALFA3)
A2 = ALFA1*A1 + ALFA2
C
W(I,I-1) = D(I)*DABS(A2)/(L(I)*DX(I))
W(I,I) = SIGA(I)*L(I)*(A1*SH(I) + A2*(CH(I) - 1.))/DX(I) + 1.
W(I,I+1) = D(I)*DABS(A1*SH(I) + A2*CH(I))/(L(I)*DX(I))

```

```

0000160
0000170
0000180
0000190
0000200
0000210
0000220
0000230
0000240
0000250
0000260
0000270
0000280
0000290
0000300
0000310
0000320
0000330
0000340
0000350
0000360
0000370
0000380
0000390
0000400
0000410
0000420
0000430
0000440
0000450
0000460
0000470
0000480
0000490
0000500
0000510
0000520
0000530
0000540
0000550
0000560
0000570
0000580
0000590
0000600
0000610
0000620
0000630
0000640
0000650
0000660
0000670
0000680
0000690
0000700
0000710
0000720
0000730
0000740
0000750
0000760
0000770
0000780

```

```

C
C(1,1-1) = NISIGF(1)*w(1,1-1)/SIGA(1-1)
C(1,1) = NISIGF(1)*w(1,1)/SIGA(1)
C(1,1+1) = NISIGF(1)*w(1,1+1)/SIGA(1+1)
C
C(1,1) = 1./(w(1,1-1) + w(1,1) + w(1,1+1))
107 CONTINUE
C COEFICIENTES w(I,J) E C(I,J) PARA O NUDO I = N
C
b1 = (1. - ALB(N-1))/(2. + 2.*ALB(N-1))
b2 = -(1. - ALB(N+2))/(2. + 2.*ALB(N+2))
ALFA1 = b1*L(N)/D(N)
ALFA2 = ALFA1/SIGA(N)
ALFA3 = (B2*CH(N) - D(N)*SH(N)/L(N))/(D(N)*CH(N)/L(N) - b2*SH(N))
ALFA4 = B2/(SIGA(N)*(D(N)*CH(N)/L(N) - b2*SH(N)))
A1 = (ALFA4 - ALFA2)/(ALFA1 - ALFA3)
A2 = ALFA1*A1 + ALFA2
C
w(N,N-1) = D(N)*CABS(A2)/(L(N)*DX(N))
w(N,N) = SIGA(N)*L(N)*(A1*SH(N) + A2*(CH(N) - 1.))/DX(N) + 1.
C
C(N,N-1) = NISIGF(N)*w(N,N-1)/SIGA(N-1)
C(N,N) = NISIGF(N)*w(N,N)/SIGA(N)
C
C(N,N) = 1./(w(N,N-1) + w(N,N))
C
DETERMINACAO DAS DISTRIBUICOES DE FLUXO DE NEUTRONS E POTENCIA
METODO ITERATIVO DE GAUSS-SIEDEL
C
OBSERVACAO - FLUXC(I) NORMALIZADO = 1.
C
ITER = 0
108 ITER = ITER + 1
C
IF(MOD(ITER,2).EQ.0) GO TO 115
C
FLUXC(1) = (C(1,1)*FLUXO(1) + C(2,1)*FLUXO(2))/KEFF
C
DO 109 I=2,N2
FLUXC(I) = (C(I-1,I)*FLUXO(I-1) + L(I,I)*FLUXO(I) + C(I+1,I)*
+FLUXO(I+1))/KEFF
109 CONTINUE
FLUXC(N) = (C(N-1,N)*FLUXC(N-1) + C(N,N)*FLUXO(N))/KEFF
C
GO TO 118
C
115 FLUXC(N) = (C(N-1,N)*FLUXC(N-1) + C(N,N)*FLUXO(N))/KEFF
N3 = N - 2
DO 117 I = 1,N3
FLUXC(N-1) = (C(N-1-1,N-1)*FLUXO(N-1-1) + C(N-1,N-1)*FLUXO(N-1) +
+C(N-1+1,N-1)*FLUXC(N-1+1))/KEFF
117 CONTINUE
C
FLUXC(1) = (C(1,1)*FLUXO(1) + C(2,1)*FLUXC(2))/KEFF
C
118 CONTINUE
FLUXCT = C.
DO 119 I = 1,N
FLUXCT = FLUXCT + FLUXC(I)
119 CONTINUE
C
DO 114 I = 1,N
FLUXC(I) = FLUXC(I)/FLUXCT

```

```

0603179C
0003600
0003610
0003620
0003630
0003640
0003650
0003660
0003670
0003680
0003690
0003900
0003910
0003920
0003930
0003940
0003950
0003960
0003970
0003980
0003990
0004000
0004010
0004020
0004030
0004040
0004050
0004060
0004070
0004080
0004090
0004100
0004110
0004120
0004130
0004140
0004150
0004160
0004170
0004180
0004190
0004200
0004210
0004220
0004230
0004240
0004250
0004260
0004270
0004280
0004290
0004300
0004310
0004320
0004330
0004340
0004350
0004360
0004370
0004380
0004390
0004400
0004410

```



