

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA - PROMEC

**ESTUDO DO TRANSIENTE DE UM REATOR NUCLEAR A LEITO
FLUIDIZADO**

POR

ELAINE EVANÍ STRECK

LICENCIADA EM FÍSICA PELA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA MARIA, UFSM

TRABALHO REALIZADO NO DEPARTAMENTO DE ENGE -
NHARIA MECÂNICA DA UFRGS, DENTRO DO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA-PROMEC

PORTO ALEGRE

1988

ESTUDO DO TRANSIENTE DE UM REATOR NUCLEAR A LEITO
FLUIDIZADO

D I S S E R T A Ç Ã O

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA - PROMEC, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FENÔMENOS DE TRANSPORTE

POR

ELAINE EVANÍ STRECK

LICENCIADA EM FÍSICA

1988

II

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração: Fenômenos de Transporte e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Dr. Farhang Sefidvash
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Co-Orientador: MSc. Marco Túllio Menna Barreto de Vilhena
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Banca Examinadora: _____

Dr. Farhang Sefidvash
UFRGS

MSc. Marco Túllio M. B. de Vilhena
UFRGS

Dr. Julio Ruiz Claeysen
UFRGS

Dr. César Antônio Leal
UFRGS

Coordenador do PROMEC
Dr. Oscar Daniel Corbella

RESUMO

Neste trabalho, as equações de cinética puntual para um Reator Nuclear a Leito Fluidizado que, devido às características de volume variável no tempo deste reator, apresentam formulação diversa da convencional, são resolvidas pelo método de Hansen. Este método preserva as suas características de eficiência e convergência assintótica quando aplicado na referida formulação.

Um modelo de realimentação termohidráulica, unidimensional e linearizado, foi acoplado ao modelo de cinética puntual visando obter uma formulação mais realista para o comportamento da potência, sendo as equações resultantes resolvidas pelo método de Euler explícito.

Os resultados obtidos mostram que o Reator Nuclear a Leito Fluidizado apresenta comportamento similar ao de um reator convencional do tipo PWR, no sentido em que ambos respondem com um crescimento médio da potência frente a oscilações estacionárias da reatividade em torno da criticalidade.

Na condição de operação em que foram obtidos os resultados, a diferença relativa entre os picos de potência do Reator Nuclear a Leito Fluidizado e de um PWR simulado é de 3.9% por cento de amplitude de oscilação da altura do leito fluidizado.

ABSTRACT

In this work, the point kinetic equations for a Fluidized-Bed Nuclear Reactor are solved by the method of Hansen. Due to the time varying nature of the reactor volume, the equations have a non-conventional formulation (moving boundary problem), but the method of solution preserves its asymptotic convergence and efficiency characteristics under this formulation.

A one dimensional and linearized thermal hydraulics feedback model was coupled to the point kinetic equations in order to obtain a more realistic representation of the reactor power. The resulting equations are solved by the Euler explicit method.

The results show that the Fluidized-Bed Nuclear Reactor has a performance similar to the conventional PWR type reactors, in the sense that both kind of reactors respond to stationary oscillations of the reactivity around criticality with a growth of the average power.

Under the operation condition in which the results were obtained, a relative difference between the power peaks of the Fluidized-Bed Nuclear Reactor and a simulated PWR is 3.9% per centimeter of oscillation amplitude of the fluidized-bed height.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Farhang Sefidvash, pela sempre pronta disponibilidade em sanar dúvidas, aconselhar e questionar, fatores que evidentemente muito contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

Ao co-orientador Prof. Marco Túllio M. B. de Vilhena, pelo auxílio na fundamentação científica.

Ao PRONUCLEAR/CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear, pelo apoio financeiro.

À chefia, membros e amigos do Departamento de Engenharia Nuclear da UFRGS, pela amizade e bons conselhos.

Aos membros do NAU/CPD - Centro de Processamento de Dados da UFRGS, pelo apoio técnico.

DEDICADO

a meus pais

NOMENCLATURA

- A_{fi} - área de transferência de calor em r_{i-1}
- A_{fs} - área externa da esfera de combustível
- A_c - área externa do revestimento
- B^2 - buckling total, $\therefore B^2 = B_r^2 + B_z^2$
- B_z^2 - buckling axial
- B_r^2 - buckling radial
- $c_i(t)$ - concentração do precursor de neutrons atrasados, tipo i
- c_{pf} - calor específico do combustível
- c_{pc} - calor específico do revestimento
- c_{pm} - calor específico de refrigerante
- h - intervalo de tempo da discretização de Hansen
- h_g - coeficiente de transferência de calor convectivo do "gap"
- h_m - coeficiente de transferência de calor convectivo do refrigerante
- H - altura correspondente à porosidade crítica
- k_e - fator de multiplicação efetivo
- k_f - condutividade térmica do combustível
- k_c - condutividade térmica do revestimento
- ΔM_f - massa de combustível entre r_{i-1} e r_i
- M_c - massa do revestimento

\dot{M}_m	- fluxo de refrigerante no núcleo
$n(t)$	- densidade de neutrons
ΔP	- fração de potência gerada por intervalo i
q'''	- calor gerado por unidade de volume
$r_{i\pm\frac{1}{2}}$	- pontos do intervalo i e $i+1$, que delimitam o intervalo cuja massa é ΔM_f e a potência ΔP
Δr_i	- incremento de raio entre $r_{i-\frac{1}{2}}$ e r_i
T_{cl}	- temperatura central do combustível
T_{fi}	- temperatura do combustível no ponto i
T_c	- temperatura média do revestimento
T_m	- temperatura média do refrigerante
T_{mo}	- temperatura de entrada do refrigerante
u_s	- velocidade de deslocamento da fronteira superior do leito
v	- velocidade média dos neutrons térmicos
$V(t)$	- volume do núcleo do reator
w_0	- maior raiz da equação "inhour"

Símbolos Gregos

ϵ	- porosidade do leito fluidizado
ℓ	- tempo de vida médio dos neutrons imediatos
$\rho(t)$	- reatividade
$\bar{\rho}(t)$	- reatividade corrigida, .'. $\bar{\rho} = \rho + u_s B_z \Lambda$
ρ_f	- densidade do combustível

- ρ_c - densidade do revestimento
- ρ_m - densidade do refrigerante
- β - fração total de precursores de neutrons atrasados
- β_i - fração do precursor de neutrons atrasados, tipo i
- λ_i - constante de decaimento radioativo do precursor de neutrons atrasados, tipo i
- $\bar{\lambda}_i$ - constante de decaimento radioativo corrigida do precursor de neutrons atrasados, tipo i, $\therefore \bar{\lambda}_i = \lambda_i - \beta_i \lambda$
- λ - tempo de geração médio dos neutrons imediatos
- ν - número médio de neutrons produzidos por fissão
- Δt - intervalo de tempo no método de Euler
- Σ_a - secção de choque macroscópica de absorção
- Σ_f - secção de choque macroscópica de fissão

ÍNDICE

	Pág.:
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
AGRADECIMENTOS	VI
DEDICATÓRIA	VII
NOMENCLATURA	VIII
INTRODUÇÃO	1
I. O REATOR NUCLEAR A LEITO FLUIDIZADO (RNLF)	3
I.1. Descrição do Reator	3
I.2. Funcionamento do Reator	5
I.3. Controle do Reator	6
II. CINÉTICA PUNTUAL	8
II.1. O método de Hansen	13
II.2. A equação "inhour"	19
III. TERMOHIDRÁULICA UNIDIMENSIONAL	23
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
IV.1. O Comportamento da Potência X Amplitude de Oscilação da Altura do Leito Fluidizado	34
IV.2. A influência do termo $u_s B_z$	35
IV.3. O efeito da realimentação termohidráulica na potência	38
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
ANEXOS	46

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.:
I.1. Esquema de um módulo do RNLF	7
II.1. Representação genérica das raízes da equação "inhour" para valores nulos (0) , positivos (+) e negativos (-) de $u_s B_z$	21
IV.1. Curva de k-efetivo em função da porosidade para reator padrão novo e sem veneno, com expansão para o intervalo operacional	31
IV.2. Curva do tempo de vida médio dos neutrons imediatos em função da porosidade para reator padrão, novo e sem veneno, com expansão para o intervalo operacional	32
IV.3. Curvas de comportamento da potência em função do tempo para amplitudes de oscilação da altura do leito de 0.1 cm (A), 0.3 cm (B) e 0.5 cm (C)	33
IV.4. Curva de comportamento do fluxo de neutrons para reatividade de $\rho = 0.70\% \text{ sen } t$	35
IV.5. Curva das diferenças relativas entre a potência do RNLF e do PWR simulado em função da amplitude de oscilação	36
IV.6. Curva das diferenças absolutas de potência entre o RNLF e o PWR simulado em função do tempo para amplitudes de oscilação da altura do leito de 0.5 cm (A), 0.3 cm (B) e 0.1 cm (C), e potência inicial de 10 KW	37

IV.7. Curvas envoltórias dos máximos (A) e mínimos (B) de potência do RNLF em função do tempo para amplitude de oscilação da altura do leito de 0.5 cm	40
--	----

ÍNDICE DE TABELAS

IV.1. Dados para um módulo do RNLF	29
IV.2. Variações de temperaturas e potência em função do tempo para o RNLF com amplitude de oscilação da altura do leito de 0.5 cm	39

INTRODUÇÃO

O Reator Nuclear a Leito Fluidizado, doravante designado RNLF, é de conceito modular e utiliza combustível esférico ligeiramente enriquecido, fluidizado por água leve.

Em trabalhos anteriores já mostrou-se que a reatividade do reator é estreitamente dependente da porosidade do leito fluidizado, definida como a razão entre o volume de moderador e o volume total do núcleo, visto que uma variação desta porosidade implica numa alteração da composição material do núcleo (1).

Como no RNLF o volume do núcleo pode variar no tempo, caracterizando-se a cinética deste reator num problema de fronteira móvel para os casos em que o transiente é devido a variação de porosidade, a formulação matemática é diversa do modelo convencional.

O primeiro objetivo deste trabalho é desenvolver uma solução numérica para o modelo de cinética puntual do RNLF, pois este é o único modelo que já se encontra desenvolvido (2).

O segundo objetivo é analisar o comportamento da potência do reator para pequenas oscilações da porosidade e consequentemente da reatividade em torno da criticalidade, já que no atual "layout" do reator existe a possibilidade de ligeiras oscilações da porosidade em torno da porosidade de operação.

O método escolhido para a resolução das equações de ciné-

tica puntual é o de Hansen (3), que também é eficiente para variações grandes da reatividade.

Para obter um perfil mais realístico do comportamento da potência, considerou-se a realimentação termohidráulica embora num modo aproximado, visto os parâmetros envolvidos não serem exatos, já que não estão sendo considerados os efeitos da fluidização sobre os mesmos.

O trabalho é apresentado em quatro capítulos fundamentais, divididos como se segue.

No capítulo I é apresentada uma descrição genérica da estrutura física do reator e do seu funcionamento.

O capítulo II contém o desenvolvimento do método de Hansen como a solução numérica para as equações de cinética puntual do RNLF. Neste capítulo também é desenvolvida a equação "inhour", já que esta se faz necessária a aplicação do método de Hansen.

O modelo termohidráulico utilizado na determinação das temperaturas do núcleo do reator e o método aplicado na sua resolução: Euler explícito (dada sua simplicidade em relação aos métodos implícitos), são apresentados no capítulo III.

Os resultados obtidos para o comportamento da potência nos diversos casos com as análises respectivas compõe o capítulo IV.

Adicionalmente, nos anexos A, B e C são apresentados o desenvolvimento da equação da difusão para fronteira móvel, o desenvolvimento das equações de cinética puntual para o RNLF e uma suscinta descrição do programa elaborado para a resolução dos problemas propostos.

I. O REATOR NUCLEAR A LEITO FLUIDIZADO (RNLF) :

I.1. Descrição do Reator:

O RNLF é modular e portanto suas dimensões podem ser adequadas conforme o interesse do usuário. Seu funcionamento é baseado no conceito de leito fluidizado, ou seja, o elemento combustível esférico é fluidizado por água leve, a qual serve como meio fluidizante, moderador e refrigerante.

Cada módulo do reator, figura (I-1), pode ser dividido em um núcleo na sua parte superior e uma câmara de combustível na parte inferior. O núcleo é formado por um tubo de fluidização cilíndrico de 25cm de diâmetro interno, circundado por uma carcaça hexagonal.

A câmara de combustível é composta por um tubo de 10cm de diâmetro interno, o qual está no prolongamento do tubo de fluidização.

Entre o tubo de fluidização e a carcaça hexagonal, e portanto, entre a câmara de combustível e a carcaça circular, que está no prolongamento da carcaça hexagonal, forma-se um anel no qual a água entra pela parte superior, penetrando após na câmara de combustível por perfurações existentes na sua parte inferior.

Na parte superior do reator existe uma tela que assegura o limite máximo da altura do leito fluidizado. Um anel de controle de forma cilíndrica, constituído de material absorvedor

de neutrons, se encontra conectado a esta tela.

Dentro da câmara de combustível existe combustível na forma de esferas de dióxido de urânio (UO_2), levemente enriquecido, revestido com zircaloy e tendo diâmetro aproximado de 0.8 cm.

A alimentação de combustível é feita pelo centro do eixo oco de acionamento da tela limitadora.

Na base inferior da câmara de combustível existe uma válvula, acionada através de um sistema hidráulico, que permite a retirada de combustível do interior da câmara para um reservatório onde fica permanentemente esfriado.

A parte inferior do reator, ou seja, a carcaça, é aterrada numa camada de grafite.

Na parte superior do tubo de fluidização há um gerador de vapor do tipo "shell and tube".

O fluxo de refrigerante é acionado por uma bomba em circuito fechado. A água fria entra na parte inferior, vai ao distribuidor, entra na câmara de combustível através das perfurações, sobe para o núcleo do reator absorvendo calor neste. Imediatamente, entra no gerador de vapor e transfere este calor. Após, retorna para a bomba descendo pelos anéis formados entre o tubo de fluidização e a carcaça do módulo.

No módulo existe um pressurizador para estabilizar a pressão e uma válvula de despressurização, que injeta vapor no condensador quando é necessário diminuir a pressão para permitir a abertura da descarga de combustível.

Em torno do reator existe um refletor de grafite e uma blindagem biológica.

I.2. Funcionamento do Reator:

Conforme cálculos preliminares, a variação na razão de volume de combustível e moderador resulta numa faixa de reatividade crescente num certo intervalo de porosidade, atingindo um valor máximo, e decrescendo como o ulterior aumento de porosidade.

Baseado neste fato o reator compensará a diminuição de reatividade, devida a queima de combustível e a produção de venenos, através de um aumento de porosidade.

A porosidade é controlada pelo fluxo de refrigerante.

Como segurança adicional, existe uma tela que serve para limitar a porosidade ao valor desejado.

No caso de um acidente, por perda de refrigerante ou por outro motivo, ocorrerá um desligamento automático da bomba, com conseqüente precipitação do combustível do núcleo para a câmara de combustível onde, devido a configuração geométrica, o sistema se torna altamente subcrítico.

Caso se deseje, o combustível pode ser retirado através da válvula de descarga para um reservatório onde fica permanentemente esfriado.

Outra alternativa seria, com injeção de água, alterar o nível do reservatório até cobrir a base do reator, fazendo com que o mesmo fique permanentemente esfriado.

I.3. Controle do Reator:

As quatro maiores áreas de decisão no controle do reator são:

- início do processo;
- operação em estado estacionário;
- parada;
- transiente.

Quando o reator começa a operar, o núcleo está a uma temperatura mais baixa que a temperatura de operação e devido ao coeficiente negativo de temperatura, o reator deve alcançar a potência máxima de operação por ajustes sucessivos do fluxo de refrigerante, com a conseqüente alteração da porosidade, variando desta maneira a razão combustível/moderador. Este ajuste implica em vários passos.

Durante as condições normais de operação, pequenas flutuações de reatividade são controladas através da variação do fluxo de refrigerante no intervalo de compensação compreendido entre o nível superior do leito e a tela limitadora.

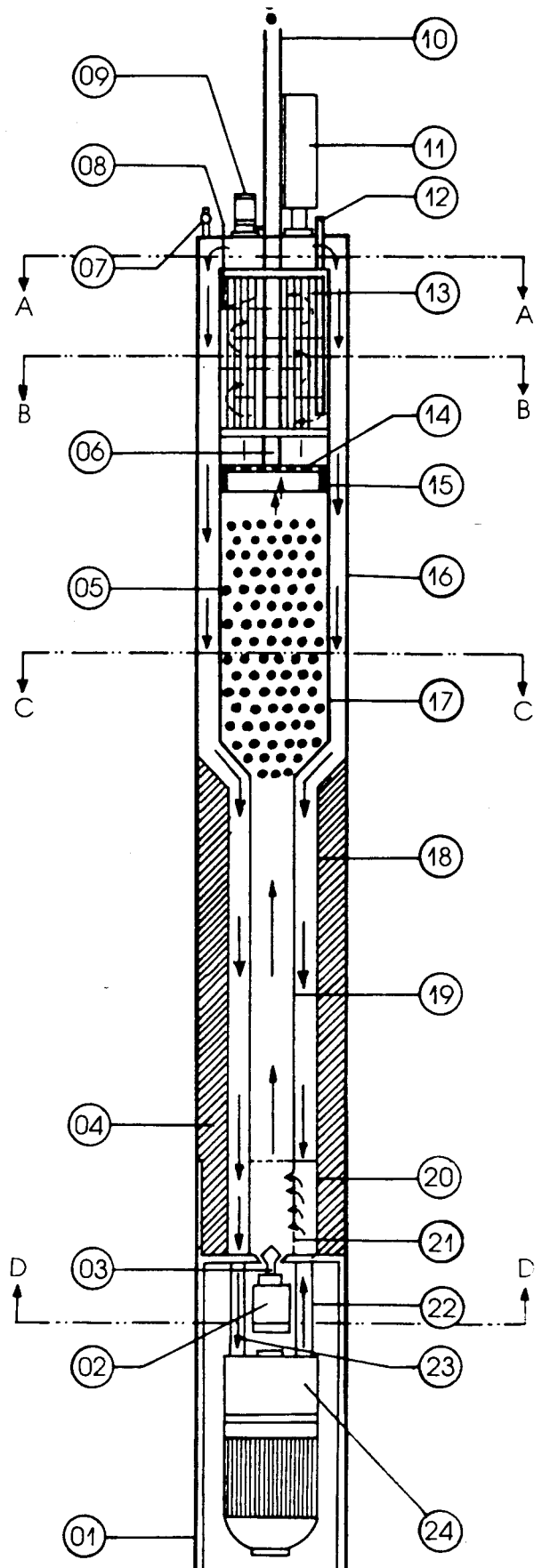
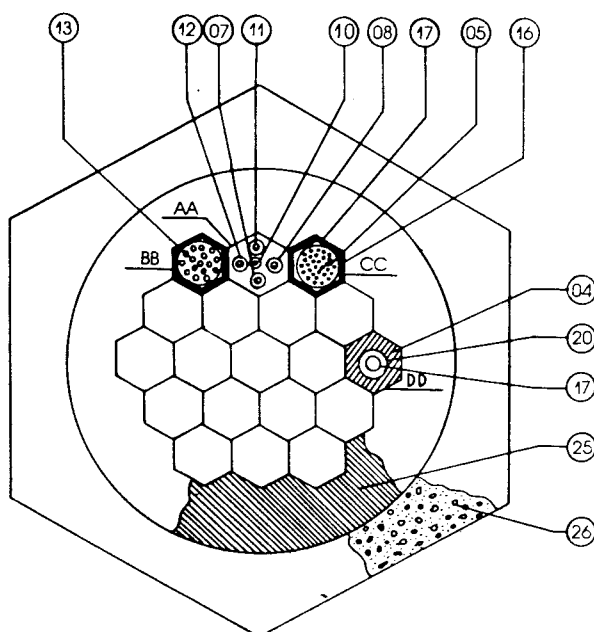
Para compensar os efeitos da queima de combustível, eleva-se o nível da tela limitadora e aumenta-se o fluxo de refrigerante.

