

DINÂMICA DE CALOR E DO FLUIDO NO CIRCUITO PRIMÁRIO DE UM REATOR DE PESQUISA

ABCM

ABNCC ABEnS

ANIBAL NABIH GEBRIM

Instituto de Engenharia Nuclear/CNEN - DERE/DITRE



PUC/RJ

RESUMO

Visando analisar alguns transientes que poriam em risco a integridade do núcleo de um reator de pesquisa, desenvolveu-se um programa em linguagem FORTRAN que descreve a dinâmica do calor e do fluido em todo o circuito primário do reator. A seleção da bomba, a determinação do comprimento e diâmetro das tubulações, bem como o arranjo apropriado destes, são definidos a partir do regime estacionário.

INTRODUÇÃO

Foi desenvolvido um programa de computador em linguagem FORTRAN, que simula o comportamento dinâmico e estacionário do calor e do fluido em um reator de pesquisa a baixa pressão. O desenvolvimento computacional inclui a geração, condução e transferência de calor produzido no núcleo do reator, e a condução deste pelo fluido, para a troca de calor com o circuito secundário e a volta para a parte superior do núcleo.

Utiliza-se o comportamento estacionário do circuito primário do reator para definir a bomba a ser usada para vencer as resistências existentes no percurso do fluido. Através da vazão e altura dinâmica (head) procura-se obter a melhor eficiência da bomba, e para isso varia-se o diâmetro e o comprimento das tubulações, bem como, a altura do trocador de calor em relação ao reator. Através do comportamento dinâmico do circuito, tenta-se analisar alguns transientes que poriam em risco a integridade das varetas combustíveis, evitando assim liberação de radionuclídeos para a atmosfera. Entre estes acidentes, foi analisado a parada de bomba até o processo de convecção natural.

O método numérico de aproximação da integral volumétrica da equação de energia na vareta combustível discretizada, é o método das diferenças finitas centradas, e o resultado é colocado em forma matricial. A integração temporal da equação matricial é resolvida pelo método de Crank-Nicholson onde é aplicado a fatorização da matriz. Os parâmetros obtidos são: Temperaturas discretizadas nas pastilhas combustíveis, a qual inclui a linha central até a parte em contato com a folga, as temperaturas no revestimento e no fluido. A geração de calor é obtida solucionando analiticamente a equação da cinética puntual.

A equação de energia aplicada ao fluido e as paredes das tubulações e dos tubos do trocador de calor discretizados são integradas espacialmente pelo método das diferenças finitas, e a integração temporal é feita utilizando-se do método de Heun. Os parâmetros obtidos são: Temperaturas discretizadas do fluido nas tubulações quente e fria e no circuito primário e secundário do trocador de calor, temperaturas discretizadas nas paredes das tubulações e nos tubos do trocador de calor.

O procedimento numérico acima é repetido para obter a taxa de variação da vazão, utilizando-se da equação incompressível e unidimensional que descreve o movimento do fluido.

No caso de uma parada de bomba, a segunda Lei de Newton aplicada a sistemas rotativos é usada para sabermos a velocidade da bomba com o tempo. Expressões analíticas são utilizadas para se ter a altura dinâmica, os torques de fricção e hidráulico da bomba.

O programa que simula por completo o circuito primário

do reator foi inicialmente concebido em módulos. O módulo que simulava o trocador de calor foi comparado com os dados de projeto. Um outro módulo que simulava a condução e transferência de calor em uma vareta combustível foi confrontado com a utilização do código COBRA 4I. Em outro módulo que continha a cinética puntual, os seus resultados foram comparados com a solução exata. Depois de reunir estes módulos em um só programa, alguns testes a mais foram realizados. Em todos os testes realizados a comparação feita esteve sempre abaixo de 2%.

EQUAÇÕES UTILIZADAS

A integração volumétrica da equação da conservação da energia em uma vareta média discretizada (figura 1), produz as seguintes expressões:

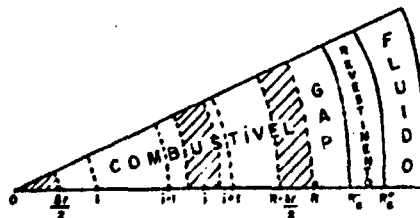


Figura 1. Vareta combustível discretizada

Para a linha central tem-se

$$\frac{\partial T_0}{\partial t} = \frac{4k_0}{\rho_0 C_0 \Delta r^2} T_1 - \frac{4k_1}{\rho_0 C_0 \Delta r^2} T_0 + \frac{Q''}{\rho_0 C_0} \quad (1)$$

Para a parte interna:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\left(1 + \frac{\Delta r}{2r_i}\right) k_i}{\rho_i C_i \Delta r^2} T_{i+1} - \left\{ \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_i}\right) k_i + \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_i}\right) k_{i-1} \right\} \times T_i + \frac{\left(1 - \frac{\Delta r}{2r_i}\right) k_{i-1}}{\rho_i C_i \Delta r^2} T_{i-1} + \frac{Q''}{C_i C_i} \quad 1 < i < R-1 \quad (2)$$