```

IF (BCN3.LT.BCNG(10)) GO TO 127
GO TO 131
127 DO 128 I=1,N1
C(I) = S2(I,1,10-1,LL)
SIGA(I) = S2(I,2,10-1,LL)
SIGF(I) = S2(I,3,10-1,LL)
NISIGF(I) = S2(I,4,10-1,LL)
ERF(I) = S2(I,5,10-1,LL)
C1(I) = C(I)
SIGA1(I) = SIGA(I)
SIGF1(I) = SIGF(I)
NISIGF1(I) = NISIGF(I)
ERF1(I) = ERF(I)
128 CONTINUE
BCK1 = BCRC(10-1)
J1 = 1
K1 = 1
GO TO 103
129 DO 130 I=1,N1
U(I) = S2(I,1,10,LL)
SIGA(I) = S2(I,2,10,LL)
SIGF(I) = S2(I,3,10,LL)
NISIGF(I) = S2(I,4,10,LL)
ERF(I) = S2(I,5,10,LL)
U2(I) = U(I)
SIGA2(I) = SIGA(I)
SIGF2(I) = SIGF(I)
NISIGF2(I) = NISIGF(I)
ERF2(I) = ERF(I)
130 CONTINUE
BCK2 = BCRC(10)
J1 = 2
GO TO 103
131 DO 132 I=1,N1
U(I) = S2(I,1,10,LL)
SIGA(I) = S2(I,2,10,LL)
SIGF(I) = S2(I,3,10,LL)
NISIGF(I) = S2(I,4,10,LL)
ERF(I) = S2(I,5,10,LL)
C1(I) = C(I)
SIGA1(I) = SIGA(I)
SIGF1(I) = SIGF(I)
NISIGF1(I) = NISIGF(I)
ERF1(I) = ERF(I)
132 CONTINUE
BCK1 = BCRC(10)
J1 = 1
K1 = 2
GO TO 103
133 DO 134 I=1,N1
U(I) = S2(I,1,10+1,LL)
SIGA(I) = S2(I,2,10+1,LL)
SIGF(I) = S2(I,3,10+1,LL)
NISIGF(I) = S2(I,4,10+1,LL)
ERF(I) = S2(I,5,10+1,LL)
U2(I) = U(I)
SIGA2(I) = SIGA(I)
SIGF2(I) = SIGF(I)
NISIGF2(I) = NISIGF(I)
ERF2(I) = ERF(I)
134 CONTINUE
BCK2 = BCRC(10+1)
J1 = 2

```

```

00005050
00005060
00005070
00005080
00005090
00005100
00005110
00005120
00005130
00005140
00005150
00005160
00005170
00005180
00005190
00005200
00005210
00005220
00005230
00005240
00005250
00005260
00005270
00005280
00005290
00005300
00005310
00005320
00005330
00005340
00005350
00005360
00005370
00005380
00005390
00005400
00005410
00005420
00005430
00005440
00005450
00005460
00005470
00005480
00005490
00005500
00005510
00005520
00005530
00005540
00005550
00005560
00005570
00005580
00005590
00005600
00005610
00005620
00005630
00005640
00005650
00005660
00005670

```

	GO TC 103	00005080
155	DO 130 I=1,N1	00005090
	C(I) = S2(I,1,KM-1,LL)	00005100
	SIGA(I) = S2(I,2,KM-1,LL)	00005110
	SIGF(I) = S2(I,3,KM-1,LL)	00005120
	NISIGF(I) = S2(I,4,KM-1,LL)	00005130
	ERF(I) = S2(I,5,KM-1,LL)	00005140
	D(I) = C(I)	00005150
	SIGA1(I) = SIGA(I)	00005160
	SIGF1(I) = SIGF(I)	00005170
	NISIGF1(I) = NISIGF(I)	00005180
	ERF1(I) = ERF(I)	00005190
156	CONTINUE	00005200
	DOR1 = 0CRG(KM-1)	00005210
	J1 = 1	00005220
	N1 = 3	00005230
	GO TC 103	00005240
157	DO 130 I=1,N1	00005250
	D(I) = S2(I,1,KM,LL)	00005260
	SIGA(I) = S2(I,2,KM,LL)	00005270
	SIGF(I) = S2(I,3,KM,LL)	00005280
	NISIGF(I) = S2(I,4,KM,LL)	00005290
	ERF(I) = S2(I,5,KM,LL)	00005300
	D2(I) = C(I)	00005310
	SIGA2(I) = SIGA(I)	00005320
	SIGF2(I) = SIGF(I)	00005330
	NISIGF2(I) = NISIGF(I)	00005340
	ERF2(I) = ERF(I)	00005350
158	CONTINUE	00005360
	DOR2 = 0DOR(KM)	00005370
	J1 = 2	00005380
	GO TC 103	00005390
200	DO 201 I=1,N1	00005400
	C(I) = S2(I,1,1,LL)	00005410
	SIGA(I) = S2(I,2,1,LL)	00005420
	SIGF(I) = S2(I,3,1,LL)	00005430
	NISIGF(I) = S2(I,4,1,LL)	00005440
	ERF(I) = S2(I,5,1,LL)	00005450
	D(I) = C(I)	00005460
	SIGA1(I) = SIGA(I)	00005470
	SIGF1(I) = SIGF(I)	00005480
	NISIGF1(I) = NISIGF(I)	00005490
	ERF1(I) = ERF(I)	00005500
201	CONTINUE	00005510
	DUM1 = 0GR0(I)	00005520
	J1 = 1	00005530
	N1 = 4	00005540
	GO TC 103	00005550
202	DO 203 I=1,N1	00005560
	C(I) = S2(I,1,2,LL)	00005570
	SIGA(I) = S2(I,2,2,LL)	00005580
	SIGF(I) = S2(I,3,2,LL)	00005590
	NISIGF(I) = S2(I,4,2,LL)	00005600
	ERF(I) = S2(I,5,2,LL)	00005610
	D2(I) = C(I)	00005620
	SIGA2(I) = SIGA(I)	00005630
	SIGF2(I) = SIGF(I)	00005640
	NISIGF2(I) = NISIGF(I)	00005650
	ERF2(I) = ERF(I)	00005660
203	CONTINUE	00005670
	DOR2 = 0CRG(2)	00005680
	J1 = 2	00005690
	GO TC 103	00005700

```

C
C      INTERPOLACAO DAS CONSTANTES COM A CONCENTRACAO DE BORGU-10 CRITICA
C
137  I1 = 3
      XBRK = (BOR3 - BCR1)/(BOR2 - BCR1)
      DO 140 I=1,N1
      D(I) = XBRK*(DZ(I) - D1(I)) + D1(I)
      SIGA(I) = XBRK*(SIGAZ(I) - SIGA1(I)) + SIGA1(I)
      SIGF(I) = XBRK*(SIGFZ(I) - SIGF1(I)) + SIGF1(I)
      NISIGF(I) = XBRK*(NISIGFZ(I) - NISIGF1(I)) + NISIGF1(I)
      ERFF(I) = XBRK*(ERFZ(I) - ERF1(I)) + ERF1(I)