A parada do reator é facilmente obtida através do decréscimo da velocidade da bomba, causando diminuição da porosidade do leito.

O leito em colapso é altamente subcrítico (4).

Figura (I-1): Esquema de um módulo do RNLf

- 01 SUPORTE ESTRUTURAL
- 02 ACIONADOR HIDRÁULICO
- 03 VÁLVULA DE DESCARGA DE COMBUSTÍVEL
- 04 GRAFITE
- 05 NÚCLEO DO REATOR
- 06 EIXO OCO DA TELA
- 07 DESPRESSURIZADOR
- 08 SAÍDA DE VAPOR
- 09 CONJUNTO ACIONADOR DA TELA
- 10 ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL
- 11 PRESSURIZADOR
- 12 ENTRADA DE ÁGUA
- 13 GERADOR DE VAPOR
- 14 TELA
- 15 ANEL ABSORVENTE
- 16 CARCAÇA HEXAGONAL
- 17 TUBO DE FLUIDIZAÇÃO
- 18 CARCAÇA CIRCULAR
- 19 CÂMARA DE COMBUSTÍVEL
- 20 DISTRIBUIDOR
- 21 PERFURAÇÕES DE ENTRADA
- 22 ENTRADA DE REFRIGERANTE
- 23 SAÍDA DE REFRIGERANTE
- 24 BOMBA CIRCUITO PRIMÁRIO
- 25 REFLETOR DE GRAFITE
- 26 BLINDAGEM BIOLÓGICA



II. CINÉTICA PUNTUAL

O modelo de cinética puntual caracteriza-se particularmente por não considerar a dependência espacial do fluxo de neutrons e da concentração de precursores, aproximação esta que é válida apenas no caso de reatividade pequena, sendo obtido a partir da equação da difusão de neutrons (5,6,7).

A cinética puntual do RNLF, é uma generalização da cinética puntual para reatores convencionais, fato que se deve a uma das propriedades deste reator que é apresentar uma fronteira móvel, no caso a fronteira superior do leito fluidizado. O desvio da criticalidade pode ser provocado por variações na altura do leito fluidizado, o que implica em alterações da porosidade (4).

Uma dedução detalhada das equações de cinética puntual para o RNLF, devido a VILHENA (2), pode ser vista no anexo B, sendo as referidas equações expressas como:

$$\frac{d}{dt} n(t) = \frac{\bar{\rho} - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_i \lambda_i c_i(t) \quad (\text{II-1a})$$

$$\frac{d}{dt} c_i(t) = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \bar{\lambda}_i c_i(t) \quad (\text{II-1b})$$

onde $i = 1, 2, \dots, g$, para g grupos de precursores de neutrons atrasados.

As equações (II-1) podem ser escritas na seguinte forma matricial:

$$\frac{d}{dt} \underline{\phi}(t) = \underline{A}(t) \underline{\phi}(t) \quad (\text{II-2})$$

onde

$$\underline{\phi}(t) = \begin{bmatrix} n(t) \\ c_1(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ c_g(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II-2a})$$

$$\underline{A}(t) = \begin{bmatrix} \frac{\bar{\rho} - \beta}{\Lambda} & \lambda_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \lambda_g \\ \frac{\beta_1}{\Lambda} & -\bar{\lambda}_1 & & & & \\ \cdot & \cdot & & & & \\ \cdot & & \cdot & & & \\ \cdot & & & \cdot & & \\ \frac{\beta_g}{\Lambda} & & \cdot & \cdot & \cdot & -\bar{\lambda}_g \end{bmatrix} \quad (\text{II-2b})$$

Se $\underline{A}(t)$ comuta com sua integral, então a solução formal da equação (II-2) é:

$$\underline{\phi}(t) = \exp \left[\int_0^t dt' \underline{A}(t') \right] \underline{\phi}(0). \quad (\text{II-3})$$

Definindo-se $\underline{\phi}(t) \equiv \underline{\phi}_j$, no intervalo $h = t_{j+1} - t_j$, a equação (II-3) torna-se:

$$\underline{\phi}_{j+1} = \exp \left[\int_0^h dt' \underline{A}(t') \right] \underline{\phi}_j \quad (\text{II-4})$$

e, para o caso de reatividade constante, resulta para (II-4):

$$\underline{\phi}_{j+1} = \exp (\underline{A} h) \underline{\phi}_j. \quad (\text{II-5})$$

Existem diversos métodos (8) para o cálculo da exponencial de uma matriz, entre eles a aproximação por série de Taylor, o qual apresenta sérias restrições quanto à estabilidade, mesmo para reatividade nula ou negativa.

Uma formulação alternativa, que apresenta solicitações menos restritivas, é delineada a seguir.

A equação de precursores (II-1b) pode ser integrada diretamente na forma:

$$c_{j+1}^i = \exp (-\bar{\lambda}_i h) c_j^i + \int_0^h d\xi \exp [-\bar{\lambda}_i (h - \xi)] \times \\ \times \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t_j + \xi) \quad (\text{II-6})$$

enquanto a equação da densidade (II-1a) pode ser escrita como:

$$\frac{d}{dt} n(t) - \alpha n(t) = \left[\frac{\bar{\rho}(t) - \beta}{\Lambda} - \alpha \right] n(t) + \sum_i \lambda_i c^i(t) \quad (\text{II-7})$$

onde o parâmetro α pode ser definido como:

$$\alpha = 0; \quad (\text{II-8a})$$

$$\alpha = \frac{\bar{\rho}(t_j) - \beta}{\Lambda}; \quad (\text{II-8b})$$

$$\alpha = \frac{\bar{\rho}(t_j \rightarrow t_{j+1}) - \beta}{\Lambda}; \quad (\text{II-8c})$$

sendo que $\bar{\rho}(t_j \rightarrow t_{j+1})$ é o valor médio de $\bar{\rho}(t)$ no intervalo indicado e naturalmente implica em conhecimento do comportamento de $\bar{\rho}(t)$.

Então, assumindo α como uma constante, e integrando a equação da densidade de neutrons, obtém-se:

$$\begin{aligned} n_{j+1} &= \exp(\alpha h) n_j + \int_0^h d\xi \left[\frac{\bar{\rho}(t) - \beta}{\Lambda} - \alpha \right] \times \\ &\times \exp[\alpha(h - \xi)] n(t_j + \xi) + \sum_i \int_0^h d\xi \exp[\alpha(h - \xi)] \\ &\times c^i(t_j + \xi) \lambda_i \end{aligned} \quad (\text{II-9})$$

As soluções descritas pelas equações (II-6) e (II-9) podem ser obtidas da equação diferencial matricial:

$$\frac{d}{dt} \underline{\phi}(t) - \underline{\Gamma} \underline{\phi}(t) = (\underline{A} - \underline{\Gamma}) \underline{\phi}(t) \quad (\text{II-10})$$

onde

$$\underline{\Gamma} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & -\bar{\lambda}_1 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -\bar{\lambda}_g \end{bmatrix} \quad (\text{II-10a})$$

A solução formal de (II-10) é:

$$\underline{\phi}_{j+1} = \exp(\underline{\Gamma} h) \underline{\phi}_j + \int_0^h d\xi \exp[\underline{\Gamma}(h - \xi)] (\underline{A} - \underline{\Gamma}) \times \underline{\phi}(t_j + \xi) \quad (\text{II-11})$$

Soluções aproximadas para a equação (II-11) foram obtidas baseando-se numa aproximação polinomial para a função $\underline{\phi}(t_j + \xi)$ (9) no integrando da referida equação. No entanto, a utilização deste método incorre em erros de truncamento e apresenta problemas de tempo computacional, visto que o integrando não é uma função suave de ξ .

II. 1. O método de Hansen:

O método proposto por Hansen (3) apresenta alguma semelhança com o método descrito, na sua formulação inicial, se o parâmetro α for posto como $\alpha = (\bar{\rho} - \beta) / \Lambda$.

Considerando o caso de reatividade constante para simplificar a álgebra e decompondo matriz \underline{A} na forma

$$\underline{A} = \underline{L} + \underline{D} + \underline{U} \quad (\text{II-12})$$

onde \underline{L} é uma matriz estritamente triangular inferior dada por

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \frac{\beta_1}{\Lambda} & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\beta_g}{\Lambda} & & & & 0 \\ \cdot & & & & \cdot \end{bmatrix} \quad (\text{II-12a})$$

\underline{U} é uma matriz estritamente triangular superior dada por

$$\underline{U} = \begin{bmatrix} 0 & \lambda_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \lambda_g \\ 0 & 0 & & & & \\ \cdot & & \cdot & & & \\ \cdot & & & \cdot & & \\ \cdot & & & & \cdot & \\ 0 & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-12b})$$

e \underline{D} é uma matriz diagonal

$$\underline{D} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{\rho} - \beta}{\Lambda} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & -\bar{\lambda}_1 & & & & \\ \cdot & & \cdot & & & \\ \cdot & & & \cdot & & \\ \cdot & & & & \cdot & \\ 0 & & & & & -\bar{\lambda}_g \end{bmatrix} \quad (\text{II-12c})$$

Substituindo (II-12) em (II-2) resulta:

$$\frac{d}{dt} \underline{\phi} - \underline{D} \underline{\phi} = (\underline{L} + \underline{U}) \underline{\phi} \quad (\text{II-13})$$

Observando-se que (II-13) é uma equação diferencial matricial linear de 1ª. ordem tem-se a seguinte solução (10):

$$\underline{\phi}_{j+1} = \exp(\underline{D} h) \underline{\phi}_j + \int_0^h d\xi \exp[\underline{D}(h - \xi)] \times \\ \times (\underline{L} + \underline{U}) \times \underline{\phi}(t_j + \xi) \quad (\text{II-14})$$

Para obter-se uma aproximação razoável para o comportamento da função $\underline{\phi}(t_j + \xi)$ no integrando, assume-se:

$$\underline{\phi}(t_j + \xi) = e^{W_0 \xi} \underline{\phi}_j, \quad (\text{II-15})$$

onde w_0 é o maior autovalor da matriz A .

A obtenção de w_0 não apresenta dificuldades, já que o comportamento dos referidos autovalores é bem conhecido (5,6,7) e para o caso do RNLF a análise do comportamento de w_0 será feita posteriormente neste capítulo.

Então, substituindo a equação (II-15) na equação (II-14) e resolvendo a integral, obtém-se:

$$\begin{aligned} \underline{\phi}_{j+1} = & \left[\exp(\underline{D} h) + (w_0 \underline{I} - \underline{D})^{-1} \{ \exp(w_0 h \underline{I}) - \right. \\ & \left. - \exp(\underline{D} h) \} (\underline{L} + \underline{U}) \right] \underline{\phi}_j = \underline{G} \underline{\phi}_j \end{aligned} \quad (\text{II-16})$$

No cálculo da expressão entre colchetes na equação (II-16) cumpre observar que os argumentos das exponenciais matriciais, bem como a matriz a ser invertida, são matrizes diagonais e portanto, podem ser resolvidas por método direto (10), resultando então para \underline{G} :

$$\underline{G} = \begin{bmatrix} \exp(-d_0 h) & \alpha_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \alpha_g \\ \gamma_1 & \delta_1 & & & & \\ \cdot & & \cdot & & & \\ \cdot & & & \cdot & & \\ \cdot & & & & \cdot & \\ \gamma_g & & & & & \delta_g \end{bmatrix} \quad (\text{II-17})$$

onde

$$-d_0 = \frac{\bar{\sigma} - \beta}{\Lambda} \quad (\text{II-17a})$$

$$\alpha_i = \frac{\exp(w_0 h) - \exp(-d_0 h)}{w_0 + d_0} \lambda_i \quad (\text{II-17b})$$

$$\gamma_i = \frac{\exp(w_0 h) - \exp(-\bar{\lambda}_i h)}{w_0 + \bar{\lambda}_i} \frac{\beta_i}{\Lambda} \quad (\text{II-17c})$$

$$\delta_i = \exp(-\bar{\lambda}_i h) \quad (\text{II-17d})$$

Para verificar a estabilidade do método proposto cumpre re-
cordar algumas definições, quais sejam:

- Sejam $A = (a_{i,j})$ e $B = (b_{i,j})$ duas matrizes $n \times r$.
Então, $A \geq B$ se $a_{i,j} \geq b_{i,j}$ para todo $1 \leq i \leq n$ e $1 \leq j \leq r$.
Se O denota a matriz nula e $A \geq O$, então A é dita não-negativa.

- Para $n \geq 2$, uma matriz A é redutível se existe uma ma-
triz permutação $n \times n$ P , tal que

$$P A P^+ = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ O & A_{22} \end{bmatrix},$$

onde A_{11} é uma submatriz $r \times r$ e A_{22} é uma submatriz $(n-r)$
 $\times (n-r)$, onde $1 \leq r \leq n$. Se não existe tal matriz permutação
 A é dita irredutível.

- Seja $A \geq O$ uma matriz irredutível $n \times n$, e seja k o nú-
mero de autovalores de A cujo módulo é igual a $\rho(A)$, onde $\rho(A)$
denota o raio espectral de A . Então, se $k = 1$, a matriz A é di-
ta primitiva.

Pode-se observar que a matriz \underline{G} é não-negativa, primitiva e irredutível para quaisquer valores reais e finitos de $\bar{\rho}$, h e w_0 e portanto pelo teorema de Perron-Frobenius (11)

1) \underline{G} possui um autovalor real, positivo e simples, o qual maior em módulo que todos os outros autovalores de \underline{G} .

2) O autovetor correspondente ao autovalor citado possui todas as suas componentes positivas.

3) Se qualquer elemento de \underline{G} cresce (decresce), então o referido autovalor cresce (decresce).

Este teorema implica que o procedimento numérico envolvido na equação (II-16) possui um maior autovalor, o qual é real e simples. Assim o autovetor correspondente possui todas as suas componentes positivas.

Hansen (3) mostrou que este método é incondicionalmente estável e o erro de truncamento é proporcional a h^2 .

No caso em que a reatividade é função do tempo, a equação (II-16) torna-se:

$$\begin{aligned} \underline{\phi}_{j+1} = & \exp \left[\int_0^h d\xi \underline{D}(\xi) \right] \underline{\phi}_j + \int_0^h d\xi \exp [\underline{D}(\xi) (h - \xi)] \times \\ & \times (\underline{L} + \underline{U}) \underline{\phi} (t_j + \xi) \end{aligned} \quad (\text{II-18})$$

Assumindo que o intervalo h é suficientemente pequeno tal que $\bar{\rho}_{j+1} - \bar{\rho}_j$ também o seja, então tem-se:

$$\underline{\phi}(t_j + \xi) = \exp (\bar{w}_0 \xi) \underline{\phi}_j \quad (\text{II-19})$$

onde \bar{w}_0 é o valor médio entre $w_0(\bar{\rho}_j)$ e $w_0(\bar{\rho}_{j+1})$.

A integração da equação (II-18) pode ser efetuada se $\bar{\rho}(t)$ for conhecida e a equação matricial resultante é

$$\bar{\phi}_{j+1} = G(t_j) \bar{\phi}_j \quad (\text{II-20})$$

onde $G(t_j)$ é não-negativa, irreduzível e primitiva e portanto o método é estável (3).

No entanto, o erro de truncamento se tornará maior, visto que a função peso, equação (II-19), não é exata. Considerando que h é pequeno, de modo que a variação na reatividade também o é, o erro de truncamento é esperado pequeno e proporcional a $\delta w_0 h$, onde δw_0 é o erro na avaliação de \bar{w}_0 .