THIS IS THE
BEST COPY

Para a parte em contato com o 'zap':

$$\frac{\partial T_R}{\partial t} = - \left\{ \frac{2hg_R}{\pi \Delta Z D_c \Delta r \left(1 - \frac{\Delta r}{4R}\right) \rho_R C_R} \rightarrow \frac{2k_r \left(1 - \frac{\Delta r}{2R}\right)}{\rho_R C_R \Delta r^2 \left(1 - \frac{\Delta r}{4R}\right)} \right\} T_R + \frac{2k_r \left(1 - \frac{\Delta r}{2R}\right) T_{R-1}}{\rho_R C_R \Delta r^2 \left(1 - \frac{\Delta r}{4R}\right)} + \frac{2hg_G T_c}{\pi \Delta Z D_c \Delta r \left(1 - \frac{\Delta r}{4R}\right) \rho_R C_R} + \frac{Q_R'''}{C_R C_R} \quad (3)$$

Para o revestimento:

$$\frac{\partial T_{c_j}}{\partial t} = \frac{hg_c}{\rho_c C_c \Delta v_c} T_R - \frac{(hg_c + hg_s)}{\rho_c C_c \Delta v_c} T_{c_j} + \frac{hg_s}{\rho_c C_c \Delta v_c} T_{j-1} \quad (4)$$

Onde $1 < j < Z_j$

e para o fluido

$$\frac{\partial T_{f_j}}{\partial t} = \frac{WC_f}{\rho_f C_f \Delta v_f} T_{f_{j-1}} + \frac{hg_f}{\rho_f C_f \Delta v_f} T_{c_j} - \frac{(WC_f + hg_f)}{\rho_f C_f \Delta v_f} T_{f_j} \quad (5)$$

Onde $1 < j < Z_j$

As equações (1), (2), (3), (4) e (5) podem ser escritas da seguinte forma matricial,

$$\frac{\partial \underline{T}}{\partial t} = \underline{A} \underline{T} + \underline{S}$$

Onde a matriz \underline{A} é uma matriz tri-diagonal, os vetores \underline{T} e \underline{S} são vetores colunas. Utilizando-se do processo de fatorização de matriz obtém-se explicitamente os valores de T_1, T_2, T_R, T_c e T_{f_j} .

As equações utilizadas para o fluido nas tubulações fria e quente, e para a parte primária e secundária do trocador de calor são semelhantes à equação (5).

$$\frac{\partial T_{f_j}}{\partial t} = \frac{WC_f}{\rho_{f_j} C_{f_j} \Delta v_{f_j}} (T_{f_{j-1}} - T_{f_j}) + \frac{hg_{f_j}}{\rho_{f_j} C_{f_j} \Delta v_{f_j}} (T_{c_j} - T_{f_j}) \quad (6)$$

As equações utilizadas para as paredes das tubulações fria e quente e dos tubos dos trocadores de calor são semelhantes à equação (4).

$$\frac{\partial T_{pi}}{\partial t} = \frac{hg_{pi}}{\rho_{pi} C_{pi} \Delta v_{pi}} (T_{pi-1} - T_{pi}) + \frac{hg_{pi}}{\rho_{pi} C_{pi} \Delta v_{pi}} (T_{pi} - T_{pi+1}) \quad (7)$$

Observando que no caso das tubulações não há transferência de calor para o meio externo.

Na determinação da taxa de vazão do fluido no circuito primário, utiliza-se da equação de movimento incompressível e unidimensional, que na sua forma final já integrada de um ponto 1 qualquer até outro ponto 2 qual-

quer da tubulação produz:

$$\frac{\Delta X_{1,2}}{A_{1,2}} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{W^2}{A_{1,2}^2} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) + (P_1 - P_2) + \bar{h}_R(Z_2 - Z_1) + \frac{K_R W}{2 \Delta X_{1,2}^2} \left(f \frac{L}{D_{1,2}} + K_L \right) = 0 \quad (8)$$

para qualquer ponto conta a pressão fornecida pela bomba, o termo \bar{h}_R é adicionado à equação. Se integrarmos a equação (8) para vários segmentos ΔX , até fecharmos o circuito e depois somarmos, a expressão resultante não conterá as pressões localizadas.