      D1(I) = DZ(I)
      SIGA1(I) = SIGAZ(I)
      SIGF1(I) = SIGFZ(I)
      NISIGF1(I) = NISIGFZ(I)
      ERF1(I) = ERFZ(I)

      DZ(I) = D(I)
      SIGAZ(I) = SIGA(I)
      SIGFZ(I) = SIGF(I)
      NISIGFZ(I) = NISIGF(I)
      ERFZ(I) = ERF(I)
140  CONTINUE

      LAMB1 = LAMB2
      BCR1 = BCR2
      BOR2 = BOR3
      GC TC 103

C
141  LAMB = LAMB2
      BORG = BCR3
150  FIT = 0.
      PT1 = 0.
      DO 142 I=1,N
      P(I) = ERF(I)*SIGF(I)*F1(I)
      P11 = P11 + P(I)
142  CONTINUE
      DO 143 I=1,N
      P1(I) = P(I)/PT1
      P11 = PT1*P1(I)
      PH(I) = P1(I)/DX(I)
      F1(I) = P1(I)/(ERF(I)*SIGF(I))
      F1M(I) = F1(I)/DX(I)
      FIT = FIT + F1(I)
143  CONTINUE
      IF (KX.EC.1.AND.LLM.EQ.1) GO TO 146
      IF (KX.NE.1.AND.LLM.EC.1) GO TO 151

C
145  RETURN
151  WRITE(6,152)
152  FORMAT(1H, '//////,15X, '***** PRBLEMA ESTATICO COM PESQUISA
      *DE CONCENTRACAO CRITICA DE BORG *****')
      WRITE(6,153) PT,KEFF,BORG
153  FORMAT(1H, '//////,15X, 'POTENCIA TOTAL DO SISTEMA(1H/CM2):
      *P = 'E12.0//,15X, 'FATCH DE MULTIPLICACAO EFETIVO DO SISTEMA: KEF00000000
      * = 'E12.0//,15X, 'CONCENTRACAO CRITICA DE BORG(PPM): CB = 00000070
      * 'E12.0)
      GO TO 154
146  WRITE(6,147)
147  FORMAT(1H, '//////,15X, '***** P R C O L E M A   E S T A T I C O
      * *****')
      WRITE(6,148) PT,KEFF,BCR1(I)

```