O controle do intervalo de discretização, pode ser efetuado com a utilização do parâmetro Δl para o intervalo mínimo, exigindo-se que $x_j \leq \Delta l$ e $y_j \leq \Delta l$, onde

$$x_j = \left| \frac{n_{j+1}}{n_j} - e^{w_0 h} \right| \quad (\text{II-21a})$$

e

$$y_j = \left| \frac{c_{j+1}^i}{c_j^i} - e^{w_0 h} \right| \quad (\text{II-21b})$$

II.2. A equação "inhour":

A equação "inhour", a partir da qual é determinada a maior raiz w_0 utilizada no método de Hansen, deve ser deduzida para o caso de um RNLF, como se segue:

Aplicando transformada de Laplace nas equações (II-1) e observando que:

$$N(s) = L \{n(t): t \rightarrow s\} \quad \text{e} \quad C_i(s) = L \{c_i(t): t \rightarrow s\}$$

onde L denota o operador transformada de Laplace (12), obtém-se o seguinte sistema de equações transformadas:

$$sN(s) - n(0) = \frac{\bar{\rho} - \beta}{\Lambda} N(s) + \sum_i \lambda_i C_i(s) \quad (\text{II-22a})$$

$$sC_i(s) - c_i(0) = \frac{\beta_i}{\Lambda} N(s) - \bar{\lambda}_i C_i(s) \quad (\text{II-22b})$$

Resolvendo $C_i(s)$ em (II-22b) e substituindo em (II-22a) obtém-se:

$$N(s) = \frac{\Lambda \left[n(0) + \sum_i \frac{\lambda_i c_i(0)}{s + \bar{\lambda}_i} \right]}{\Lambda s + \beta - \rho - \sum_i \frac{\beta_i \lambda_i}{s + \bar{\lambda}_i}} \quad (\text{II-23})$$

$N(s)$ em (II-23) é um quociente de polinômios em s , onde o denominador $P(s)$ possui grau superior ao numerador $Q(s)$. Usando o resultado de inversão de quociente de polinômios com denomina

dor possuindo raízes distintas, em (12), resulta:

$$n(t) = \sum_j A_j \exp(w_j t) \quad ; j = 1, 2, \dots, m+1 \quad (\text{II-24})$$

onde os w_j são os zeros de $Q(s)$, ou seja $Q(w_j) = 0$, e os A_j são os coeficientes da expansão, calculados como se segue:

Sendo $P(w_j)$ e $Q'(w_j)$ respectivamente o polinômio no numerador e a derivada do polinômio no denominador de (II-23) avaliados em w_j , então os A_j são obtidos por,

$$A_j = \frac{P(w_j)}{Q'(w_j)} = \frac{\Lambda \left[n(0) + \sum_i \frac{\lambda_i c_i(0)}{w_j + \bar{\lambda}_i} \right]}{\Lambda + \sum_i \frac{\beta_i \lambda_i}{(w_j + \bar{\lambda}_i)^2}} \quad (\text{II-25})$$

Os w_j são os raízes do denominador em (II-23), ou seja :

$$\bar{p} = -\beta + \Lambda w_j - \sum_i \frac{\beta_i \lambda_i}{w_j + \bar{\lambda}_i} \quad (\text{II-26})$$

e, sendo $\beta = \sum_i \beta_i$ pode-se escrever (II-26) como:

$$\bar{p} = \Lambda w_j + \sum_i \frac{\beta_i (w_j - u_s B_z)}{w_j + \bar{\lambda}_i} \quad (\text{II-27})$$

que é a forma da equação "inhour" para um RNLF.

Observe-se que as raízes w_j são transladadas de $u_s B_z$ em

relação às raízes da equação "inhour" convencional, como pode ser visto na figura (II-1).

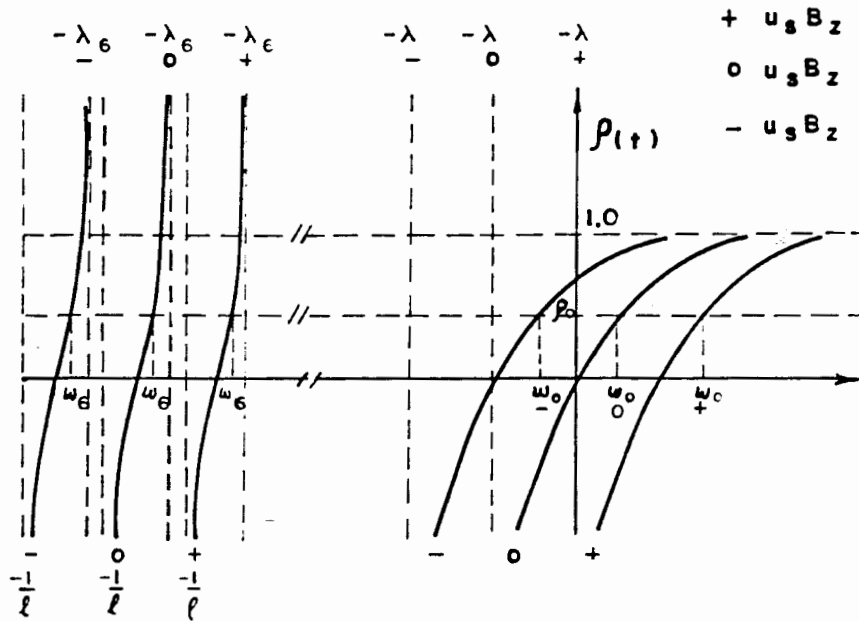


Figura (II-1): Representação genérica das raízes da equação "inhour" para valores nulos (0), positivos (+) e negativos (-) de $u_s B_z$.

A translação das raízes mostradas na figura (II-1) pode ser facilmente demonstrada do seguinte modo:

Usando as definições de $\bar{\rho}$ e $\bar{\lambda}$ a equação "inhour" pode ser escrita:

$$\rho = \Lambda (w_j - u_s B_z) + \sum_i \frac{\beta_i (w_j - u_s B_z)}{w_j - u_s B_z + \lambda_i} \quad (II-28)$$

e, definindo-se $r_j = w_j - u_s B_z$, tem-se a equação

$$\rho = \Lambda r_j + \sum_i \frac{\beta_i r_j}{r_j + \lambda_i} \quad (\text{II-29})$$

portanto, as raízes w_j da equação (II-28) se relacionam com as raízes r_j da equação (II-29) na forma

$$w_j = r_j + u_s B_z \quad (\text{II-30})$$

demonstrando-se assim a referida translação.

Vê-se portanto que a peculiaridade do caso em estudo apresentar-se como um problema de fronteira móvel com a velocidade da fronteira sendo u_s , produz uma translação das raízes da equação "inhour" de $u_s B_z$.

III. TERMOHIDRAULICA UNIDIMENSIONAL

O modelo termohidráulico do RNLF, desenvolvido neste capítulo, visa obter a distribuição de temperaturas em três regiões do núcleo do reator: combustível, revestimento e refrigerante.

Na elaboração do referido modelo os meios foram considerados isotrópicos e os coeficientes independentes da temperatura.

Considerou-se também que, devido à fluidização e consequente movimento aleatório das esferas de combustível no núcleo do reator, a distribuição de temperaturas, em média, é similar para todas as esferas em qualquer posição do núcleo. Além disso, considerou-se que o fluxo do refrigerante é constante. Para variações de porosidade muito pequenas esta aproximação não introduz alterações significativas.

Considerou-se que a produção total de potência é devida em 97% ao combustível e, em 3% diretamente ao refrigerante por efeito dos neutrons rápidos e da radiação gama.

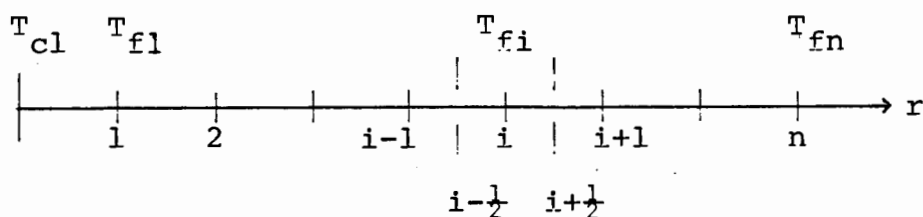
As equações para as diversas regiões de interesse foram discretizadas por diferenças finitas tendo como base NAKATA (13). A seguir é apresentada a discretização.

III.1. Combustível:

A equação da conservação do calor para o combustível é

$$\rho_f c_{pf} \frac{d}{dt} T = q'''' + k_f \nabla^2 T \quad (\text{III-1})$$

a qual é integrada entre $r_{i-\frac{1}{2}}$ e $r_{i+\frac{1}{2}}$ definidos segundo o esquema abaixo, obtendo-se as seguintes equações para os intervalos intermediários:



$$\begin{aligned} \Delta M_{f, pf} c_{pf} \frac{d}{dt} T_{fi} = & 0.97 \Delta P + A_{fi} k_f (T_{fi-i} - T_{fi}) / \Delta r_i - \\ & - A_{fi+1} k_f (T_{fi} - T_{fi+1}) / \Delta r_{i+1} \end{aligned} \quad (\text{III-2})$$

As equações nos pontos extremos são:

$$\frac{1}{2} \Delta M_{f, pf} c_{pf} \frac{d}{dt} T_{cl} = 0.97 \frac{\Delta P}{2} - A_{fl} k_f (T_{cl} - T_{fl}) / \Delta r_1 \quad (\text{III-3})$$

e

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \Delta M_{f, pf} c_{pf} \frac{d}{dt} T_{fn} = & 0.97 \frac{\Delta P}{2} + A_{fn} k_f (T_{fn-1} - T_{fn}) / \Delta r_n - \\ & - A_{fs} h_g (T_{fn} - T_c) \end{aligned} \quad (\text{III-4})$$

III.2. Revestimento:

A equação da conservação do calor para o revestimento é:

$$\rho_c c_{pc} \frac{d}{dt} T = k_c \nabla^2 T \quad (\text{III-5})$$

Visto o revestimento ser altamente condutor e de pouca espessura, considerou-se apenas um ponto, resultando a discretização da equação (III-5) na expressão:

$$M_c c_{pc} \frac{d}{dt} T_c = A_{fs} h_g (T_{fn} - T_c) - A_c h_m (T_c - T_m) \quad (\text{III-6})$$

III.3. Refrigerante:

Considerando-se fluxo constante e produção autonoma de 3% de potencia, a equação da conservação do calor para o refrigerante é:

$$\dot{M}_m c_{pm} (T_m - T_{mo}) = 0.03\Delta P + A_c h_m (T_c - T_m) \quad (\text{III-7})$$

As equações de termohidráulica, acima discretizadas no espaço, são resolvidas pelo método de Euler explícito, devido a sua simplicidade em relação aos métodos implícitos. No entanto, a convergência do método fica sujeita a algumas restrições as quais são examinadas e satisfeitas.

As equações de termohidráulica para as diversas zonas formam um sistema de equações que pode ser representado por:

$$\frac{d}{dt} \underline{T} = \underline{A} \underline{T} + \underline{F} \quad (\text{III-8})$$

onde

$$\underline{T} = \text{col} [T_{c1}, T_{f1}, \dots, T_{fn}, T_c, T_m] \quad (\text{III-8a})$$

$$\underline{F} = \text{col} [\Delta P, \Delta P_1, \dots, \Delta P_n, 0, \Delta P_m] \quad (\text{III-8b})$$

e a matriz de coeficientes \underline{A} é:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & a_{nn-1} & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{III-8c})$$

Aproximando a derivada na equação (III-8) por diferenças finitas de primeira ordem

$$\frac{d}{dt} T = (T_{fi}^{\theta+1} - T_{fi}^{\theta}) / \Delta \theta \quad (\text{III-9})$$

tem-se pelo método de Euler (15) que:

$$\underline{T}^{\theta+1} = \underline{T}^{\theta} + \Delta \theta (\underline{A} \underline{T}^{\theta} + \underline{T}) \quad (\text{III-10})$$

Sendo λ_i os autovalores de \underline{A} , a condição necessária e suficiente para a estabilidade numérica é

$$| 1 + \Delta \theta \lambda_1 | < 1 \quad (\text{III-11})$$

e portanto

$$-2 < \Delta\theta\lambda_i < 0 \quad (\text{III-12})$$

é condição suficiente para a convergência do método (16).

Segundo o teorema de Gerschgorin (17),

Seja a matriz A de ordem $n \times n$, cujos autovalores são λ_i , sendo $i = 1, \dots, n$. Então cada λ_i recai na união dos círculos

$$|z - a_{ii}| \leq r_i, \quad r_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |a_{ij}|. \quad (\text{III-13})$$

obtém-se uma estimativa do maior valor, em módulo, de λ_i que deve ser utilizado na condição (III-12).

As linhas da matriz A que produzem os maiores limites para λ_i , em módulo, são as correspondentes a T_{fn} e T_c , as quais resultam nos seguintes limites para $\Delta\theta$

$$\Delta\theta < \frac{\Delta M_{fpc}^c}{2 (A_{fn} k_f / \Delta r_n + A_{fs} h_g)} \quad (\text{III-14})$$

e

$$\Delta\theta < \frac{M_{cpc}^c}{(A_{fs} h_g + A_{cm} h_m)} \quad (\text{III-15})$$

respectivamente.

O erro de truncamento total associado ao método de Euler é da ordem de $\Delta\theta$ (15).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos a partir de um código computacional, descrito no anexo C, o qual resolve as equações de cinética puntual do RNLF utilizando o método de Hansen, desenvolvido no capítulo II e, tendo em vista a importância do efeito da variação das temperaturas do núcleo sobre a reatividade, principalmente através do efeito Doppler e da variação de densidade do moderador, foi acoplado ao cálculo da potência o cálculo das referidas temperaturas segundo o método de Euler, desenvolvido no capítulo III. Assim, a reatividade é corrigida em função da variação das temperaturas médias do combustível e do moderador, considerando esta variação linear em cada intervalo de tempo.

Os referidos resultados têm como objetivo mostrar o comportamento qualitativo da potência em função do tempo para algumas amplitudes de oscilação da altura do leito e avaliar o efeito do termo $u_s B_z$ no comportamento da potência do RNLF em relação ao comportamento da potência num PWR simulado com inserção equivalente de reatividade.

A simulação de um reator convencional do tipo PWR é obtida com a consideração de altura do leito fixa no RNLF de modo que se obtém uma reatividade equivalente à provocada pela variação da altura do leito sem no entanto computar o termo $u_s B_z$ que é característico do problema de fronteira móvel. A referida simulação é permitida pelo código elaborado para os cálculos propostos.

Tabela (IV-1): *Dados para um módulo do RNLF*

PARÂMETROS TERMOHIDRÁULICOS DO PROJETO	
Produção de calor no núcleo	10 KW
Pressão nominal absoluta do sistema	1.6×10^7 P
Fluxo médio de refrigerante no núcleo	11 Kg/s
Temperatura nominal de entrada	291.0°C
Temperatura média no núcleo	308.0°C
Área efetiva de transferência de calor	15.16 m^2
Fração de calor gerada no combustível	97%
Fração de calor gerada no refrigerante	3%
PARÂMETROS MECÂNICOS DO PROJETO	
Diâmetro interno do combustível	$7.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
Diâmetro externo do combustível	$8.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
Diâmetro do tubo de fluidização	$2.5 \times 10^{-1} \text{ m}$
Número médio de esferas	76 904
PARÂMETROS NUCLEARES DO PROJETO	
Coefficiente de realimentação térmica do combustível na reatividade	$2.0 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Coefficiente de realimentação térmica do moderador na reatividade	$3.5 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Fração total de neutrons atrasados	0.0065
Constante média de decaimento dos produtos de fissão	0.08252 s^{-1}

Todos os cálculos foram efetuados considerando um módulo do reator padrão, o qual usa como combustível dióxido de urânio UO_2 enriquecido a 2.2%, revestimento de zircaloy Zr-2 e é moderado por água leve. A blindagem é feita com grafite numa espessura de 120 cm. Na tabela (IV-1) podem ser obtidas maiores especificações a respeito dos parâmetros do projeto do RNLF para um módulo do reator padrão.

Considerou-se como operacional a porosidade correspondente a $k_e=1.0$ na curva de $k_e \times \epsilon$, fig. (IV-1), a qual é válida para reator padrão novo e sem veneno, o que corresponde a uma porosidade de aproximadamente $\epsilon=0.44$ e altura de leito de aproximadamente $H=0.75$ m.

Pode-se ver, da fig. (IV-1), que a porosidade, considerada operacional para a obtenção dos resultados aqui apresentados, está situada num ponto da curva onde a inclinação, $\Delta k_e / \Delta \epsilon$, é de aproximadamente 0.9, o que implica em apreciáveis variações de reatividade para pequenas variações de porosidade. Numa situação operacional real, o reator é dotado de boro solúvel de modo que a curva é rebaixada e a porosidade operacional corresponde a um ponto onde a curva possui inclinação menos acentuada.

O tempo de vida médio dos neutrons imediatos em geral considerado constante para transientes rápidos é estreitamente dependente da porosidade como pode ser visto na figura (IV-2), onde se verifica que a curva apresenta uma inclinação, $\Delta l / \Delta \epsilon$, a qual é de aproximadamente 9.5×10^{-5} s, e por esta razão é considerado variável na obtenção dos resultados.