```

C      CALCULO DES COEFICIENTES W(I,J) E C(I,J) DE ACOPLAMENTO NUJALS      00007570
C
C      COEFICIENTES W(I,J) E C(I,J) PARA O NUDO I=1      00007580
C
C      00007590
C      00007600
100  D1 = (1. - ALB(N+1))/(2. + 2.*ALB(N+1))      00007610
      D2 = -(1. - ALB(3))/(2. + 2.*ALB(3))      00007620
      ALFA1 = CH(1) + B1*L(1)*SH(1)/D(1)      00007630
      ALFA2 = -(D1*L(1)*SH(1)/D(1) + 1.)/SIGA(1)      00007640
      ALFA3 = C(1)*SH(1)/L(1) + C1*CH(1)      00007650
      ALFA4 = -(D(2)/L(2))*(D2*CH(2) - C(2)*SH(2)/L(2))/(C(2)*CH(2)/L(2)      00007660
      *-D2*SH(2))
      ALFA5 = -B1*CH(1)/SIGA(1)      00007680
      ALFA6 = B1*L(1)/C(1)      00007690
      ALFA7 = (B1*L(1))/(D(1)*SIGA(1))      00007700
      ALFA8 = -(L(2)/C(2))*ALFA4      00007710
C
C      00007720
      A1 = (ALFA2*ALFA4 + ALFA5)/(ALFA1*ALFA4 + ALFA5)      00007730
      A2 = ALFA2*A1 + ALFA7      00007740
      A3 = ALFA1*A1 - ALFA2      00007750
      A4 = ALFA6*A3      00007760
C
C      00007770
      W(1,1) = SIGA(1)*L(1)*(A1*SH(1) + A2*(CH(1) - 1.))/DX(1) + 1.      00007780
      W(1,2) = SIGA(2)*L(2)*(A3*SH(2) + A4*(CH(2) - 1.))/DX(1)      00007790
      W(1,3) = C(2)*CABS(A3)*SH(2) + A4*CH(2)/(L(2)*DX(1))      00007800
C
C      00007810
      C(1,1) = N1SIGF(1)*W(1,1)/SIGA(1)      00007820
      C(1,2) = N1SIGF(1)*W(1,2)/SIGA(2)      00007830
      C(1,3) = N1SIGF(1)*W(1,3)/SIGA(3)      00007840
C
C      00007850
      WS(1) = 1./(W(1,1) + W(1,2) + W(1,3))      00007860
C
C      00007870
C      COEFICIENTES W(I,J) E C(I,J) PARA O NUDO I=2      00007880
C
C      00007890
C      00007900
C      00007910
C      00007920
C      00007930
C      00007940
C      00007950
C      00007960
C      00007970
C      00007980
C      00007990
C      00080000
      D1 = (1. - ALB(N+1))/(2. + 2.*ALB(N+1))      00080010
      D2 = -(1. - ALB(4))/(2. + 2.*ALB(4))      00080020
      ALFA1 = CH(1) + B1*L(1)*SH(1)/D(1)      00080030
      ALFA2 = 1./SIGA(2)      00080040
      ALFA3 = D(1)*SH(1)/L(1) + B1*CH(1)      00080050
      ALFA4 = -C(2)/L(2)      00080060
      ALFA5 = CH(2)      00080070
      ALFA6 = SH(2)      00080080
      ALFA7 = -ALFA2      00080090
      ALFA8 = (D(2)/L(2))*SH(2)      00080100
      ALFA9 = (D(2)/L(2))*CH(2)      00080110
      ALFA10 = -(D(3)/L(3))*(D2*CH(3) - C(3)*SH(3)/L(3))/(C(3)*CH(3)/L(3)      00080120
      *-D2*SH(3))
      ALFA11 = B1*L(1)/C(1)      00080130
      ALFA12 = -L(3)*ALFA10/D(3)      00080140
C
C      00080150
      A3 = (ALFA2*ALFA3*(ALFA6*ALFA10 + ALFA9) + ALFA1*ALFA4*ALFA7*      00080160
      *ALFA10)/(ALFA1*ALFA4*(ALFA5*ALFA10 + ALFA8) - ALFA3*(ALFA6*      00080170
      *ALFA10 + ALFA9))
      A1 = (A3 + ALFA2)/ALFA1      00080180
      A2 = ALFA11*A1      00080190
      A4 = -ALFA3*A1/ALFA4      00080200
      A5 = ALFA5*A3 + ALFA6*A4 - ALFA7      00080210
      A6 = ALFA12*A5      00080220
C
C      00080230
      W(2,1) = SIGA(1)*L(1)*(A1*SH(1) + A2*(CH(1) - 1.))/DX(2)      00080240
      W(2,2) = SIGA(2)*L(2)*(A3*SH(2) + A4*(CH(2) - 1.))/DX(2) + 1.      00080250
      W(2,3) = SIGA(3)*L(3)*(A5*SH(3) + A6*(CH(3) - 1.))/DX(2)      00080260
      W(2,4) = D(3)*CABS(A5)*SH(3) + A6*CH(3)/(L(3)*DX(2))      00080270
C
C      00080280

```

$C(2,1) = NISIGF(2)*w(2,1)/SIGA(1)$   
 $C(2,2) = NISIGF(2)*w(2,2)/SIGA(2)$   
 $C(2,3) = NISIGF(2)*w(2,3)/SIGA(3)$   
 $C(2,4) = NISIGF(2)*w(2,4)/SIGA(4)$

$USI(2) = 1./(w(2,1) + w(2,2) + w(2,3) + w(2,4))$

COEFICIENTES  $w(I,J)$  E  $C(I,J)$  PARA AS REGIOES I=3 ATE I=N-2

IF(N.EQ.4) GC TC 119

N2 = N - 2

CG 107 I=3,N2

$b1 = 1. - ALB(I-2)/(2. + 2*ALB(I-2))$

$b2 = -(1. - ALB(I+2))/(2. + 2*ALB(I+2))$

$ALFA1 = CH(I-1) + b1*L(I-1)*SH(I-1)/C(I-1)$

$ALFA2 = 1./SIGA(I)$

$ALFA3 = C(I-1)*SH(I-1)/L(I-1) + b1*CH(I-1)$

$ALFA4 = -D(I)/L(I)$

$ALFA5 = CH(I)$

$ALFA6 = SH(I)$

$ALFA7 = -ALFA2$

$ALFA8 = D(I)*SH(I)/L(I)$

$ALFA9 = D(I)*CH(I)/L(I)$

$ALFA10 = -(D(I+1)/L(I+1))*[b2*CH(I+1) - D(I+1)*SH(I+1)/L(I+1)] / [D(I+1)*CH(I+1)/L(I+1) - b2*SH(I+1)]$

$ALFA11 = b1*L(I-1)/D(I-1)$

$ALFA12 = -L(I+1)*ALFA10/C(I+1)$

$A3 = (ALFA2*ALFA3 + ALFA6*ALFA10 + ALFA5) + ALFA1*ALFA4 + ALFA7 +$   
 $+ ALFA10)/(ALFA1*ALFA4 + ALFA5 + ALFA6*ALFA10 + ALFA8 - ALFA3*(ALFA6*ALFA10$   
 $+ ALFA5))$

$A1 = (A3 + ALFA2)/ALFA1$

$A2 = ALFA11*A1$

$A4 = -ALFA3*A1/ALFA4$

$A5 = ALFA5*A3 + ALFA6*A4 - ALFA7$

$A6 = ALFA12*A5$

$w(I,I-2) = D(I-1)*CABS(A2)/(L(I-1)*DX(I))$

$w(I,I-1) = SIGA(I-1)*L(I-1)*(A1*SH(I-1) + A2*(CH(I-1) - 1.))/DX(I) + 1.$

$w(I,I) = SIGA(I)*L(I)*(A3*SH(I) + A4*(CH(I) - 1.))/DX(I) + 1.$

$w(I,I+1) = SIGA(I+1)*L(I+1)*(A5*SH(I+1) + A6*(CH(I+1) - 1.))/DX(I)$

$w(I,I+2) = D(I+1)*DABS(A5*SH(I+1) + A6*CH(I+1))/(L(I+1)*CX(I))$

$C(I,I-2) = NISIGF(I)*w(I,I-2)/SIGA(I-2)$

$C(I,I-1) = NISIGF(I)*w(I,I-1)/SIGA(I-1)$

$C(I,I) = NISIGF(I)*w(I,I)/SIGA(I)$

$C(I,I+1) = NISIGF(I)*w(I,I+1)/SIGA(I+1)$

$C(I,I+2) = NISIGF(I)*w(I,I+2)/SIGA(I+2)$

$USI(I) = 1./(w(I,I-2) + w(I,I-1) + w(I,I) + w(I,I+1) + w(I,I+2))$

CONTINUE

COEFICIENTES  $w(I,J)$  E  $C(I,J)$  PARA A REGIAO I=N-1

$b1 = 1. - ALB(N-3)/(2. + 2*ALB(N-3))$

$b2 = -(1. - ALB(N+2))/(2. + 2*ALB(N+2))$

$ALFA1 = CH(N-2) + b1*L(N-2)*SH(N-2)/C(N-2)$

$ALFA2 = 1./SIGA(N-1)$

$ALFA3 = D(N-2)*SH(N-2)/L(N-2) + b1*CH(N-2)$

$ALFA4 = -D(N-1)/L(N-1)$

$ALFA5 = CH(N-1)$

$ALFA6 = SH(N-1)$

$ALFA7 = -ALFA2$

$ALFA8 = C(N-1)*SH(N-1)/L(N-1)$

ALFA5 = D(N-1)\*CH(N-1)/L(N-1)  
 ALFA10 = -(D(N)/L(N))\*(b2\*CH(N) - D(N)\*SH(N)/L(N))/(D(N)\*CH(N)/  
 \*L(N) - b2\*SH(N))  
 ALFA11 = b1\*L(N-2)/D(N-2)  
 ALFA12 = -L(N)\*ALFA10/D(N)

J0000030  
 J0000040  
 J0000050  
 J0000060  
 J0000070  
 J0000080

A3 = (ALFA2\*ALFA3\*(ALFA0\*ALFA10 + ALFA5) + ALFA1\*ALFA4\*ALFA7\*  
 \*ALFA10)/(ALFA1\*ALFA4\*(ALFA2\*ALFA10 + ALFA0) - ALFA3\*(ALFA0\*ALFA10 +  
 \*ALFA5))  
 A1 = (A3 + ALFA2)/ALFA1  
 A2 = ALFA11\*A1  
 A4 = -ALFA3\*A1/ALFA4  
 A5 = ALFA5\*A3 + ALFA0\*A4 - ALFA7  
 A6 = ALFA12\*A5

J0000090  
 J0000100  
 J0000110  
 J0000120  
 J0000130  
 J0000140  
 J0000150

w(N-1,N-3) = D(N-2)\*CABS(A2)/(L(N-2)\*DX(N-1))  
 w(N-1,N-2) = SIGA(N-2)\*L(N-2)\*(A1\*SH(N-2) + A2\*(CH(N-2) - 1.))/  
 \*DX(N-1)  
 w(N-1,N-1) = SIGA(N-1)\*L(N-1)\*(A3\*SH(N-1) + A4\*(CH(N-1) - 1.))/  
 \*DX(N-1) + 1.  
 w(N-1,N ) = SIGA(N)\*L(N)\*(A5\*SH(N) + A6\*(CH(N) - 1.))/DX(N-1)

J0000160  
 J0000170  
 J0000180  
 J0000190  
 J0000200  
 J0000210  
 J0000220

C(N-1,N-3) = NISIGF(N-1)\*w(N-1,N-3)/SIGA(N-3)  
 C(N-1,N-2) = NISIGF(N-1)\*w(N-1,N-2)/SIGA(N-2)  
 C(N-1,N-1) = NISIGF(N-1)\*w(N-1,N-1)/SIGA(N-1)  
 C(N-1,N ) = NISIGF(N-1)\*w(N-1,N)/SIGA(N)

J0000230  
 J0000240  
 J0000250  
 J0000260  
 J0000270  
 J0000280

w(N-1) = 1./(w(N-1,N-3) + w(N-1,N-2) + w(N-1,N-1) + w(N-1,N))

J0000290  
 J0000300

COEFICIENTES W(I,J) E C(I,J) PARA CADA I=N

b1 = (1. - ALB(N-2))/L2. + z.\*ALD(N-2))  
 b2 = -(1. - ALB(N+2))/L2. + z.\*ALD(N+2))  
 ALFA1 = CH(N-1) + b1\*L(N-1)\*SH(N-1)/C(N-1)  
 ALFA2 = 1./SIGA(N)  
 ALFA3 = C(N-1)\*SH(N-1)/L(N-1) + b1\*CH(N-1)  
 ALFA4 = -(D(N)/L(N))\*(b2\*CH(N) - D(N)\*SH(N)/L(N))/(D(N)\*CH(N)/  
 \*L(N) - b2\*SH(N))  
 ALFA5 = b2\*L(N)/(D(N)\*CH(N)/L(N) - b2\*SH(N))  
 ALFA6 = b1\*L(N-1)/D(N-1)  
 ALFA7 = -L(N)\*ALFA4/D(N)  
 ALFA8 = (b2/SIGA(N))/(D(N)\*CH(N)/L(N) - b2\*SH(N))

J0000310  
 J0000320  
 J0000330  
 J0000340  
 J0000350  
 J0000360  
 J0000370  
 J0000380  
 J0000390  
 J0000400

A1 = (ALFA2\*ALFA4 + ALFA5)/(ALFA1\*ALFA4 + ALFA3)  
 A2 = ALFA6\*A1  
 A3 = ALFA1\*A1 - ALFA2  
 A4 = ALFA7\*A3 + ALFA8

J0000410  
 J0000420  
 J0000430  
 J0000440

w(N,N-2) = D(N-1)\*CABS(A2)/(L(N-1)\*DX(N))  
 w(N,N-1) = SIGA(N-1)\*L(N-1)\*(A1\*SH(N-1) + A2\*(CH(N-1) - 1.))/DX(N)  
 w(N,N ) = SIGA(N)\*L(N)\*(A3\*SH(N) + A4\*(CH(N) - 1.))/DX(N) + 1.

J0000450  
 J0000460  
 J0000470  
 J0000480

C(N,N-2) = NISIGF(N)\*w(N,N-2)/SIGA(N-2)  
 C(N,N-1) = NISIGF(N)\*w(N,N-1)/SIGA(N-1)  
 C(N,N ) = NISIGF(N)\*w(N,N)/SIGA(N)

J0000490  
 J0000500  
 J0000510  
 J0000520

w(N) = 1./(w(N,N-2) + w(N,N-1) + w(N,N))

J0000530  
 J0000540

DETERMINACION DE LAS DISTRIBUCIONES DE FLUJO DE NEUTRONES E POTENCIA  
 METODO ITERATIVO DE GALSS-SIEBEL

J0000550  
 J0000560  
 J0000570

CONSERVACION FLUJO(I) NORMALIZADO = 1.

J0000580  
 J0000590