A oscilação da altura do leito foi suposta como senoidal, tendo em vista as prováveis relações entre a velocidade da bom-

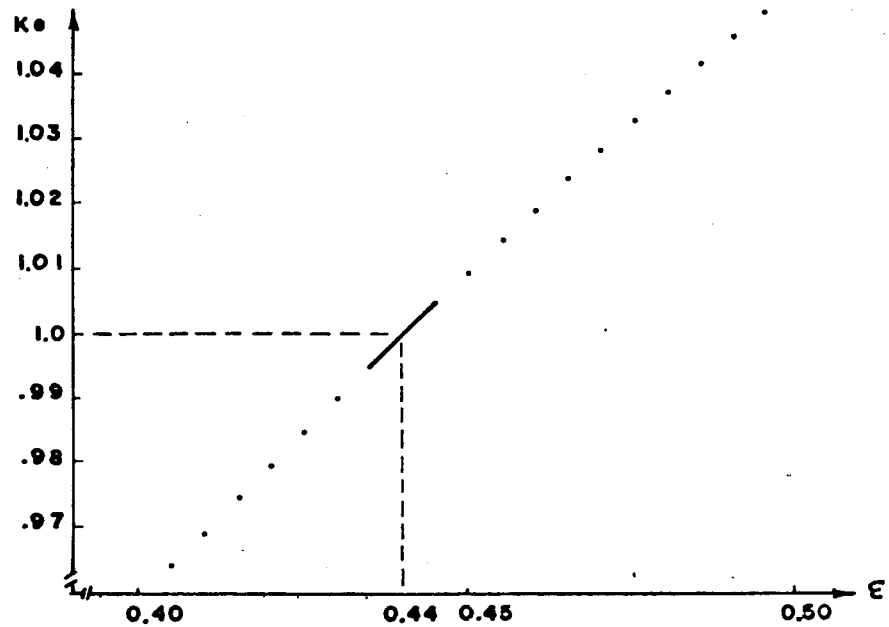
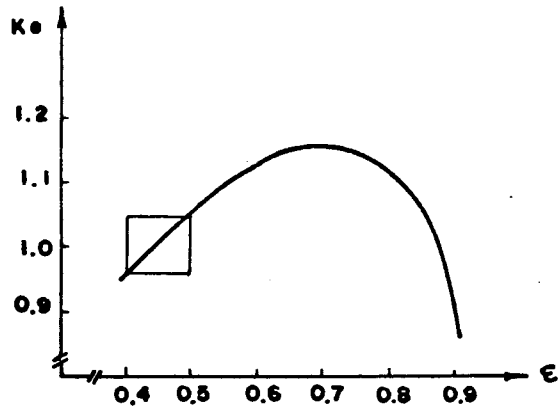


Figura (IV-1): Curva de k -efetivo em função da porosidade para reator padrão, novo e sem veneno, com expansão para o intervalo operacional

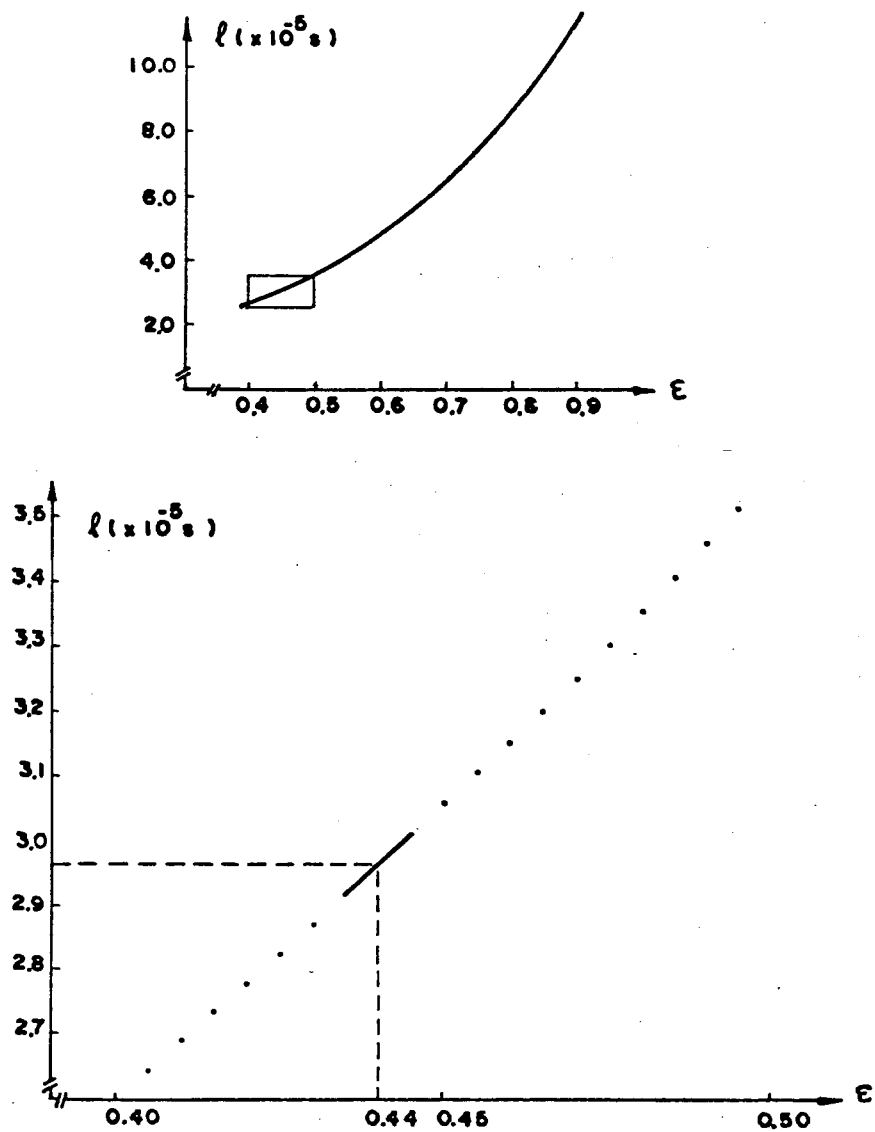


Figura (IV-2): Curva de tempo de vida médio dos neutrons imediatos em função da porosidade para reator padrão, novo e sem veneno, com expansão para o intervalo operacional

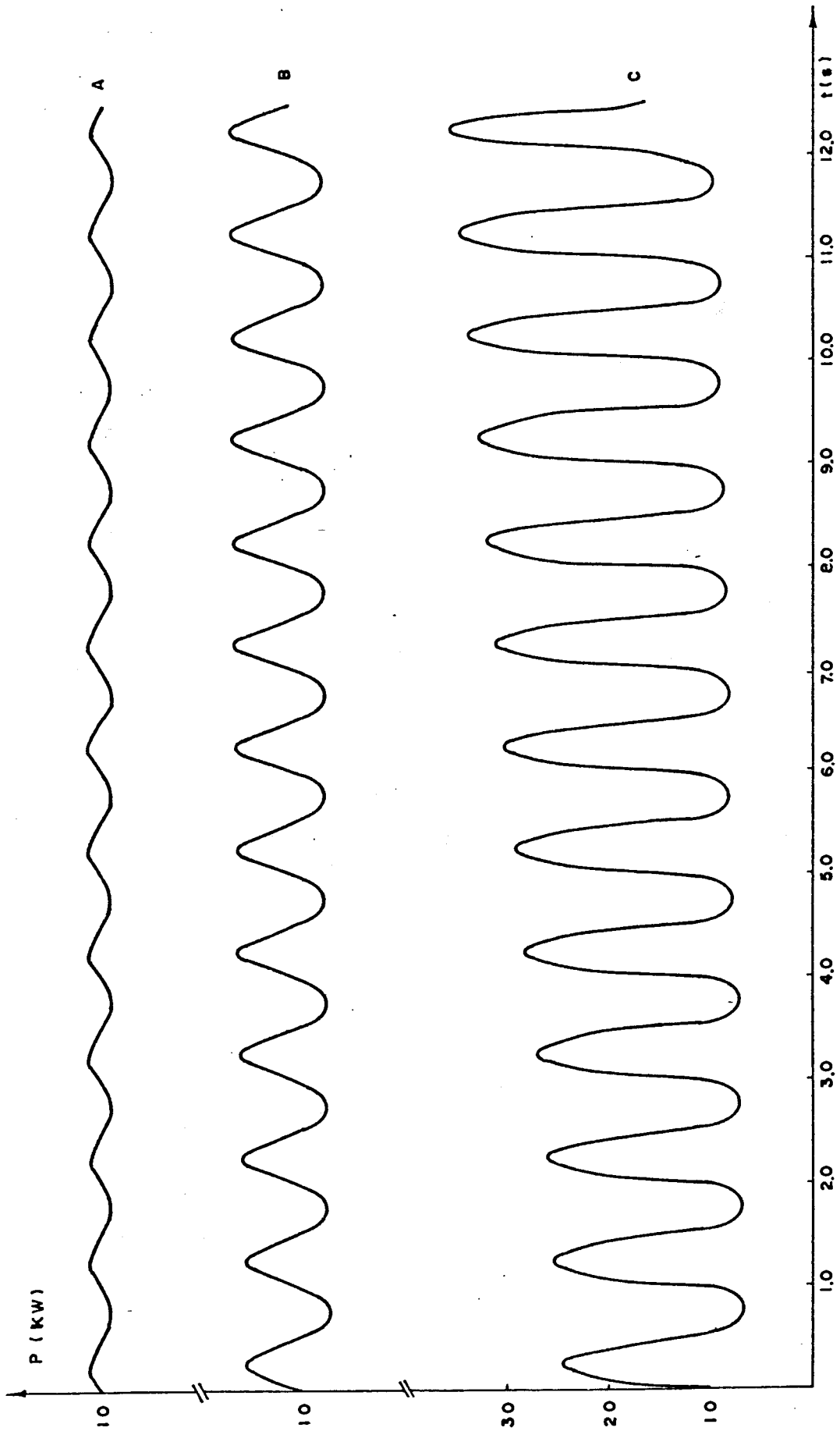


Figura (IV-3): Curvas de comportamento da potência em função do tempo para amplitudes de oscilação da altura do leito de 0.1 cm (A), 0.3 cm (B) e 0.5 cm (C)

ba injetora de água e a porosidade do leito fluidizado.

IV.1. Comportamento da Potência x Amplitude de Oscilação da Altura do Leito Fluidizado:

O comportamento da potência em função do tempo, para amplitudes de oscilação da altura do leito fluidizado de 0.1 cm (A), 0.3 cm (B) e 0.5 cm (C), pode ser visualizado na figura (IV-3), onde se observa o comportamento oscilatório da potência e um crescimento, em média, da mesma no tempo. O comportamento oscilatório é devido à inserção senoidal de reatividade, provocada pela oscilação senoidal da altura do leito fluidizado e conseqüentemente, da porosidade e da reatividade. Pode-se ver também, com maior facilidade nas curvas B e C, que os picos de potência máxima e mínima apresentam amplitudes assimétricas, fato que se deve à assimetria da curva que corresponde à primeira raiz da equação "inhour", fig. (II-1), em relação à origem. Desse modo o argumento da exponencial dominante no cálculo da potência é sempre maior para reatividades positivas que para reatividades negativas equivalentes, implicando que a potência média seja sempre superior à potência inicial e cresça exponencialmente com o tempo.

As amplitudes de oscilação da reatividade correspondentes às amplitudes de oscilação da altura do leito mostradas na figura (IV-3), são:

$$A=0.1 \text{ cm} \Rightarrow =0.737 \times 10^{-3} \therefore 0.11\%$$

$$A=0.3 \text{ cm} \Rightarrow =2.211 \times 10^{-3} \therefore 0.34\%$$

$$A=0.5 \text{ cm} \Rightarrow =3.684 \times 10^{-3} \therefore 0.56\%$$

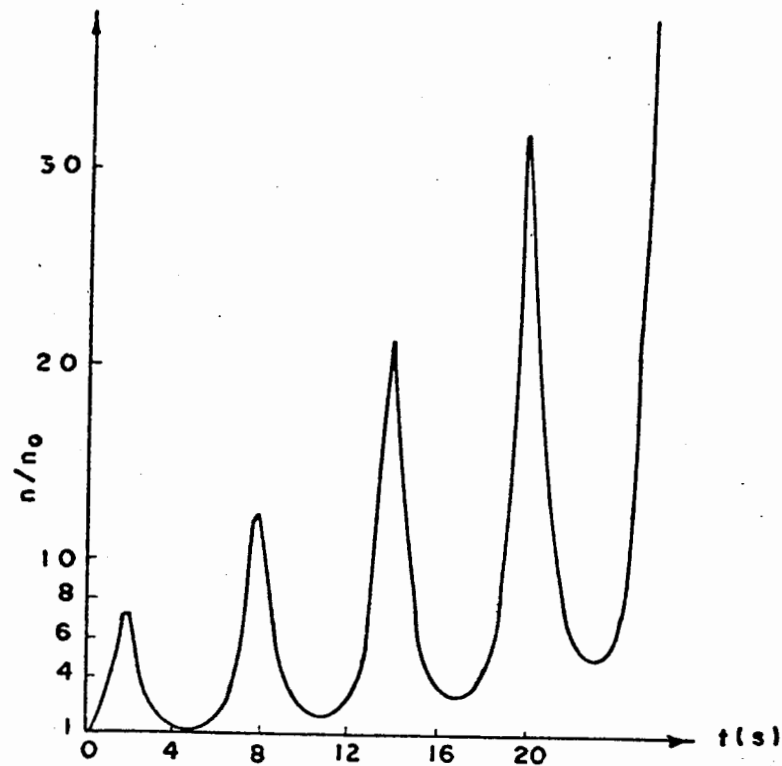


Figura (IV-4): Curva de comportamento do fluxo de nêutrons para reatividade de $\rho = 0.7\% \sin(t)$

O comportamento da potência mostrado na figura (IV-3) está qualitativamente de acordo com o resultado apresentado por AKCASU (18), fig. (IV-4), para uma inserção senoidal de reatividade num reator convencional do tipo PWR.

IV.2. A influência do termo u_{s-z} :

As equações de cinética puntual do RNLF diferem das equações de cinética puntual para reatores convencionais pelo termo u_{s-z} , o qual aparece na equação da densidade de nêutrons e na equação da concentração de precursores, equação (II-1).

Para avaliar a influência do termo u_{s-z} efetuaram-se cálculos comparativos entre o RNLF com oscilação senoidal da altura

do leito e um PWR simulado com inserção equivalente de reatividade. Os resultados são mostrados na figura (IV-5), podendo-se verificar que o percentual relativo de diferença entre a potência do RNLF e a potência do PWR simulado é constante no tempo, e varia linearmente com a amplitude de oscilação da altura do leito, ou da reatividade equivalente, na razão de aproximadamente $\Delta P/\Delta A=3.9\%$ cm para a declividade $\Delta k_e/\Delta \epsilon=0.9$.

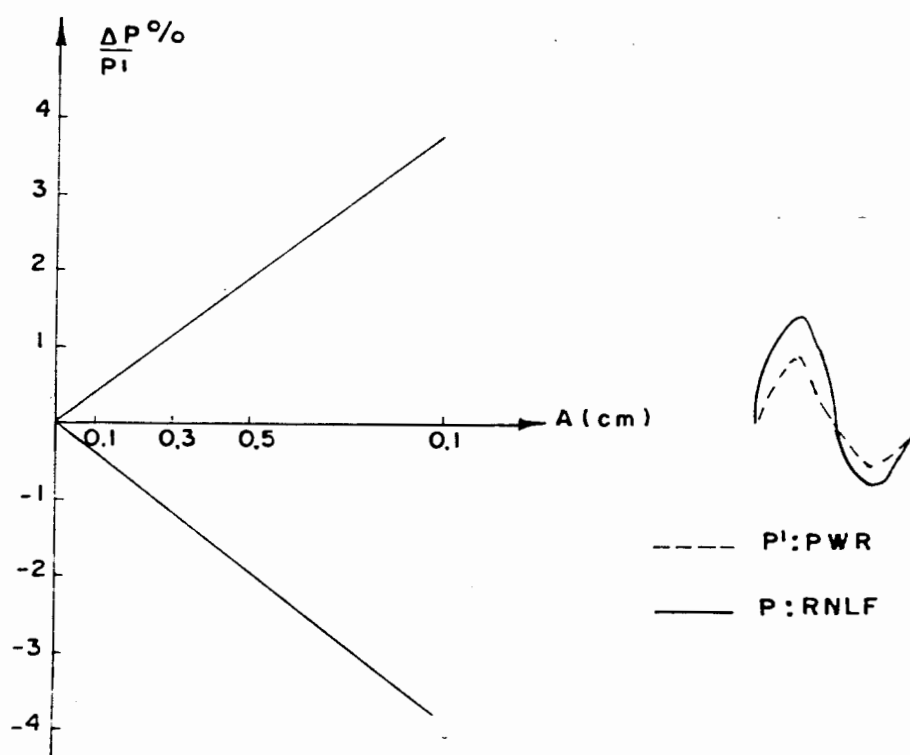


Figura (IV-5): Curva das diferenças relativas entre a potência do RNLF e um PWR simulado em função da amplitude de oscilação

Cálculos comparativos, similares aos descritos no início desta seção, entre o RNLF com oscilação senoidal da altura do leito e um PWR simulado com inserção equivalente de reatividade, foram efetuados considerando o efeito da realimentação termohidráulica sobre a reatividade, sendo os percentuais obtidos

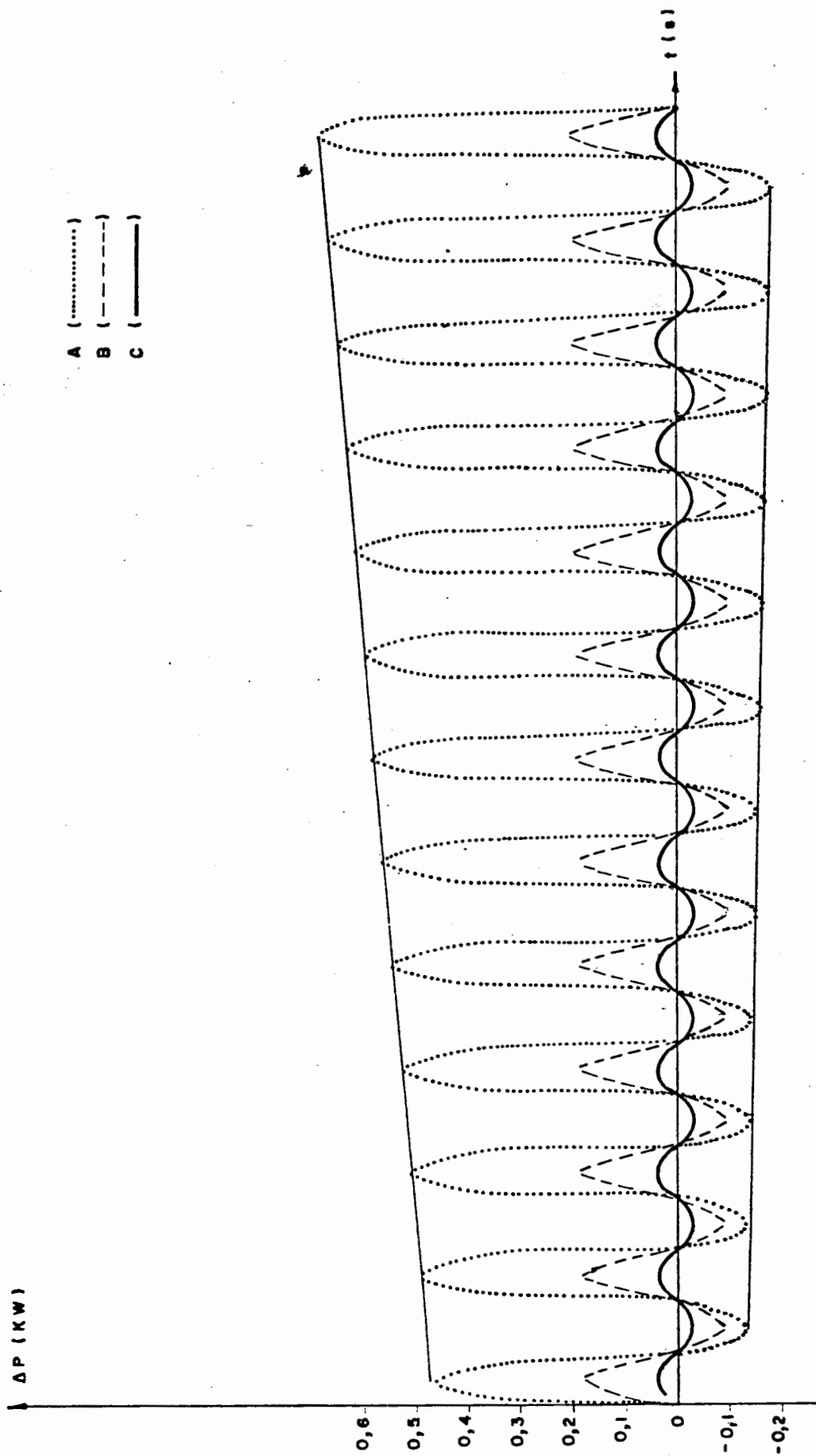


Figura (IV-6): Curvas das diferenças absolutas de potência entre o RNLF e o PWR simulado em função do tempo para amplitudes de oscilação da altura do leito de 0.5 cm (A), 0.3 cm (B) e 0.1 cm (C), com potência inicial de 10KW

idênticos aos mostrados na figura (IV-5).