```

ITER = 0
103 ITER = ITER + 1
C
IF (MC(ITER,2) .EQ. 0) GO TO 115
C
FLUXC(1) = (C(1,1)*FLUXQ(1) + C(2,1)*FLUXQ(2) + C(3,1)*FLUXQ(3))/
*KEFF
FLUXC(2) = (C(1,2)*FLUXQ(1) + C(2,2)*FLUXC(2) + C(3,2)*FLUXQ(3) +
*C(4,2)*FLUXC(4))/KEFF
C
IF (N .EQ. 4) GO TO 120
DO 115 I = 3, N2
FLUXQ(I) = (C(I-2,1)*FLUXQ(I-2) + C(I-1,1)*FLUXQ(I-1) + C(I,1)*
*FLUXC(I) + C(I+1,1)*FLUXC(I+1) + C(I+2,1)*FLUXQ(I+2))/KEFF
109 CONTINUE
C
120 FLUXC(N-1) = (C(N-3,N-1)*FLUXC(N-3) + C(N-2,N-1)*FLUXQ(N-2) +
*C(N-1,N-1)*FLUXQ(N-1) + C(N,N-1)*FLUXC(N))/KEFF
FLUXC(N) = (C(N-2,N)*FLUXC(N-2) + C(N-1,N)*FLUXQ(N-1) +
*C(N,N)*FLUXQ(N))/KEFF
GO TO 118
C
118 FLUXC(N) = (C(N-2,N)*FLUXQ(N-2) + C(N-1,N)*FLUXC(N-1) +
*C(N,N)*FLUXC(N))/KEFF
FLUXQ(N-1) = (C(N-3,N-1)*FLUXC(N-3) + C(N-2,N-1)*FLUXQ(N-2) +
*C(N-1,N-1)*FLUXQ(N-1) + C(N,N-1)*FLUXC(N))/KEFF
C
IF (N .EQ. 4) GO TO 121
N3 = N - 3
DO 117 I = 2, N3
FLUXQ(N-1) = (C(N-1-2,N-1)*FLUXQ(N-1-2) + C(N-1-1,N-1)*FLUXC(N-1-1) +
*) + C(N-1,N-1)*FLUXQ(N-1) + C(N-1+1,N-1)*FLUXQ(N-1+1) + C(N-1+2,
*N-1)*FLUXC(N-1+2))/KEFF
117 CONTINUE
C
121 FLUXQ(2) = (C(1,2)*FLUXQ(1) + C(2,2)*FLUXQ(2) + C(3,2)*FLUXQ(3) +
*C(4,2)*FLUXC(4))/KEFF
FLUXQ(1) = (C(1,1)*FLUXQ(1) + C(2,1)*FLUXC(2) + C(3,1)*FLUXQ(3))/
*KEFF
C
118 CONTINUE
C
FLUXCT = 0.
DO 116 I = 1, N
FLUXCT = FLUXCT + FLUXQ(I)
116 CONTINUE
DO 114 I = 1, N
FLUXC(I) = FLUXC(I)/FLUXCT
F(I,I) = FLUXQ(I)
114 CONTINUE
SUMA1 = C(1,1)*FLUXC(1) + C(2,1)*FLUXC(2) + C(3,1)*FLUXQ(3) +
*C(1,2)*FLUXQ(1) + C(2,2)*FLUXC(2) + C(3,2)*FLUXC(3) + C(4,2)*
*FLUXC(4) + C(N-3,N-1)*FLUXQ(N-3) + C(N-2,N-1)*FLUXQ(N-2) +
*C(N-1,N-1)*FLUXQ(N-1) + C(N,N-1)*FLUXC(N) + C(N-2,N)*FLUXQ(N-2) +
*C(N-1,N)*FLUXC(N-1) + C(N,N)*FLUXQ(N)
C
SUMA2 = 0.
IF (N .EQ. 4) GO TO 122
DO 110 I = 3, N2
SUMA2 = SUMA2 + C(I-2,1)*FLUXQ(I-2) + C(I-1,1)*FLUXQ(I-1) +
*C(I,1)*FLUXC(I) + C(I+1,1)*FLUXQ(I+1) + C(I+2,1)*FLUXQ(I+2)
110 CONTINUE
C

```

126 DO 111 I = 1,N  
 TEST(1) = LAMB((FLUXA(1) - FLXC(1)) / FLUXC(1))  
 FLUX(1) = FLXC(1)

127 CONTINUE

KEFF = SCPA1 + SCPA2  
 TEST1 = LAMB((KEFF - KEF) / KEFF)  
 KEF = KEFF

128 DO 112 I = 1,N  
 IF(1-TEST(1)-GT.EPS1) GO TO 105  
 CONTINUE  
 IF(1-TEST1-GT.EPS2) GO TO 106

IF(KP.EG.1.ANG.LLM.EG.1) GO TO 150  
 IF(KM.EG.1) LAMB = KEFF  
 IF(KM.EG.1) BURC = BOND(1)  
 IF(KM.EG.1) GO TO 150

INTERPCLACAG DA CONCENTRACAO DE BORO-10 PARA QUE O SISTEMA  
 TORNE-SE CRITICO

11 = 11 + 1  
 IF(MOD(11,2).NE.C) LAMB1 = KEFF  
 IF(MOD(11,2).EG.O) LAMB2 = KEFF  
 IF(MOD(11,2).NE.C) GO TO 145  
 IF(DABS(LAMB2 - 1.)-LT.EPS3) GO TO 141  
 IF(J1.EG.1.AND.K1.EG.1) GO TO 129  
 IF(J1.EG.1.AND.K1.EG.2) GO TO 133  
 IF(J1.EG.1.AND.K1.EG.3) GO TO 137  
 IF(J1.EG.1.AND.K1.EG.4) GO TO 202

BOR3 = ((1. - LAMB1) / (LAMB2 - LAMB1)) \* (BON2 - BGR1) + BGR1

IF(11.EG.2) GO TO 139  
 IF(J1.EG.2) GO TO 139  
 IF(BCR2-GT.BURD(KM)) GO TO 135  
 IF(BCR3-LT.O.) GO TO 200

129 DO 125 K=1,KM  
 BOR(K) = DABS(BURC(K) - BOR3)  
 CONTINUE

130 DO 140 K=2,KM  
 AX = CBUR(K)  
 DO 140 K=2,KM  
 IF(AX.LE.DBUR(K)) GO TO 126  
 AX = CBLR(K)  
 DO 140 K=2,KM  
 CONTINUE

IF(BCR3-LT.BCRG(1C)) GO TO 127  
 GO TO 131

127 DO 120 I=1,N1  
 D(I) = S2(I,1,1C-1,LL)  
 SIGA(I) = S2(I,2,1C-1,LL)  
 SIGF(I) = S2(I,3,1C-1,LL)  
 ABSIGF(I) = S2(I,4,1C-1,LL)  
 ENF(I) = S2(I,5,1C-1,LL)  
 O(I) = O(I)  
 SIGA1(I) = SIGA(I)  
 SIGF1(I) = SIGF(I)

00010090  
 00010100  
 00010110  
 00010120  
 00010130  
 00010140  
 00010150  
 00010160  
 00010170  
 00010180  
 00010190  
 00010200  
 00010210  
 00010220  
 00010230  
 00010240  
 00010250  
 00010260  
 00010270  
 00010280  
 00010290  
 00010300  
 00010310  
 00010320  
 00010330  
 00010340  
 00010350  
 00010360  
 00010370  
 00010380  
 00010390  
 00010400  
 00010410  
 00010420  
 00010430  
 00010440  
 00010450  
 00010460  
 00010470  
 00010480  
 00010490  
 00010500  
 00010510  
 00010520  
 00010530  
 00010540  
 00010550  
 00010560  
 00010570  
 00010580  
 00010590  
 00010600  
 00010610  
 00010620  
 00010630  
 00010640  
 00010650  
 00010660  
 00010670  
 00010680  
 00010690  
 00010700  
 00010710

```

NISOF1(I) = NISIGF(I)
ERF1(I) = ERF(I)
125 CONTINUE
      OURN = ECRN(IC-1)
      J1 = 1
      K1 = 1
      GO TO 103
127 DO 120 I=1,N1
      D(I) = S2(I,1,IC,LL)
      SIGA(I) = S2(I,2,IC,LL)
      SIGF(I) = S2(I,3,IC,LL)
      NISIGF(I) = S2(I,4,IC,LL)
      ERF(I) = S2(I,5,IC,LL)
      O2(I) = O(I)
      SIGA2(I) = SIGA(I)
      SIGF2(I) = SIGF(I)
      NISGF2(I) = NISIGF(I)
      ERF2(I) = ERF(I)
130 CCNTINUE
      OURN = ECRN(IC)
      J1 = 2
      GO TO 103
121 DO 122 I=1,N1
      D(I) = S2(I,1,IC,LL)
      SIGA(I) = S2(I,2,IC,LL)
      SIGF(I) = S2(I,3,IC,LL)
      NISIGF(I) = S2(I,4,IC,LL)
      ERF(I) = S2(I,5,IC,LL)
      O(I) = O(I)
      SIGA1(I) = SIGA(I)
      SIGF1(I) = SIGF(I)
      NISOF1(I) = NISIGF(I)
      ERF1(I) = ERF(I)
122 CONTINUE
      OURN = ECRN(IC)
      J1 = 1
      K1 = 2
      GO TO 103
122 DO 124 I=1,N1
      D(I) = S2(I,1,IC+1,LL)
      SIGA(I) = S2(I,2,IC+1,LL)
      SIGF(I) = S2(I,3,IC+1,LL)
      NISIGF(I) = S2(I,4,IC+1,LL)
      ERF(I) = S2(I,5,IC+1,LL)
      O(I) = O(I)
      SIGA2(I) = SIGA(I)
      SIGF2(I) = SIGF(I)
      NISGF2(I) = NISIGF(I)
      ERF2(I) = ERF(I)
124 CONTINUE
      OURN = ECRN(IC+1)
      J1 = 2
      GO TO 103
123 DO 125 I=1,N1
      D(I) = S2(I,1,KP-1,LL)
      SIGA(I) = S2(I,2,KP-1,LL)
      SIGF(I) = S2(I,3,KP-1,LL)
      NISIGF(I) = S2(I,4,KP-1,LL)
      ERF(I) = S2(I,5,KP-1,LL)
      O(I) = O(I)
      SIGA1(I) = SIGA(I)
      SIGF1(I) = SIGF(I)
      NISOF1(I) = NISIGF(I)

```