No entanto, cumpre observar que, embora os percentuais de diferença relativa entre um RNLF e um PWR simulado sejam constantes no tempo para cada amplitude de oscilação da altura do leito, as diferenças absolutas apresentam comportamento oscilatório e crescem no tempo, como pode ser visto na figura (IV-6). O referido comportamento se deve às oscilações cossenoidais de $u_s B_z$ e seu crescimento no tempo justifica-se pela assimetria da curva que corresponde a primeira raiz da equação "inhour".

Note-se que a diferença absoluta se anula a cada meio ciclo, correspondendo aos picos de $u_s B_z$, e cresce numa razão de a proximadamente 0.2W/s para os máximos e de 0.05W/s para os mínimos para o caso de uma amplitude de oscilação da altura do leito de 0.5 cm (A) e potência inicial de 10 KW.

IV.3. O efeito da realimentação termohidráulica na potência

Foram efetuados cálculos comparativos em relação à realimentação termohidráulica no intuito de avaliar o grau de influência desta sobre o comportamento da potência, sendo que o resultado pode ser visto na figura (IV-7), onde se evidencia que para pequenas amplitudes de oscilação da altura do leito e o tempo considerado, o efeito da realimentação termohidráulica se mostra pequeno. Pode-se observar também, que a influência da realimentação termohidráulica é rebaixar os máximos (A) e acentuar os mínimos (B), mostrando que o crescimento da potência média no tempo do RNLF, é menor quando se consideram os efeitos da variação de temperatura sobre a reatividade, o que está em

Tabela (IV-2): *Variações de temperaturas e potência em função do tempo para o RNLF com amplitude de oscilação da altura do leito de 0.5 cm e coeficientes de convecção h_g e h_m de 5.000 W/m²*

t (s)	T _f média (°C)	T _m média (°C)	P' (KW)	P (KW)
00.00	291.000	291.000	10.0000	10.0000
00.25	291.109	291.016	24.3959	24.4610
00.50	291.211	291.036	11.3251	11.3622
00.75	291.233	291.046	6.6213	6.6391
01.00	291.252	291.051	10.2315	10.2742
...
05.00	291.645	291.136	11.5894	11.8289
05.25	291.696	291.142	28.3128	29.3078
05.50	291.747	291.151	13.2227	13.5709
05.75	291.714	291.150	07.7384	07.9054
06.00	291.685	291.145	11.9063	12.1973
...
10.00	291.792	291.167	13.1423	13.6570
10.25	291.841	291.172	31.9844	33.7997
10.50	291.892	291.182	14.9533	15.6345
10.75	291.850	291.179	08.7519	09.0982
11.00	291.813	291.172	13.4474	14.0237

P : Potência sem realimentação termohidráulica

P': Potência com realimentação termohidráulica

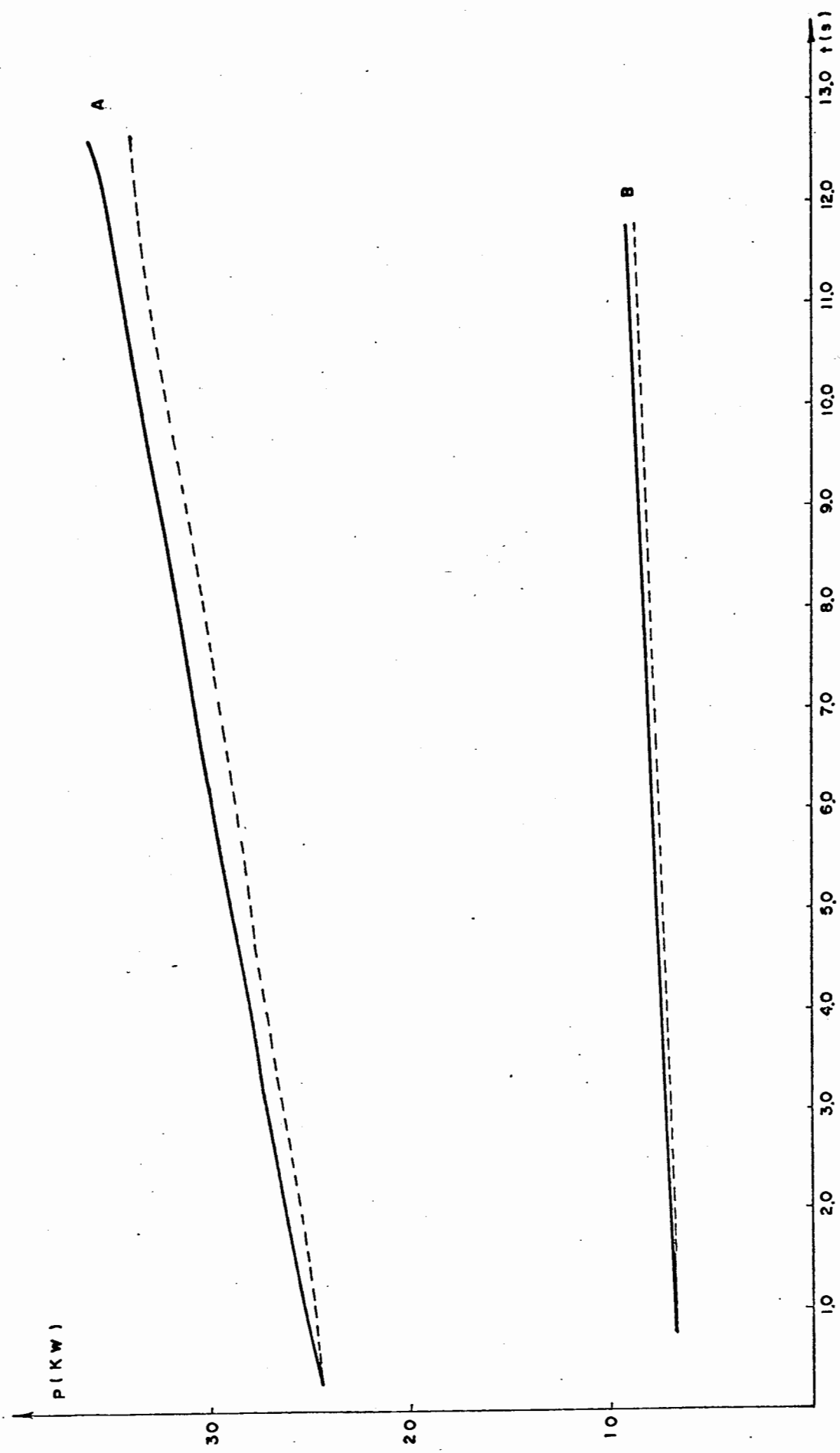


Figura (IV-7): Curvas envoltórias dos máximos (A) e mínimos (B) de potência do RNLF em função do tempo para amplitude de oscilação da altura do leito de 0.5 cm

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FÍSICA

pleno acordo com o comportamento de um reator com coeficientes de realimentação de temperatura negativos (14).

A pequena influência da realimentação termohidráulica é facilmente explicada, se considerarmos que as temperaturas médias do núcleo não variam de maneira apreciável para as variações de potência obtidas nos casos analisados, como pode ser observado na tabela (IV-2).

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Levando em consideração a ausência de dados experimentais com que comparar os resultados obtidos, pode-se apenas afirmar que os mesmos são qualitativamente corretos, visto o comportamento temporal das grandezas envolvidas ser fisicamente compatível com o tipo de perturbação induzida.

Mostrou-se que o método de Hansen, aplicado à resolução das equações de cinética puntual do RNLF, é eficiente e de convergência assintótica, uma vez que a matriz de discretização no caso mantém a mesma estrutura da matriz originalmente desenvolvida para reatores convencionais.

Na condição de operação em que foram obtidos os resultados analisados, o RNLF mostrou comportamento similar a um reator do tipo PWR, no sentido que em ambos a potência média cresce no tempo se o reator é sujeito a oscilações estacionárias de reatividade em torno da criticalidade, sendo que a potência média do RNLF cresce de modo mais rápido, dada a influência do termo adicional nas equações de cinética puntual, $u_s B_z$. Obviamente a condição de operação considerada neste estudo pode ser facilmente alterada com a utilização de boro solúvel ou a inserção de um anel absorvedor de neutrons.

Sugere-se para trabalhos futuros a análise do comportamento do RNLF em condições, operacionais e acidentais, mais realistas, assim como o desenvolvimento de um modelo de cinética

que incluia a dependência espacial do fluxo de neutrons na sua formulação. Seria desejável também um estudo no sentido de melhor avaliar os parâmetros térmicos do RNLF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SEFIDVASH, F. A Fluidized-Bed Nuclear Reactor Concept , Nuclear Technology, 71: 527-534. 1985.
- (2) VILHENA, M.T.M.B. Tese de Doutorado em Preparação. Porto Alegre, UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- (3) HANSEN, K.F., Koen, B.V., Little, Jr., W.W. Stable Numerical Solutions of the Reactor Kinetics Equations , Nuclear Science and Engineering, 22:51-59. 1965.
- (4) RAMMSY, J.E.M. Estudo da Reatividade do Reator Nuclear a Leito Fluidizado, Porto Alegre, UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Metalurgia e Materiais, 1985. 100p. Diss. Mestr. Engenharia de Energia.
- (5) HETRICK, D.L. Dynamics of Nuclear Reactors, Chicago and London, The University Chicago Press, 1971, 542p.
- (6) DUDERSTADT, J.J., Hamilton, L. J. Nuclear Reactor Analysis, New York, John Wiley & Sons, 1976. 650p.
- (7) GLASSTONE, S., Edlund, M.C. The Elements of Nuclear Reactor Theory. 12^o ed., Princeton, D. Van Nostrand Company, Inc., 1966. 416p.
- (8) MOLER, C., Van Loan, C. Nineteen Dubious Ways to Compute the Exponential of a Matrix, Society for Industrial and Applied Mathematics, 20(3):801-836. 1978.

- (9) FLATT, H.P. Collocation Methods for the Numerical Solution of the Reactor Kinetics Equation, IBM Nucl. Comp. Tech. Bull., 5, 1962. Citado em (3).
- (10) CLAEYSSSEN, J.R. Equaciones Diferenciales Matriciales , Porto Alegre, Ed. da UFRGS, 1985. 176p.
- (11) VARGA, R.S. Matrix Iterative Analysis, New Jersey , Prentice Hall, Inc., 1962. 322p.
- (12) SNEDDON, I.H. The Use of Integral Transforms, New York, Mac Graw Hill Book Company, 1973, 539p.
- (13) NAKATA, H. Cinethica - Programa para Análise de Transientes, São Paulo, - Ed. do IPEN-CNEN/SP, 1985. 43p.
- (14) EL WAKIL, M.M. Nuclear Heat Transport, New York, International Textbook Company, 1971. 502p.
- (15) HORNBECK, R.W. Numerical Methods, New York, Quantum Publishers, Inc., 1975. 310p.
- (16) ORTEGA, J.M. POOLE, Jr. W.G. An Introduction to Numerical Methods for Differential Equations, Massachusetts , Pitman Publishing Inc., 1981. 329p.
- (17) DAHLQUIST, G., Bjorck, A. Numerical Methods, Trad. Anderson, N., New Jersey, Prentice Hall, Inc., 1969. 573p.
- (18) AKCASU, Z. General Solutions of the Reactor Kinetic Equations without Feedback, Nuclear Science and Engineering, 3:456-467. 1958.

ANEXO A - EQUAÇÃO DA DIFUSÃO COM FRONTEIRA MÓVEL:

No Reator Nuclear a Leito Fluidizado em regime transiente o volume do núcleo varia com o tempo. Então a equação da difusão de neutrons na sua forma convencional não é válida, pois é deduzida considerando um volume constante. Neste caso a equação da difusão de neutrons é obtida a partir da seguinte análise (2).

Seja o balanço de neutrons num volume $V(t)$,

$$\left| \begin{array}{l} \text{variação da} \\ \text{densidade} \\ \text{de neutrons} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{produção de} \\ \text{neutrons em} \\ V(t) \end{array} \right| - \left| \begin{array}{l} \text{absorção de} \\ \text{neutrons em} \\ V(t) \end{array} \right| - \left| \begin{array}{l} \text{fuga de} \\ \text{neutrons em} \\ V(t) \end{array} \right|$$

ou seja:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} N(\mathbf{r}, t) dV = \int_{V(t)} S(\mathbf{r}, t) dV - \int_{V(t)} \Sigma_a \phi(\mathbf{r}, t) dV - \int_{V(t)} \text{div } \mathbf{J} dV \quad (\text{A-1})$$

Aplicando a lei de Fick em (A-1) resulta (5,6,7):

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} N(\mathbf{r}, t) dV = \int_{V(t)} S(\mathbf{r}, t) dV - \int_{V(t)} \Sigma_a \phi(\mathbf{r}, t) dV +$$

$$+ \int_{V(t)} DV^2 \phi(\mathbf{r}, t) dV \quad (A-2)$$

Sabendo que (2):

Sendo $V(t)$ uma região limitada pela superfície $S(t)$ e \mathbf{u}_s a velocidade de qualquer elemento da superfície $S(t)$ então:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} s(\mathbf{r}, t) dV = \int_{V(t)} \left[\frac{\partial}{\partial t} s(\mathbf{r}, t) \right] dV + \int_{V(t)} s(\mathbf{r}, t) [\mathbf{u}_s \cdot \mathbf{n}] dS \quad (A-3a)$$

e, aplicando o teorema da divergência de Gauss no último termo da direita da equação (A-3a) resulta:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} s(\mathbf{r}, t) dV = \int_{V(t)} \left[\frac{\partial}{\partial t} s(\mathbf{r}, t) + \text{div} [s(\mathbf{r}, t) \mathbf{u}_s] \right] dV \quad (A-3b)$$

Deste modo usando (A-3b) em (A-2) tem-se:

$$\int_{V(t)} \left[\frac{\partial}{\partial t} N(\mathbf{r}, t) + \text{div} [N(\mathbf{r}, t) \mathbf{u}_s] \right] dV = \int_{V(t)} \left[S(\mathbf{r}, t) - \right.$$

$$\left. - \Sigma_a \phi(\mathbf{r}, t) + DV^2 \phi(\mathbf{r}, t) \right] dV \quad (A-4)$$

ou

$$\int_{V(t)} \left[\frac{\partial N(\mathbf{r},t)}{\partial t} + \text{div} [N(\mathbf{r},t) \mathbf{u}_s] - S(\mathbf{r},t) + \Sigma_a \phi(\mathbf{r},t) - \right. \\ \left. - D \nabla^2 \phi(\mathbf{r},t) \right] dV = 0 \quad (\text{A-5})$$

Como o volume $V(t)$ é arbitrário, resulta:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi(\mathbf{r},t)}{\partial t} = D \nabla^2 \phi(\mathbf{r},t) - \frac{1}{v} \text{div} [\phi(\mathbf{r},t) \mathbf{u}_s] - \\ - \Sigma_a \phi(\mathbf{r},t) + S(\mathbf{r},t) \quad (\text{A-6})$$

que é a equação da difusão a um grupo de neutrons para um reator nuclear com fronteira móvel.

Observe-se que, se o volume do reator é constante no tempo, a velocidade da fronteira móvel \mathbf{u}_s é nula, anulando em consequência o termo $\text{div}[\phi(\mathbf{r},t) \mathbf{u}_s]$, recaindo portanto a equação (A-6) na forma convencional da equação da difusão de neutrons a um grupo, ou seja:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi(\mathbf{r},t)}{\partial t} = D \nabla^2 \phi(\mathbf{r},t) - \Sigma_a \phi(\mathbf{r},t) + S(\mathbf{r},t) \quad (\text{A-7})$$

ANEXO B - EQUAÇÕES DE CINÉTICA PUNTUAL PARA O RNLF:

Como no conceito de Reator Nuclear a Leito Fluidizado ocorre uma variação de volume no tempo somente na direção axial, então resulta a seguinte expressão para a equação (A-6):

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = D \nabla^2 \phi(\mathbf{r}, t) - \frac{u_s}{v} \frac{\partial \phi(\mathbf{r}, t)}{\partial z} - \Sigma_a \phi(\mathbf{r}, t) + S(\mathbf{r}, t) \quad (B-1)$$

onde u_s , no caso é a velocidade de variação da fronteira superior do leito na direção axial.

Usando em (B-1) a definição de fluxo de neutrons e considerando o termo de fonte em regime transiente como sendo devido tanto à fissão nuclear quanto a outro tipo de fonte de neutrons, ou seja,

$$S(\mathbf{r}, t) = (1-\beta) v \Sigma_f \phi(\mathbf{r}, t) + \sum_i \lambda_i C_i(\mathbf{r}, t) + q(\mathbf{r}, t) \quad (B-2)$$

obtêm-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} N(\mathbf{r}, t) &= D \nabla^2 N(\mathbf{r}, t) v - u_s \frac{\partial}{\partial z} N(\mathbf{r}, t) - \Sigma_a N(\mathbf{r}, t) v + \\ &+ (1-\beta) v \Sigma_f N(\mathbf{r}, t) v + \sum_i \lambda_i C_i(\mathbf{r}, t) + \\ &+ q(\mathbf{r}, t) \end{aligned} \quad (B-3)$$

No caso de um RNLF as hipóteses da cinética puntual são:

$$N(\mathbf{r}, t) = n(t) \chi(\mathbf{r}, z) = n(t) \phi(r) \cos(B_z z) \quad (\text{B-4a})$$

$$C_i(\mathbf{r}, t) = c_i(t) \chi(\mathbf{r}, z) = c_i(t) \phi(r) \cos(B_z z) \quad (\text{B-4b})$$

onde a função $\chi(\mathbf{r}, z)$ satisfaz a relação

$$\nabla^2 \chi(\mathbf{r}, z) + B^2 \chi(\mathbf{r}, z) = 0 \quad (\text{B-5})$$

Substituindo (B-4) na equação (B-3), integrando na direção axial no intervalo de 0 a $H/2$ e simplificando os termos comuns resulta:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} n(t) &= -D^2 B^2 n(t) v - \Sigma_a n(t) v + u_s B_z n(t) + \\ &+ (1-\beta) v \Sigma_f n(t) v + \sum_i \lambda_i c_i(t) + q(\mathbf{r}, t) \end{aligned} \quad (\text{B-6})$$

Colocando em evidência o termo $vn(t)$, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} n(t) &= vn(t) \left[-DB^2 - \Sigma_a + (1-\beta) v \Sigma_f + u_s B_z \right] + \\ &+ \sum_i \lambda_i c_i(t) + q(\mathbf{r}, t) \end{aligned} \quad (\text{B-7})$$

e lembrando que se define coeficiente de difusão como $D = L^2 \Sigma_a$, fatorando a equação (B-6) da maneira que segue:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} n(t) &= v \Sigma_a (1+L^2 B^2) \left[-1 + \frac{u_s B_z}{v \Sigma_a (1+L^2 B^2)} + \right. \\ &+ \left. (1-\beta) \frac{v \Sigma_f / \Sigma_a}{(1+L^2 B^2)} \right] n(t) + \sum_i \lambda_i c_i(t) \end{aligned} \quad (\text{B-8})$$

utilizando as definições de ℓ , k_e , ρ e Λ abaixo relacionadas

$$\ell = 1 / [v\Sigma_a(1+L^2B^2)] \quad (B-9a)$$

$$k_e = (v\Sigma_a/\Sigma_f) / (1 + L^2B^2) \quad (B-9b)$$

$$\rho = (k_e - 1) / k_e \quad (B-9c)$$

$$\Lambda = \ell / k_e \quad (B-9d)$$

e definindo $\bar{\rho} = \rho + \mathbf{u}_S B_Z \Lambda$, obtêm-se:

$$\frac{d}{dt} n(t) = \frac{\bar{\rho} - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_i \lambda_i c_i(t) + q(t) \quad (B-10)$$

Para obter a equação diferencial relativa a concentração de precursores de neutrons atrasados, supondo que os precursores permanecem no local de produção, é feito o balanço em $V(t)$:

$$\left| \begin{array}{l} \text{variação da} \\ \text{concentração} \\ \text{do precur-} \\ \text{sor em } V(t) \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{produção do} \\ \text{precursor} \\ \text{em } V(t) \end{array} \right| - \left| \begin{array}{l} \text{decaimento} \\ \text{do precur-} \\ \text{sor em} \\ V(t) \end{array} \right|$$

ou

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} c_i(\mathbf{r}, t) dV = \int_{V(t)} P_i(\mathbf{r}, t) dV - \int_{V(t)} D_i(\mathbf{r}, t) dV \quad (B-11)$$

Aplicando (A-3) em (B-11) obtêm-se:

$$\int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} C_i(\mathbf{r}, t) dV + \int_{V(t)} \text{div} [C_i(\mathbf{r}, t) \mathbf{u}_s] dV = \int_{V(t)} P_i(\mathbf{r}, t) dV - \int_{V(t)} D_i(\mathbf{r}, t) dV \quad (\text{B-12})$$

ou

$$\int_{V(t)} \left[\frac{\partial}{\partial t} C_i(\mathbf{r}, t) + \text{div} [C_i(\mathbf{r}, t) \mathbf{u}_s] - P_i(\mathbf{r}, t) + D_i(\mathbf{r}, t) \right] dV = 0 \quad (\text{B-13})$$

Como o volume é arbitrário, resulta:

$$\frac{\partial}{\partial t} C_i(\mathbf{r}, t) + \text{div} [C_i(\mathbf{r}, t) \mathbf{u}_s] - P_i(\mathbf{r}, t) + D_i(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (\text{B-14})$$

onde os termos de produção e decaimento do precursor de neutrons atrasados do tipo i , $P_i(\mathbf{r}, t)$ e $D_i(\mathbf{r}, t)$ são respectivamente:

$$P_i(\mathbf{r}, t) = \beta_i \nu \Sigma_f \nu N(\mathbf{r}, t) \quad (\text{B-15a})$$

$$D_i(\mathbf{r}, t) = \lambda_i C_i(\mathbf{r}, t) \quad (\text{B-15b})$$

Usando as definições (B-4) para $N(\mathbf{r},t)$ e $C_i(\mathbf{r},t)$, integrando na direção axial de 0 a $H/2$, tem-se:

$$\frac{d}{dt} c_i(t) = \beta_i v \lambda_f v n(t) - \lambda_i c_i(t) + u_{s,z} B_z c_i(t) \quad (B-16)$$

Definindo $\bar{\lambda}_i = \lambda_i - u_{s,z} B_z$ e usando as definições (B-9), resulta:

$$\frac{d}{dt} c_i(t) = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \bar{\lambda}_i c_i(t) \quad (B-17)$$

Então, considerando que a produção de neutrons se deve exclusivamente à fissão e ao decaimento dos produtos de fissão, resultam as seguintes equações para a cinética puntual de um RNLF:

$$\frac{d}{dt} n(t) = \frac{\bar{\rho}(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_i \lambda_i c_i(t) \quad (B-18a)$$

$$\frac{d}{dt} c_i(t) = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \bar{\lambda}_i c_i(t) \quad (B-18b)$$

onde $i = 1, 2, 3, \dots, g$, para g grupos de precursores de neutrons atrasados.

ANEXO C - O CÓDIGO "CINERNLF":

Os códigos disponíveis atualmente para a análise de transientes são adequados para reatores convencionais, ou seja, reatores cujo volume do núcleo é constante no tempo e, tendo em vista que no caso de um RNLF a fronteira superior do leito fluidizado é móvel, de modo que o volume do núcleo é variável no tempo, foi necessário desenvolver um código específico para a análise do transiente deste reator.

C.1. Descrição do Código:

O código "CINERNLF" foi escrito para um microcomputador do tipo PC, em linguagem FORTRAN 77 com dupla precisão.

O código possui um programa principal e uma subrotina.

No programa principal são efetuadas as entradas e saídas de dados, os cálculos preliminares referentes à avaliação dos parâmetros utilizados na subrotina e os cálculos termohidráulicos do reator. Os cálculos termohidráulicos são efetuados utilizando o método de Euler explícito, cujo algoritmo se encontra desenvolvido no capítulo III.

A subrotina CINET efetua os cálculos de cinética puntual do RNLF, baseado no método de Hansen, utilizando o algoritmo desenvolvido no capítulo II.

C.2. Descrição dos dados de entrada:

A entrada de dados do código "CINERNLF" é efetuada através de um arquivo de dados INPUT.DAT, cuja descrição de parâmetros é a seguinte:

- TITTLE - O título pode ter até 72 caracteres alfanuméricos e em geral contém informações sobre o caso analisado.
- NGR - Indica o número de grupos de precursores de neutrons atrasados sendo que no caso do U^{235} recomenda-se entrar NGR=235 e usar os valores internos do programa.
- NN - Indica o número de intervalos de discretização do combustível que pode variar entre 3 e 10.
- IFLUX - Indica o regime do refrigerante, o qual para o caso do RNLF é sempre IFLUX=1 o que indica fluxo constante de refrigerante.
- IEP - Indica a opção do caso RNLF com:
0 - variação linear da velocidade da fronteira
1 - oscilação senoidal da altura do leito
- ISM - Indica a opção de simulação de PWR com reatividade equivalente a um RNLF:
0 - simulação de PWR, com altura fixa
1 - simulação de RNLF, com altura variável
- AL(I) - Indica as constantes de decaimento radioativo do combustível, e no caso de U^{235} recomenda-se o uso dos valores internos do programa designados na op-

ção NGR.

- BETA(I) - Indica as frações de precursores de neutrons atrasados do combustível e no caso de U^{235} , recomenda-se o uso dos valores internos do programa designados na opção NGR.
- PFAT - Indica o fator de pico, simulando um canal quente.
- QA - Indica a potência inicial do reator.
- QAIN - Indica a energia acumulada inicial do reator.
- FREQ - Indica a frequência das oscilações da altura do leito.
- RTUBO - Indica o raio do núcleo do reator.
- ALTO - Indica a altura de colapso do reator.
- EPO - Indica a porosidade de colapso do reator.
- CDIF - Indica o coeficiente de difusão de neutrons no reator.
- VFRONT - Indica a velocidade de deslocamento da altura do leito.
- DALT - Indica a amplitude de oscilação da altura do leito.
- EPO - Indica a porosidade de operação do reator.
- ALFAF - Indica o coeficiente de temperatura do combustível.
- ALFAM - Indica o coeficiente de temperatura do moderador.
- KE's - Indicam os coeficientes do polinômio que avalia k_{efetivo} .
- LI's - Indicam os coeficientes do polinômio que avalia "lifetime".

- TMAX - Indica o tempo de duração do transiente.
- DTO - Indica o intervalo de tempo para os cálculos termo-hidráulicos.
- DTPRT - Indica o intervalo máximo de tempo permitido sem que haja saída de resultados.
- FQPRT - Indica a máxima variação fracional de potência sem que haja saída de resultados.
- M's - Indicam as massas de combustível, revestimento e refrigerante. No caso de IFLUX=1, MM indica o fluxo de refrigerante no núcleo do reator.
- CP's - Indicam os calores específicos do combustível, re - vestimento e refrigerante.
- RF - Indica o raio da esfera de combustível nua.
- RC - Indica o raio total da esfera de combustível com revestimento.
- DC - Indica a espessura do revestimento.
- TVCC - Indica a temperatura limite de validade do coefi - ciente de convecção do refrigerante, HM.
- KF - Indica a condutividade térmica do combustível.
- KC - Indica a condutividade térmica do revestimento.
- HG - Indica o coeficiente de convecção do "gap".
- HM - Indica o coeficiente de convecção do refrigerante.
- HDNB - Indica o coeficiente de convecção a ser utilizado para o refrigerante após a temperatura do revesti - mento ter atingido a temperatura TVCC.

- T's - Indicam as temperaturas médias iniciais do combustível, revestimento e refrigerante. No caso de IFLUX=1, TMO deve ser a temperatura de entrada do fluxo de refrigerante.
- PT's - Indicam as temperaturas médias iniciais do canal quente.
- TFR(I)'s - Indicam a distribuição de temperaturas no combustível para o canal médio.
- PTFR(I)'s - Indicam a distribuição de temperaturas no combustível para o canal quente.

Todos os dados de entrada acima descritos devem seguir rigorosamente o Sistema Internacional de Unidades (m, Kg, W, s, °C, ...) e a sequência a seguir discriminada.

LINHA	FORMATO	ENTRADA
01	A72	TITLE
02	5I3	NGR,NN,IFLUX,IEP,ISM
03	6F12.6	AL(I), I=1,NGR (suprimida no caso NGR=235)
04	6F12.6	BETA(I), I=1,NGR (suprimida no caso NGR=235)
05	6F12.6	PFAT,QA,QAINT,EPO,ALFAF,ALFAM
06	6F12.6	FREQ,RTUBO,ALTO,EPO,CDIF,VFRONT (suprimida no caso IEP=1)
07	6F12.6	FREQ,RTUBO,ALTO,EPO,CDIF,DALT (suprimida no caso IEP=0)
08	6F12.6	KEO,KE1,KE1,KE3

09	6F12.6	LIO,LI1,LI2,LI3
10	6F12.6	TMAX,DTO,DTPRT,FQPRT
11	6F12.6	MF,MC,MM,CPF,CPC,CPM
12	6F12.6	RF,RC,DC,TCVCC
13	6F12.6	KF,KC,HG,HM,HDNB
14	6F12.6	TFO,TCO,TMO,PTFO,PTCO,PTMO (caso se deseje entrar com o perfil de temperaturas no combustível, deve-se entrar TFO=0.0 e anexar as linhas 15 e 16)
15	6F12.6	TFR(I)'s, I=1,NN
16	6F12.6	PTFR(I)'s, I=1,NN

C.3. Descrição dos dados de saída:

Nas duas primeiras páginas impressas estão contidos os dados lidos pelo programa.

As saídas de temperaturas e energias são efetuadas primeiramente para o canal médio e nas duas linhas seguintes para o canal quente.

Na primeira linha do canal médio são impressas a potência e a energia acumulada, ambas no núcleo, bem como as temperaturas máximas e médias nas regiões de interesse. Observe-se que a temperatura máxima do revestimento é idêntica à temperatura média já que apenas uma temperatura é calculada nessa região.

Na segunda linha do canal médio "TF(I)=" refere-se ao perfil TFR(I), I=1,NN de temperatura no combustível.

Os mesmos dados são impressos para o canal quente, exceto a potência e a energia acumulada.

Em anexo são também impressos a reatividade padrão, que designa a reatividade devida exclusivamente à porosidade, a reatividade total média, que designa a reatividade corrigida pela realimentação termohidráulica e pelo termo $u_s B_z$ avaliada pela média aritmética entre a reatividade atual e a do passo anterior e, o termo $u_s B_z$.

No final da listagem é impressa a concentração final de precursores de neutrons atrasados.

C.4. Listagem e exemplo:

Nas próximas páginas podem ser vistos a listagem do código, bem como um exemplo do arquivo de dados de entrada referente a um caso rodado para o RNLF com amplitude de oscilação da altura do leito de 0.5cm e considerando realimentação termohidráulica com a respectiva saída de resultados.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FÍSICA
CAIXA DE CORREIO 20091-900
RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
15048-900

900000

```
C*****
C  PROGRAMA PARA O CALCULO DE CINETICA PUNTUAL ACOPLADO A      *
C  CALCULO TERMOHIDRAULICO UNIDIMENSIONAL ( DIRECAO RADIAL )  *
C  COM FLUXO CONSTANTE DE REFRIGERANTE.                      *
C  EFETUA CALCULOS DE TEMPERATURA MAXIMA DO COMBUSTIVEL E A   *
C  TEMPERATURA MAXIMA DO REVESTIMENTO.                       *
C  *
C  TODOS ESTES CALCULOS SAO FEITOS PARA O CANAL MEDIO E PARA O *
C  CANAL QUENTE ( ONDE OCORRE O PICO DE POTENCIA )          *
C*****
C
C  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
C  REAL*8 MF,MM,MC,KF,KC,LFTT,KE0,KE,KE0,KE1,KE2,KE3,LIFE0,LIFE,LID,
C  &LI1,LI2,LI3
C  CHARACTER*72 TITLE,BLANK
C
C  COMMON/CINE1/ C,QA
C  COMMON/CINE2/ AL(6),BETA(6),BETAT,ALAMM,NGR,VFSUM
C
C  DIMENSION C(6), CI(6)
C  DIMENSION R(10), DR(10), AF(10), TFR(10), TFR0(10), PTFR(10),
C  &PTFR0(10)
C
C  ARG=1.0
C  PI=4.0*DATAN(ARG)
C
C  AL(1)=0.0124
C  AL(2)=0.0365
C  AL(3)=0.111
C  AL(4)=0.301
C  AL(5)=1.14
C  AL(6)=3.01
C
C  BETA(1)=0.000214
C  BETA(2)=0.001423
C  BETA(3)=0.001274
C  BETA(4)=0.002568
C  BETA(5)=0.000748
C  BETA(6)=0.000273
C
C  *** EM GERAL F= COMBUSTIVEL
C  *             h= MODERADOR
C  *             C= REVESTIMENTO
C
C  *** EXEMPLO: MF= MASSA DO COMBUSTIVEL
C  *            MM= MASSA DO MODERADOR
C  *            MC= MASSA DE REVESTIMENTO
C
C  *** NOTA :
C  *** VARIAVEIS EXCLUSIVAS DO CANAL QUENTE COMECAM POR P ***
C
C  OPEN(5,FILE='INPUT.DAT',STATUS='OLD')
C
C  READ(5,11) TITLE
10  FORMAT(6F12.6)
11  FORMAT(A72)
```

```

12 FORMAT(4I3)
C
14 CONTINUE
  WRITE(*,21) TITLE
21 FORMAT(' ',72('-')/'0',A72/'0',72('-'))
C
  READ(5,12,ERR=2000,END=2000) NGR,MN,IEP,ISM
C
  IF(MN.LE.3) MN=3
  IF(MN.GE.10) MN=10
C
  IF(NGR.EQ.235) BOTO 30
C
  READ(5,10) (AL(I),I=1,NGR)
  READ(5,10) (BETA(I),I=1,NGR)
C
30 CONTINUE
C
  READ(5,10) PFAT,QA,QAIN,EP0,ALFAF,ALFAM
  IF(PFAT.EQ.0.0) PFAT=1.0
C
  IF(NGR.EQ.235) NGR=6
C
  BETAT=0.0
  DO 211 I=1,NGR
    BETAT=BETAT+BETA(I)
211 CONTINUE
C
  WRITE(*,22) (I,AL(I),BETA(I), I=1,NGR)
22 FORMAT(///,' GRUPO  LAMBDA      BETA  I',
&/' ',13,2X,1P,E13.5,E13.5))
  WRITE(*,222) BETAT
222 FORMAT(' ',31('-')/ ' BETA  TOTAL : ',1X,1P,E13.5)
C
  IF(IEP.EQ.0) READ(5,10) FREQ,RTU80,ALTO,EP0,CDIF,VFRONT
  IF(IEP.EQ.1) READ(5,10) FREQ,RTU80,ALTO,EP0,CDIF,DALT
  READ(5,10) KE0,KE1,KE2,KE3
  READ(5,10) LI0,LI1,LI2,LI3
C
  LIFE0=LI0+LI1*EP0+LI2*EP0*EP0+LI3*EP0*EP0*EP0
  KE0=KE0+KE1*EP0+KE2*EP0*EP0+KE3*EP0*EP0*EP0
  ALAM0=LIFE0/KE0/100000.
  RHDT0=(KE0-1)/KE0
  AREA=PI*RTU80*RTU80
  ALTO=ALTO*(1.0-EP0)/(1.0-EP0)
C
  WRITE(*,23) ALAM0
23 FORMAT(///' TEMPO INICIAL DE GERACAO DOS NEUTRONS:',1P,E13.5,' S')
C
  WRITE(*,25)EP0,ALFAF,ALFAM,ALTO,FREQ
25 FORMAT(///,' EP0  :',1P,E13.5,' /
&' ALFAF :',E13.5,' /GRAUS C' /
&' ALFAM :',E13.5,' /GRAUS C' /
&' ALTO  :',E13.5,' "/
&' FREQ  :',E13.5,' /S')
C
  IF(IEP.EQ.0) WRITE(*,09)VFRONT