```

J0010720
J0010730
J0010740
J0010750
J0010760
J0010770
J0010780
J0010790
J0010800
J0010810
J0010820
J0010830
J0010840
J0010850
J0010860
J0010870
J0010880
J0010890
J0010900
J0010910
J0010920
J0010930
J0010940
J0010950
J0010960
J0010970
J0010980
J0010990
J0011000
J0011010
J0011020
J0011030
J0011040
J0011050
J0011060
J0011070
J0011080
J0011090
J0011100
J0011110
J0011120
J0011130
J0011140
J0011150
J0011160
J0011170
J0011180
J0011190
J0011200
J0011210
J0011220
J0011230
J0011240
J0011250
J0011260
J0011270
J0011280
J0011290
J0011300
J0011310
J0011320
J0011330
J0011340

```

	ENF1(I) = ENF(I)	00011350
130	CONTINUE	00011360
	BGR1 = ECRG(KM-1)	00011370
	J1 = 1	00011380
	K1 = 3	00011390
	GO TO 103	00011400
137	DO 138 I=1,N1	00011410
	D(I) = S2(I,1,AP,LL)	00011420
	SIG1(I) = S2(I,2,RP,LL)	00011430
	SIGF(I) = S2(I,3,KP,LL)	00011440
	NISIGF(I) = S2(I,4,KM,LL)	00011450
	ENF(I) = S2(I,5,AP,LL)	00011460
	D2(I) = D(I)	00011470
	SIGAZ(I) = SIG1(I)	00011480
	SIGF2(I) = SIGF(I)	00011490
	NISGF2(I) = NISIGF(I)	00011500
	ENF2(I) = ENF(I)	00011510
130	CONTINUE	00011520
	BGR2 = ECRG(KM)	00011530
	J1 = 2	00011540
	GO TO 103	00011550
200	DO 201 I=1,N1	00011560
	D(I) = S2(I,1,1,LL)	00011570
	SIG1(I) = S2(I,2,1,LL)	00011580
	SIGF(I) = S2(I,3,1,LL)	00011590
	NISIGF(I) = S2(I,4,1,LL)	00011600
	ENF(I) = S2(I,5,1,LL)	00011610
	D1(I) = D(I)	00011620
	SIG11(I) = SIG1(I)	00011630
	SIGF1(I) = SIGF(I)	00011640
	NISGF1(I) = NISIGF(I)	00011650
	ENF1(I) = ENF(I)	00011660
201	CONTINUE	00011670
	BGR1 = BGR1(I)	00011680
	J1 = 1	00011690
	K1 = 4	00011700
	GO TO 103	00011710
202	DO 203 I=1,N1	00011720
	D(I) = S2(I,1,2,LL)	00011730
	SIG1(I) = S2(I,2,2,LL)	00011740
	SIGF(I) = S2(I,3,2,LL)	00011750
	NISIGF(I) = S2(I,4,2,LL)	00011760
	ENF(I) = S2(I,5,2,LL)	00011770
	D2(I) = D(I)	00011780
	SIGAZ(I) = SIG1(I)	00011790
	SIGF2(I) = SIGF(I)	00011800
	NISGF2(I) = NISIGF(I)	00011810
	ENF2(I) = ENF(I)	00011820
203	CONTINUE	00011830
	BGR2 = ECRG(I2)	00011840
	J1 = 2	00011850
	GO TO 103	00011860
4		00011870
6	INTERPLACAO DAS CONSTANTES COM A CONCENTRACAO DE BORO-10 EMITIDA	00011880
6		00011890
129	I1 = 3	00011900
	XBOR = (BOR3 - BOR1)/(BOR2 - BOR1)	00011910
	GO TO 140 I=1,N1	00011920
	D(I) = XBOR*(D2(I) - D1(I)) + D1(I)	00011930
	SIG1(I) = XBOR*(SIGAZ(I) - SIG11(I)) + SIG11(I)	00011940
	SIGF(I) = XBOR*(SIGF2(I) - SIGF1(I)) + SIGF1(I)	00011950
	NISIGF(I) = XBOR*(NISGF2(I) - NISGF1(I)) + NISGF1(I)	00011960
	ENF(I) = XBOR*(ENF2(I) - ENF1(I)) + ENF1(I)	00011970



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADAMS, C.H. Current trends in methods for neutron diffusion calculations. Nucl. Sci. Eng., 64, 552-562, 1977.
2. ANCONA, A.; BECKER, M., et al. Nodal coupling by response matrix principles. Nucl. Sci. Eng., 64, 405-417.
3. PARRY, R.F. LEOPARD - A spectrum dependent non-spatial depletion code for the IBM-7094. Pittsburg, Penn., Westinghouse Electric Corporation, Sep. 1963. (WCAP-3269-26).
4. PATISTA, J.L.; CORREA, F. Cálculo de consumo de combustível e distribuição de potência para um PWR, utilizando-se os programas LEOPARD e CITATION, São Paulo, IPEP, 1982 (Dissertação de Mestrado).
5. PELL, G.I.; GLASSTONE, S. Nuclear reactor theory. New York, Van Nostrand Reinhold, 1970.
6. DELP, D.L., et al. FLARE - A three dimensional boiling water reactor simulator. General Electric Company report, GEAP 4598, 1964.
7. DUDERSTADT, J.J. & HAMILTON, L.J. Nuclear reactor analysis. New York, John Wiley & Sons, 1976.
8. FMMET, M.B. The MORSE monte carlo radiation transport code system. Oak Ridge, Tenn, Oak Ridge Nat. Lab., 1975 (ORNL-4972).
9. FOWLER, T.B.; VONDY, D.R.; CUNNINGHAM, G.V. Nuclear reactor core analysis code: CITATION. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory, Jul. 1971. (ORNL-TM-2406, Rev. 2).
10. FRÖHLICH, R. Summary discussion and state of the art review for coarse-mesh computational methods. Atomkernenergie, 30, 152-158, 1977.

11. GRAVES, H.W.Jr. Nuclear fuel management. New York, John Wiley & Sons, 1979.
12. PENRY, A.F. Nuclear reactor analysis. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1975.
13. HENRY, A.F. Refinements in accuracy of coarse-mesh finite-difference solution of the group-diffusion equations. Proc. conf. numerical reactor calculations, IAEA - SM - 154/21, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1972.
14. LAMARSH, J.R. Introduction to nuclear reactor theory. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1966.
15. REIS, P.E.G. Estudo do método de síntese iterativa por defl<sub>a</sub>ção na resolução da equação de difusão aplicada a cálculos de reatores rápidos. Publicação das Conferências realizadas no 3º Encontro Nacional de Física de Reatores. Itaipava, R.J., 1982.
16. SANGREN, W. Digital computers and nuclear reactor calculations. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1960.
17. SCHAFFNER, N.M. Reactor shielding for nuclear engineers. USA, U.S. Atomic Energy Commission, 1973.
18. SCHMIDT, F.A.R. Status of the Monte-Carlo development. Proc. conf. numerical reactor calculations, IAEA - SM - 154/70, p. 699, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1972.
19. SHREIDER, Y.A. Method of statistical testing. New York, Elsevier Publishing Company, 1964.
20. SMITH, K.S. & PENRY, A.F. An analytic nodal method for solving the two-group, multidimensional, static and transient neutron diffusion equations. MIT, Massachusetts, 1980 (Dissertação de Mestrado).
21. STEVENS, P.N. & TRUFFY, D.K. Methods for calculating neutron and gamma-ray attenuation. Weapons radiation shielding handbook (DASA-1982-3), Defense Atomic Support Agency, Washington, 1968.

22. VARGA, R.S. Matrix iterative analysis. Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1962.
23. WACHSPRESS, E.L. Iterative solution of elliptic systems. London, Prentice-Hall, Inc., 1966.
24. WEISS, Z. Nodal equations derived from invariant imbedding theory. Nucl. Sci. Eng., 48 , 235-247, 1972.
25. WEISS, Z. Some basic properties of the response matrix equations. Nucl. Sci. Eng., 63 , 457-492, 1977.
26. WEISS, Z. & LINDAFL, S. O. High-order response matrix equations in two-dimensional geometry. Nucl. Sci. Eng., 58 , 166-181, 1975.