```

```

09 FORMAT(///, ' VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DA FRONTEIRA :',
& 1P,E13.5, ' M/S')
IF(IEP.EQ.1) WRITE(*,08)DALT
08 FORMAT(///, ' AMPLITUDE DE OSCILACAO DA FRONTEIRA :',
& 1P,E13.5, ' M')
C
C *** DT= INTERVALO MAXIMO PARA EULER (SEG) ***
C *** TMAX= TEMPO MAXIMO DO ACIDENTE (SEG) ***
C *** DTPRT= INTERVALO MAXIMO PARA PRINTS(SEG) ***
C *** FQPR= FRACAO MAXIMA ENTRE POTENCIAS PARA PRINT ***
C
READ(5,10) TMAX,DTO,DTPRT,FQPR
READ(5,10) MF,MC,MM,CPF,CPC,CPM
READ(5,10) RF,RC,DC,TCVCC
IF(TCVCC.LE.0.0) TCVCC=1000.
READ(5,10) KF,KC,HG,HH,HONB
PHM=H*
READ(5,10) TFO,TCO,TMO,PTFO,PTCO,PTMO
IF(PTFO.LT.TFO) PTFO=TFO
IF(PTCO.LT.TCO) PTCO=TCO
IF(PTMO.LT.TMO) PTMO=TMO
IF(TFO.LE.0.0) READ(5,10) (TFR(I),I=1,NH)
IF(PTFO.LE.0.0) READ(5,10) (PTFR(I),I=1,NH)
C
C *** LFTT= NUMERO MEDIO DE ESFERAS DE COMBUSTIVEL NO REATOR ***
C *** HG= COEFICIENTE DE CONVECCAO DO GAP ***
C
WRITE(*,262)
IF(IEP.EQ.0) WRITE(*,263)
IF(IEP.EQ.1) WRITE(*,264)
IF(ISM.EQ.0) WRITE(*,265)
262 FORMAT(/// ' PROBLEMA COM FLUXO DE REFRIGERANTE CONSTANTE')
263 FORMAT(/// ' PROBLEMA COM VARIACAO LINEAR DA FRONTEIRA')
264 FORMAT(/// ' PROBLEMA COM VARIACAO SENDIDAL DA FRONTEIRA')
265 FORMAT(/// ' SIMULACAO DE "PWR" COM REATIVIDADE EQUIVALENTE')
C
WRITE(*,26) MF,MC,MM,CPF,CPC,CPM
26 FORMAT(/// ' MASSA DO COMBUSTIVEL :',
& F12.2,12X, 'KG/'
& ' MASSA DO REVESTIMENTO :',F12.2,12X, 'KG/'
& ' FLUXO DO MODERADOR :',F12.2,12X, 'KG/SEG/'
& ' CALOR ESPECIFICO DO COMBUSTIVEL :',F12.2,12X, 'J/KG/C/'
& ' CALOR ESPECIFICO DO REVESTIMENTO :',F12.2,12X, 'J/KG/C/'
& ' CALOR ESPECIFICO DO MODERADOR :',F12.2,12X, 'J/KG/C')
C
VESF=(1.0-EP0)*ALTO*AREA
LFTT=(3.0*VESF)/(4.0*PI*RC*RC*RC)
C
WRITE(*,27) RF,RC,DC,LFTT,RTUBO,VESF,KF,KC,HG,HH,HONB
27 FORMAT(' RAO DO COMBUSTIVEL :',
& 3P,F14.4,10X, 'MM/'
& ' RAO DO REVESTIMENTO :',3P,F14.4,10X, 'MM/'
& ' ESPESSURA DO REVESTIMENTO :',3P,F14.4,10X, 'MM/'
& ' NUMERO MD. DE ESFERAS DE COMBUSTIVEL :',0P,F14.4,10X, 'ESFERAS/'
& ' RAO DO TUBO :',0P,F14.4,10X, 'MM/'
& ' VOLUME DE ESFERAS DE COMBUSTIVEL :',0P,F14.4,10X, 'M3/'
& ' CONDUTIVIDADE DO COMBUSTIVEL :',0P,F12.2,12X, 'W/M/C/')

```

```

&' CONDUTIVIDADE DO REVESTIMENTO      :',0P,F12.2,12X,'W/M/C'/
&' COEFICIENTE DE CONVECCAO DO GAP     :',0P,F11.1,13X,'W/M2/C'/
&' COEFICIENTE DE CONVECCAO DO MODERADOR :',0P,F11.1,13X,'W/M2/C'/
&' COEFICIENTE DE CONVECCAO EM EBULICAO :',0P,F11.1,13X,'W/M2/C')
C
WRITE(*,29) TCVCC
29 FORMAT('/// CONVECCAO COM EBULICAO A PARTIR DE :',F10.2,
&' GRAUS C NO REVESTIMENTO' )
C
WRITE(*,28) TMAX, TFO,PTFO,TCO,PTCO,TMO,PTMO,QA,PFAT
28 FORMAT('/// ACIDENTE DO TRANSIENTE COM DURACAO DE :',F10.4,
&' SEGUNDOS '///
&' TEMPERATURAS INICIAIS'/
&          22X,' MEDIAS',1X,' DO PICO'/
&' COMBUSTIVEL      :',2X,F8.2,' C',1X,F8.2,' C'/
&' REVESTIMENTO     :',2X,F8.2,' C',1X,F8.2,' C'/
&' MODERADOR        :',2X,F8.2,' C',1X,F8.2,' C'///
&' POTENCIA INICIAL :',4X,1P,E13.5,' WATT'/
&' FATOR DE PICO    :',1X,0P,F10.3)
C
C   *** INICIALIZA TFR(I), I=1,NN, SE TFO.NE.0.0 ***
C
IF(TFO.LE.0.0) GOTO 39
C
DO 38 I=1,NN
TFR(I)=TFO
PTFR(I)=PTFO
38 CONTINUE
C
39 CONTINUE
C
SUM=0.0
PSUM=0.0
C
DO 37 I=1,NN
SUM=SUM+TFR(I)
PSUM=PSUM+PTFR(I)
37 CONTINUE
C
TFO=SUM/NN
PTFO=PSUM/NN
C
C   *** INICIALIZAR C(I), I=1,NGR ***
C
FACT=QA/ALAM0
C
DO 40 I=1,NGR
C(I)=FACT*BETA(I)/AL(I)
40 CONTINUE
C
41 CONTINUE
C
WRITE(*,24) (I,C(I),I=1,NGR)
24 FORMAT('/// CONCENTRACAO INICIAL DOS PRECURSORES (WATT)'
&' //' GRUPO CONCENTRACAO '(I4,3X,1P,E13.5))
C
WRITE(*,001) OTRPT,FQPR

```

```

001 FORMAT(///' SAIDAS SERAO EXECUTADAS NO MAXIMO A CADA', F6.2,
& ' SEGUNDOS', ' OU ANTES DE ',F6.2,
& ' VEZES AUMENTO DE POTENCIA')
C
C *** CALCULO DE AREAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR DA ESFERA, AFS, E DO
C REVESTIMENTO, AC ***
C
AFS=4.0*PI*RF*RF*LFTT
AC=4.0*PI*RC*RC*LFTT
C
C *** CALCULO DE RAIOS DO INTERVALO TAL QUE
C VOLUME E CONSTANTE EM NN INTERVALOS ***
C
DNF=MF/NN
C
4/3*PI*R(I)^3= I*DV
C
DO 803 I=1,NN
R(I)=(I*RF*RF*RF/NN)**(1./3.)
803 CONTINUE
C
DR(1)=R(1)
C
DO 804 I=2,NN
DR(I)=R(I)-R(I-1)
804 CONTINUE
C
AF(1)=(4.0*R(1)*R(1)*PI*LFTT)/(2.0**(1./3.))
C
DO 805 I=2,NN
RI3=(R(I)*R(I)*R(I)+R(I-1)*R(I-1)*R(I-1))/2.0
RI2=(RI3)**(1./3.)
AF(I)=4.0*PI*RI2*RI2*LFTT
805 CONTINUE
C
WRITE(*,806) (I, I=1,NN)
806 FORMAT(///' AS TEMPERATURAS SAO CALCULADAS NOS PONTOS ',10I8)
C
WRITE(*,807) (R(I), I=1,NN)
807 FORMAT('0', ' COM LOCALIZACAO RADIAL DE (MM)',
& 17X,10(3P,F8.4))
C
C *** CRITERIO PARA MAXIMO DT ***
C
DTMAX1=DNF*CPF/(AF(NN)*KF/DR(NN)+HG*AFS)*0.5
DTMAX2=MC*CPG/(AFS*HG+AC*HM)
DTMAX=DTMAX1
IF(DTMAX1.GE.DTMAX2) DTMAX=DTMAX2
C
DT=DT0
IF(DT.GT.0.10*DTMAX) DT=0.10*DTMAX
C
C *****
C DT=0.001
C *****
C
WRITE(*,808) DT0,DTMAX,DT

```

```

808 FORMAT(///' *** O B S E R V A C A O ***'//
& ' INTERVALO DE TEMPO SOLICITADO PELO USUARIO PARA CALCULOS',
& ' TERMOHIDRAULICOS = ',F12.8,' SEGUNDOS'/
& ' INTERVALO DE TEMPO MAX. PERMITIDO PELO PROGRAMA PARA SE OBTER',
& ' CONVERGENCIA = ',F12.8,' SEGUNDOS'/
& ' INTERVALO DE TEMPO EFETIVAMENTE UTILIZADO PELO PROGRAMA PARA',
& ' OS CALCULOS = ',F12.8,' SEGUNDOS')
C
C   *** INICIALIZANDO AS TEMPERATURAS ***
C
      TOL=TFR(1)
      TF=TFC
      TC=TCO
      TM=TKC
      PTOL=PTFR(1)
      PTF=PTFC
      PTC=PTCO
      PTM=PTKC
C
C   *** INICIO DO PROCESSO DE CONTAGEM DE TEMPO DO ACIDENTE ***
C
      T=0.0
C
      IT=0
      ITMAX=10
      IF(NN.GE.6) ITMAX=0
C
      DLT=0.0
C
      IF(IEP.EQ.0) GOTO 999
C
      OMG=2.0*PI*FREQ
      VF0=DLT*OMG
      VFBU0=ISM*(VF0*PI/(ALTO+6.0*CDIF*0.7!))
C
999 CONTINUE
      TART=T
      QPRT=QA
C
899 CONTINUE
      T=T+DT
      IF(T.GE.TMAX) GOTO 1990
C
C   *** CALCULO DA REATIVIDADE E DA NOVA POTENCIA EM T+DT ***
C
      IF(IEP.EQ.0) GOTO 555
C
      DLT=DLT*SENO(OMG*T)
      VF=DLT*OMG*COSE(OMG*T)
      GOTO 666
C
555 CONTINUE
      VF=VF*DT
      DLT=VF*T
C

```

666 CONTINUE

EP=1.0-VESF/(AREA*(ALTO+DLT))
LIFE=L10+L11*EP+L12*EP*EP+L13*EP*EP*EP
KE=KED+KE1*EP+KE2*EP*EP+KE3*EP*EP*EP
ALAM=LIFE/KE/100000.
RHDI=(KE-1.0)/KE
ALT=ALTO+DLT+6.0*CDIF*0.71
BUCZ=PI/ALT
VFBU=ISM*(VF*BUCZ)

C

RHOT=RHDI+VFBU*ALAM+ALFAF*(TF-TF0)+ALFAM*(TM-TM0)

C

RHOTM=(RHOT+RHOT0)/2.0
VFBU0=(VFBU+VFBU0)/2.0
ALAM0=(ALAM+ALAM0)/2.0

C

VF0=VF
RHOT0=RHOT
VFBU0=VFBU
ALAM0=ALAM

CALL CINET(RHOTM,DT,ITCIN,W0)

C

C

*** CALCULO DE POTENCIA INTEGRADA ***

C

QAIN=QAIN+QA*DT
DQA=QA/NN
PQA=PFAT*QA
PDQA=PFAT*DQA

C

C

*** CALCULO DE NOVAS TEMPERATURAS ***

C

C

*** C O M B U S T I V E L ***

C

QEX=AF(1)*KF*(TCL-TFR(1))/DR(1)
TCL=TCL+DT*(0.97*DQA-2.0*QEX)/(DMF*CPF)

C

PQEX=AF(1)*KF*(PTCL-PTFR(1))/DR(1)
PTCL=PTCL+DT*(0.97*PDQA-2.0*PQEX)/(DMF*CPF)

C

NN1=NN-1

C

DO 906 I=1,NN1
QIN=QEX
QEX=AF(I+1)*KF*(TFR(I)-TFR(I+1))/DR(I+1)
TFR(I)=TFR(I)+DT*(0.97*DQA+QIN-QEX)/(DMF*CPF)

C

PQIN=PQEX
PQEX=AF(I+1)*KF*(PTFR(I)-PTFR(I+1))/DR(I+1)
PTFR(I)=PTFR(I)+DT*(0.97*PDQA+PQIN-PQEX)/(DMF*CPF)

906 CONTINUE

C

QIN=QEX
QEX=AFS*HG*(TFR(NN)-TC)
TFR(NN)=TFR(NN)+DT*(0.97*DQA+2.0*QIN-2.0*QEX)/(DMF*CPF)

C

PQIN=PQEX


```

PQEX=AFS*HG*(PTFR(NN)-PTC)
PTFR(NN)=PTFR(NN)+DT*(0.97*PQA+2.0*PQIN-2.0*PQEX)/(DH*CPF)
E
DO 9061 I=1,NN
TFR(I)=TFR(I)
PTFR(I)=PTFR(I)
9061 CONTINUE
C
C *** R E V E S T I M E N T O ***
C
IF(TC.GT.TCVCC) HM=HONB
IF(PTC.GT.TCVCC) PHM=HONB
QIN=QEX
QEX=AC*HM*(TC-TM)
TC=TC+DT*(QIN-QEX)/(MC*CPD)
C
PQIN=PQEX
PQEX=AC*PHM*(PTC-PTH)
PTC=PTC+DT*(PQIN-PQEX)/(MC*CPC)
C
C *** M O D E R A D O R ***
C
DTFLUX=DT
C
DTFLUX=1.0
TM=TM0
TM=TM+DTFLUX*(0.03*QA+QEX)/(MM*CPM)
TM=0.5*(TM+TM0)
C
PTH=PTH0
PTH=PTH+DTFLUX*(0.03*PQA+PQEX)/(MM*CPM)
PTH=0.5*(PTH+PTH0)
C
C *** CALCULO DE MAXIMA TEMPERATURA E TF(MEDIA NO COMBUSTIVEL) ***
C
TFMAX=TCL
TF=0.5*TCL
PTFMAX=PTCL
PTF=0.5*PTCL
C
DO 907 I=1,NN
TF=TF+TFR(I)
IF(TFMAX.LT.TFR(I)) TFMAX=TFR(I)
PTF=PTF+PTFR(I)
IF(PTFMAX.LT.PTFR(I)) PTFMAX=PTFR(I)
907 CONTINUE
C
TF=TF-0.5*TFR(NN)
TF=TF/N
PTF=PTF-0.5*PTFR(NN)
PTF=PTF/N
C
C *** CHECK PARA PRINT ***
C
IF(DABS(T-TPRT).GE.DTPRT) GOTO 901
IF(DABS(QA/QPRT).GE.FQPRT) GOTO 901
IF(DABS(QPRT/QA).GE.FQPRT) GOTO 901

```

```

C
C      GOTO 899
C
C      *** SAIDA DOS RESULTADOS ***
C
C      901 CONTINUE
C          IT=IT+1
C          IF(IT.EQ.1) WRITE(*,802)
C      802 FORMAT('1'/1X,'      TEMPO',6X,'POTENCIA',5X,'ENERGIA',
C          & 6X,' TF. MAX ',4X,' TC. MAX ',4X,' TF. MED ',
C          & 4X,' TC. MED ',4X,' TM. MED ',4X,' IT. CINET',
C          & 4X,' FREQUENCIA ',)
C
C          IF(IT.GE.ITMAX) IT=0
C
C          WRITE(*,902) T,QA,QAIN,TFMAX,TC,TF,TC,TM,ITCIN,W0
C      902 FORMAT('0',1X,F9.4, 7(1P,E14.5),7X,17,1X,1P,E14.5)
C
C          WRITE(*,904) TCL,(TFR(I), I=1,NM)
C      904 FORMAT(' ',15X,' TF(I)= ',(1X, 6(1P,E14.5)))
C
C          WRITE(*,903) PTFMAX,PTC,PTF,PTC,PTM
C      903 FORMAT(' ',15X,' C A N A L Q U E N T E',5(1P,E14.5))
C
C          WRITE(*,904) PTCL,(PTFR(I), I=1,NM)
C
C          WRITE(*,905) RHO1,RHOTM,VFB0
C      905 FORMAT(' ',15X,' REATIVIDADE PADRAO =',1P,E14.5/
C          & 16X,' REATIVIDADE TOTAL MEDIA =',1P,E14.5/
C          & 16X,' VFB0 =',1P,E14.5,'/S')
C
C      GOTO 999
C
C      1990 CONTINUE
C          WRITE(*,1992) (I,C(I), I=1,NGR)
C      1992 FORMAT(///' CONCENTRACAO FINAL DOS PRECURSORES (WATT)'
C          & //' GRUPO CONCENTRACAO'/(14,3X,1P,E13.5))
C
C      2000 CONTINUE
C          STOP
C          END
C
C      SUBROUTINE CINET(RHOTM,DT,IT,W0)
C
C          IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
C
C          COMMON/CINE1/C,GA
C          COMMON/CINE2/AL(6),BETA(6),BETAT,ALAMM,NGR,VFBUM
C
C          DIMENSION C(6),CI(6)
C
C          ARHOT=DABS(RHOTM)
C
C          IF(ARHOT.LE.1.E-10) RETURN
C
C          RBL=(RHOTM-BETAT)/ALAMM

```

```

      DO 19 I=1,NGR
      CI(I)=C(I)
19 CONTINUE
C
      QAI=QA
C
C      *** CALCULO DE WD (-X) ***
C
      X1=0.0
      X3=0.0
      IT=0
      NT=0
      NC=0
C
      DEPS=1.E-07
      REF=5.0*BETAT
C
      IF(RHOTM.GT.REF.OR.RHOTM.LT.-REF) GOTO 30
C
      X1=- (AL(1)-VFBUM)+DEPS
      X3=9.*BETAT/ALAMM
C
      X=VFBUM
C
20 CONTINUE
      SUM=0.0
      SUM2=0.0
C
      DO 100 I=1,NGR
      DSUM=BETA(I)/(X+AL(I)-VFBUM)
      SUM=SUM+DSUM
      SUM2=SUM2+DSUM/(X+AL(I)-VFBUM)
100 CONTINUE
C
      FX=X*ALAMM+(X-VFBUM)*SUM-RHOTM
      FLX=ALAMM+SUM-(X-VFBUM)*SUM2
      FFL=FX/FLX
      X=X-FFL
C
      NC=NC+1
C
      IF(DABS(FFL).LT.10.0*DEPS) GOTO 40
C
      IF(X.GT.X3) X=X3
      IF(X.LT.X1) NT=NT+1
      IF(X.LT.X1) X=X1
C
      IF(NT.GT.9) GOTO 40
C
      GOTO 20
C
30 CONTINUE
      X=- (AL(1)-VFBUM)+DEPS
C
      IF(RHOTM.GT.5.0*BETAT) X=RBI+DEPS
C
40 CONTINUE

```

```

C *** CALCULO DE QA E C(I)'S ***
C
C   WD=X
C   DT=.01
C   ARBL=DABS(RBL)
C
C   IF(ARBL.LT.ALAMM) DTC11=ALAMM
C   IF(ARBL.GE.ALAMM) DTC11=.2/ARBL
C
C   DTC22=.2/DABS(WD)
C   DTC1=DTC11
C   DTC2=DTC22
C
C   IF(DTC22.LT.DTC11) DTC1=DTC22
C   IF(DTC22.LT.DTC11) DTC2=DTC11
C
C   TT=0.0
C   DTC=0.5*D7
C   IF(DTC.LT.DTC1) DTC=DTC1
C
C 45 CONTINUE
C   IF(DTC.GT.DTC2) DTC=DTC2
C
C 50 CONTINUE
C   TT=TT+DTC
C
C   IF(TT.LE.DT+DEPS) GOTO 60
C
C   DTC=DT-(TT-DTC)
C   TT=D7
C
C 60 CONTINUE
C   ERBL=DEXP(RBL*DTC)
C   EWDH=DEXP(WD*DTC)
C   QFAC=(EWDH-ERBL)/(WD-RBL)
C   S=0.0
C
C   DO 300 I=1,NGR
C   S=S+AL(I)*CI(I)
C   EALH=DEXP(-(AL(I)-VFBUM)*DTC)
C   C(I)=CI(I)*EALH+QAI*BETA(I)*(EWDH-EALH)/ALAMM/(WD+(AL(I)-VFBUM))
C 300 CONTINUE
C
C   QA=QAI*ERBL+QFAC*S
C   IT=TT+1
C
C   XJ=DABS(QA/QAI-EWC-1)
C
C *** AS VEZES PRECURSORES NAO SEGUEM O NIVEL DE POTENCIA EM DTC
C PORTANTO COMPARACAO DE Y0 FOI CANCELADA ***
C
C   YJ=DABS(C(6)/CI(6) -EWC-1)
C   IF(YJ.GT.XJ) XJ=YJ
C
C   IF(XJ.LT.1.0E-10) XJ=1.0E-10

```

```

C      IF(XJ.GT.01) GOTO 06
C
C      DIF=0ABS(1.0-TT/DT)
C
C      IF(DIF.LT.0.000101) RETURN
C
C      IF(01/XJ.GT.10.0) XJ=.1*01
C      DTC=DTC*01/XJ
C
C      70 CONTINUE
C      Q4I=04
C
C      DO 400 I=1,NGR
C      CI(I)=C(I)
C 400 CONTINUE
C
C      GOTO 45
C
C      80 CONTINUE
C      IF(DTC.LT.DTC1) GOTO 85
C
C      TT=TT-DTC
C      DTC=0.5*DTC
C
C      GOTO 50
C
C      85 CONTINUE
C      DTC=DTC1
C
C      GOTO 70
C
C      END
C
C      REAL*8 FUNCTION SENO(X)
C      REAL*8 X,PI,DATAN,DSIN,DABS
C      PI = 4*DATAN(1.000)
C      IDIV = X/(2*PI)
C      X = X - (2*PI)*IDIV
C      SENO = DSIN(X)
C      IF(DABS(SENO).LT.1.0E-04) SENO=0.0
C      IF(SENO.GT.0.99999) SENO=1.0
C      IF(SENO.LT.-.99999) SENO=-1.0
C      RETURN
C      END
C
C      REAL*8 FUNCTION COSE(X)
C      REAL*8 X,PI,DATAN,DCOS,DABS
C      PI = 4*DATAN(1.000)
C      IDIV = X/(2*PI)
C      X = X - (2*PI)*IDIV
C      COSE = DCOS(X)
C      IF(DABS(COSE).LT.1.0E-04) COSE=0.0
C      IF(COSE.GT.0.99999) COSE=1.0
C      IF(COSE.LT.-.99999) COSE=-1.0
C      RETURN
C      END

```

TESTE CINÉTICA E=440230109 A=0.50* T INICIAL EM EQUILIBRIO

235 5 1 :

1.0	10000.0	0.0	0.440230109-2.0	-05-3.5	-04
1.0	0.125	0.7	0.4	0.01206	0.002
0.499271014	0.98145774	1.04894621	-1.57794554		
1.043701507	-0.72422530	11.5611162	0.0		
15.5	0.20	0.25	10.0		
143.64	44.50	11.0	234.	329.	4186.
3.5	-03 4.0	-03 0.5	-03 500.		
4.0	17.3	5000.	5000.		
291.	291.	291.	291.	291.	291.

 TESTE CINETICA E=4.40230109 'A=0.5CM' 'T INICIAL EM EQUILIBRIO'

GRUPO	LAMBDA	BETA
1	1.24000E-02	2.14000E-04
2	3.05000E-02	1.42300E-03
3	1.11000E-01	1.27400E-03
4	3.01000E-01	2.56800E-03
5	1.14000E+00	7.48000E-04
6	3.01000E+00	2.73000E-04

BETA TOTAL : 6.50000E-03

TEMPO INICIAL DE GERACAO DOS NEUTRONS: 2.96545E-05 S

EPD : 4.40230E-01
 ALFA : -2.00000E-05 /GRAUS C
 ALFA : -3.50000E-04 /GRAUS C
 ALTO : 7.50300E-01 *
 FREQ : 1.00000E+00 /S

AMPLITUDE DE OSCILACAO DA FRONTEIRA : 5.00000E-03 M

PROBLEMA COM FLUXO DE REFRIGERANTE CONSTANTE

PROBLEMA COM VARIACAO SENOIDAL DA FRONTEIRA

MASSA DO COMBUSTIVEL	: 143.64	KG
MASSA DO REVESTIMENTO	: 44.50	KG
FLUXO DO MODERADOR	: 11.00	KG/SEG
CALOR ESPECIFICO DO COMBUSTIVEL	: 234.00	J/KG/C
CALOR ESPECIFICO DO REVESTIMENTO	: 328.00	J/KG/C
CALOR ESPECIFICO DO MODERADOR	: 4180.00	J/KG/C
RAIO DO COMBUSTIVEL	: 3.5000	**
RAIO DO REVESTIMENTO	: 4.0000	**
ESPESURA DO REVESTIMENTO	: .5000	**
NUMERO MO. DE ESFERAS DE COMBUSTIVEL	: 76904.2969	ESFERAS
RAIO DO TUBO	: .1250	*
VOLUME DE ESFERAS DE COMBUSTIVEL	: .0206	M3
CONDUTIVIDADE DO COMBUSTIVEL	: 4.86	W/M/C
CONDUTIVIDADE DO REVESTIMENTO	: 17.30	W/M/C
COEFICIENTE DE CONVECCAO DO CAP	: 5000.0	W/M2/C
COEFICIENTE DE CONVECCAO DO MODERADOR	: 5000.0	W/M2/C
COEFICIENTE DE CONVECCAO EM EBULICAO	: .0	W/M2/C

CONVECCAO COM EBULICAO A PARTIR DE : 500.00 GRAUS C NO REVESTIMENTO

ACIDENTE OU TRANSIENTE COM DURACAO DE : 15.5000 SEGUNDOS

TEMPERATURAS INICIAIS	
	MEDIAS DO PICO
COMBUSTIVEL	: 291.00 C 291.00 C
REVESTIMENTO	: 291.00 C 291.00 C
MODERADOR	: 291.00 C 291.00 C

POTENCIA INICIAL : 1.00000E+04 WATT
 FATOR DE PICO : 1.000

CONCENTRACAO INICIAL DOS PRECURSORES (WATT)

GRUPO	CONCENTRACAO
1	5.84971E+06
2	1.57331E+07
3	3.87040E+06
4	2.87699E+06
5	2.21262E+05
6	3.05848E+04

SAIDAS SERAO EXECUTADAS NO MAXIMO A CADA .25 SEGUNDOS OU ANTES DE 10.00 VEZES AUMENTO DE POTENCIA

AS TEMPERATURAS SAO CALCULADAS NOS PONTOS	1	2	3	4	5
COM LOCALIZACAO RADIAL DE (MM)	2.0468	2.5788	2.9520	3.2491	3.5000

*** O B S E R V A C A O ***

INTERVALO DE TEMPO SOLICITADO PELO USUARIO PARA CALCULOS TERMOHIDRAULICOS =	.20000000	SEGUNDOS
INTERVALO DE TEMPO MAX. PERMITIDO PELO PROGRAMA PARA SE OBTER CONVERGENCIA =	.01243388	SEGUNDOS
INTERVALO DE TEMPO EFETIVAMENTE UTILIZADO PELO PROGRAMA PARA OS CALCULOS =	.00100000	SEGUNDOS

TEMPD	POTENCIA	ENERGIA	TF. MAX	TC. MAX	TF. MED	TC. MED	TM. MED	IT. CINCT	FREQUENCIA
12.7500	9.15207E+03	1.97556E+05	2.92241E+02	2.91407E+02	2.91893E+02	2.91407E+02	2.91188E+02	2	-1.27888E-02
	TF(I)=	2.92241E+02	2.92019E+02	2.91913E+02	2.91825E+02	2.91748E+02	2.91678E+02		
	C A N A L	Q U E N T E	2.92241E+02	2.91407E+02	2.91893E+02	2.91407E+02	2.91188E+02		
	TF(I)=	2.92241E+02	2.92019E+02	2.91913E+02	2.91825E+02	2.91748E+02	2.91678E+02		
	REATIVIDADE	PADRÃO	= -3.73709E-03						
	REATIVIDADE	TOTAL MEDIA	= -3.82062E-03						
	VFB		= .00000E+00/S						
13.0000	1.40572E+04	2.00199E+05	2.92193E+02	2.91390E+02	2.91853E+02	2.91390E+02	2.91181E+02	2	1.22070E-01
	TF(I)=	2.92193E+02	2.91972E+02	2.91870E+02	2.91788E+02	2.91715E+02	2.91649E+02		
	C A N A L	Q U E N T E	2.92193E+02	2.91390E+02	2.91853E+02	2.91390E+02	2.91181E+02		
	TF(I)=	2.92193E+02	2.91972E+02	2.91870E+02	2.91788E+02	2.91715E+02	2.91649E+02		
	REATIVIDADE	PADRÃO	= -3.75378E-10						
	REATIVIDADE	TOTAL MEDIA	= -8.81761E-05						
	VFB		= 1.23111E-01/S						
13.2500	3.41572E+04	2.06175E+05	2.92243E+02	2.91393E+02	2.91905E+02	2.91393E+02	2.91186E+02	1	2.23960E-01
	TF(I)=	2.92243E+02	2.92027E+02	2.91926E+02	2.91842E+02	2.91765E+02	2.91691E+02		
	C A N A L	Q U E N T E	2.92243E+02	2.91393E+02	2.91905E+02	2.91393E+02	2.91186E+02		
	TF(I)=	2.92243E+02	2.92027E+02	2.91926E+02	2.91842E+02	2.91765E+02	2.91691E+02		
	REATIVIDADE	PADRÃO	= 3.63203E-03						
	REATIVIDADE	TOTAL MEDIA	= 3.54897E-03						
	VFB		= .00000E+00/S						
13.5000	1.59774E+04	2.12798E+05	2.92313E+02	2.91421E+02	2.91959E+02	2.91421E+02	2.91195E+02	2	-1.23976E-01
	TF(I)=	2.92313E+02	2.92093E+02	2.91984E+02	2.91891E+02	2.91807E+02	2.91729E+02		
	C A N A L	Q U E N T E	2.92313E+02	2.91421E+02	2.91959E+02	2.91421E+02	2.91195E+02		
	TF(I)=	2.92313E+02	2.92093E+02	2.91984E+02	2.91891E+02	2.91807E+02	2.91729E+02		
	REATIVIDADE	PADRÃO	= -3.75378E-10						
	REATIVIDADE	TOTAL MEDIA	= -7.96035E-05						
	VFB		= -1.23111E-01/S						
13.7500	9.35250E+03	2.15661E+05	2.92270E+02	2.91417E+02	2.91913E+02	2.91417E+02	2.91192E+02	2	-1.27887E-02
	TF(I)=	2.92270E+02	2.92043E+02	2.91934E+02	2.91844E+02	2.91765E+02	2.91694E+02		
	C A N A L	Q U E N T E	2.92270E+02	2.91417E+02	2.91913E+02	2.91417E+02	2.91192E+02		
	TF(I)=	2.92270E+02	2.92043E+02	2.91934E+02	2.91844E+02	2.91765E+02	2.91694E+02		
	REATIVIDADE	PADRÃO	= -3.73709E-03						
	REATIVIDADE	TOTAL MEDIA	= -3.82257E-03						
	VFB		= .00000E+00/S						
14.0000	1.43627E+04	2.18361E+05	2.92220E+02	2.91399E+02	2.91873E+02	2.91399E+02	2.91185E+02	2	1.22049E-01
	TF(I)=	2.92220E+02	2.91995E+02	2.91891E+02	2.91806E+02	2.91732E+02	2.91664E+02		
	C A N A L	Q U E N T E	2.92220E+02	2.91399E+02	2.91873E+02	2.91399E+02	2.91185E+02		
	TF(I)=	2.92220E+02	2.91995E+02	2.91891E+02	2.91806E+02	2.91732E+02	2.91664E+02		
	REATIVIDADE	PADRÃO	= -3.75378E-10						
	REATIVIDADE	TOTAL MEDIA	= -9.00323E-05						
	VFB		= 1.23111E-01/S						
14.2500	3.48827E+04	2.24465E+05	2.92271E+02	2.91402E+02	2.91926E+02	2.91402E+02	2.91190E+02	1	2.23606E-01
	TF(I)=	2.92271E+02	2.92050E+02	2.91948E+02	2.91861E+02	2.91782E+02	2.91707E+02		
	C A N A L	Q U E N T E	2.92271E+02	2.91402E+02	2.91926E+02	2.91402E+02	2.91190E+02		
	TF(I)=	2.92271E+02	2.92050E+02	2.91948E+02	2.91861E+02	2.91782E+02	2.91707E+02		
	REATIVIDADE	PADRÃO	= 3.63203E-03						
	REATIVIDADE	TOTAL MEDIA	= 3.54707E-03						
	VFB		= .00000E+00/S						
14.5000	1.63198E+04	2.31229E+05	2.92342E+02	2.91431E+02	2.91981E+02	2.91431E+02	2.91200E+02	2	-1.23997E-01
	TF(I)=	2.92342E+02	2.92118E+02	2.92007E+02	2.91911E+02	2.91825E+02	2.91746E+02		
	C A N A L	Q U E N T E	2.92342E+02	2.91431E+02	2.91981E+02	2.91431E+02	2.91200E+02		
	TF(I)=	2.92342E+02	2.92118E+02	2.92007E+02	2.91911E+02	2.91825E+02	2.91746E+02		
	REATIVIDADE	PADRÃO	= -3.75378E-10						
	REATIVIDADE	TOTAL MEDIA	= -8.15853E-05						
	VFB		= -1.23111E-01/S						
14.7500	9.55306E+03	2.34153E+05	2.92298E+02	2.91426E+02	2.91934E+02	2.91426E+02	2.91196E+02	2	-1.27887E-02
	TF(I)=	2.92298E+02	2.92066E+02	2.91955E+02	2.91863E+02	2.91782E+02	2.91710E+02		
	C A N A L	Q U E N T E	2.92298E+02	2.91426E+02	2.91934E+02	2.91426E+02	2.91196E+02		
	TF(I)=	2.92298E+02	2.92066E+02	2.91955E+02	2.91863E+02	2.91782E+02	2.91710E+02		
	REATIVIDADE	PADRÃO	= -3.73709E-03						
	REATIVIDADE	TOTAL MEDIA	= -3.82449E-03						
	VFB		= .00000E+00/S						
15.0000	1.46692E+04	2.36912E+05	2.92248E+02	2.91408E+02	2.91893E+02	2.91408E+02	2.91189E+02	2	1.22029E-01
	TF(I)=	2.92248E+02	2.92017E+02	2.91910E+02	2.91824E+02	2.91748E+02	2.91679E+02		
	C A N A L	Q U E N T E	2.92248E+02	2.91408E+02	2.91893E+02	2.91408E+02	2.91189E+02		
	TF(I)=	2.92248E+02	2.92017E+02	2.91910E+02	2.91824E+02	2.91748E+02	2.91679E+02		
	REATIVIDADE	PADRÃO	= -3.75378E-10						
	REATIVIDADE	TOTAL MEDIA	= -9.18741E-05						
	VFB		= 1.23111E-01/S						

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
BIBLIOTECA

TEMP	POTENCIA	ENERGIA	TF. MAX	TD. MAX	TF. MED	TD. MED	TM. MED	IT. CINET	FREQUENCIA
15.2500	3.56102E+04	2.43144E+05	2.92300E+02	2.91411E+02	2.91947E+02	2.91411E+02	2.91194E+02	1	2.23254E-01
	TF(I)=	2.92300E+02	2.92074E+02	2.91969E+02	2.91880E+02	2.91799E+02	2.91723E+02		
	CANAL QUENTE	2.92300E+02	2.91411E+02	2.91947E+02	2.91411E+02	2.91194E+02	2.91194E+02		
	TF(I)=	2.92300E+02	2.92074E+02	2.91969E+02	2.91880E+02	2.91799E+02	2.91723E+02		
	REATIVIDADE PADRAO	=	3.63203E-03						
	REATIVIDADE TOTAL MEDIA	=	3.54518E-03						
	VFB1	=	.00000E+00/S						

CONCENTRACAO FINAL DOS PRECURSORES (WATT)

GRUPO	CONCENTRACAO
1	6.44014E+06
2	1.94341E+07
3	6.06505E+06
4	5.19910E+06
5	4.53692E+06
6	7.09738E+04

Stop - Program terminated.

B)