A altura dinâmica na bomba é obtida a partir da análise de quatro grupos adimensionais (2), e tem a seguinte forma:

$$H = (H_1 - H_2) (W/W_2)^2 + (H_3 (W_1/W_2)^2 - H_4) (w/w_1)^2 + (W_1/W_2)^2 - 1 \quad (9)$$

Para utilizarmos a equação (9) em transientes de vazão, é necessário conhecermos a velocidade da bomba em qualquer tempo. Para determinarmos a velocidade da bomba, a segunda Lei de Newton é aplicada ao sistema rotativo:

$$I \frac{d\omega}{dt} = \text{Torque elétrico} - \text{Torque de fricção} - \text{Torque hidrodinâmico}$$

No caso de parada de bomba, o torque elétrico e magnético são negligenciados. O torque de fricção é assumido como 2:

$$\begin{aligned} T_f &= T_{f_1} (w/w_1)^2, & w^2 < 0,035 w_1^2 \\ T_f &= 0,035 T_{f_1}, & 0 < w^2 < 0,035 w_1^2 \\ T_f &= 0,1 T_{f_1}, & w > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

O torque hidrodinâmico é assumido como 2:

$$T_H = 4571 \rho_f \left(\frac{W}{D} \right)^2 (V_2 - V_1) \quad (12)$$

RESULTADOS

Além dos testes efetuados na introdução, alguns em tres testes foram realizados.

Teste 1. O reator de 5 MW é desligado, desta forma a potência do reator comporta-se segundo a seguinte expressão:

$$P(t) = 0,00028 P_0 t e^{-0,00028 t} - (T_1 - t)^{-0,00028}$$

onde T_1 é o tempo de operação do reator antes de ser desligado. Neste teste, é esperado que depois de algum tempo, as temperaturas em todo o circuito primário se aproximem de 27,5°C, que é a temperatura fixa de entrada do fluido secundário ao trocador de calor (Figura 2).
Teste 2. A potência era de 3,5 MW no estável, quando ocorreu um acidente que eleva a potência para 5,0 MW. Esperamos que após algum tempo todas as temperaturas convertem para o estável, sendo previamente executado com a potência de 5,0 MW (Figura 3).

Os testes a serem realizados, além de serem utilizados para verificar a segurança do sistema hidrodinâmico do circuito primário do reator após certas transientes,

também, são utilizados para verificar se a programação do transitório está correta.

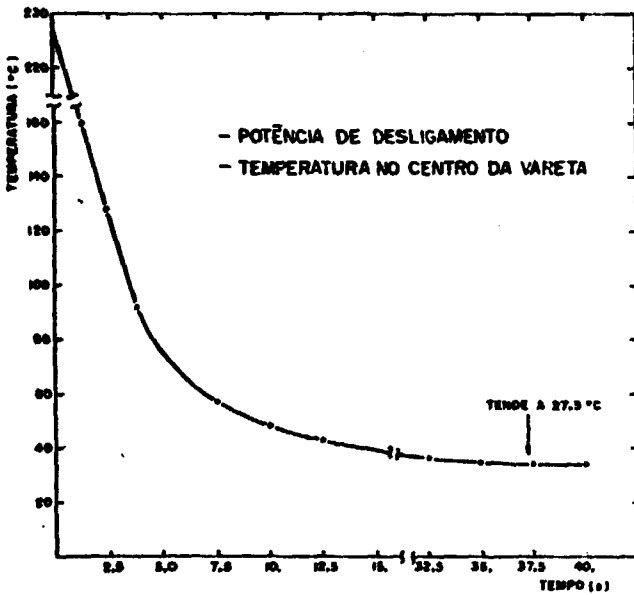


Figura 2. Desligamento do reator com a bomba funcionando normalmente

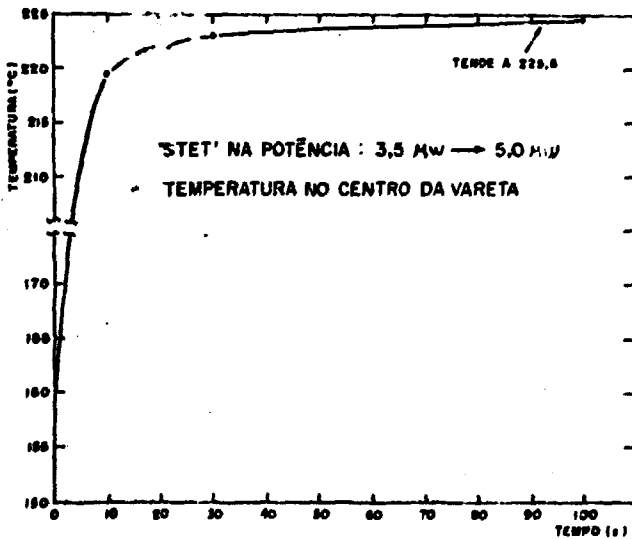


Figura 3. 'STEP' na potência com a bomba funcionando normalmente

Teste 3. Ao mesmo tempo em que ocorre uma parada de bomba, as barras de controle e segurança são inseridas no reator, e a potência comportando-se como no teste 1. Observando-se as figuras 4 e 5, nota-se que a vazão ainda restante é suficiente para que as temperaturas mantenham-se baixas, conservando assim a integridade das varetas combustíveis.

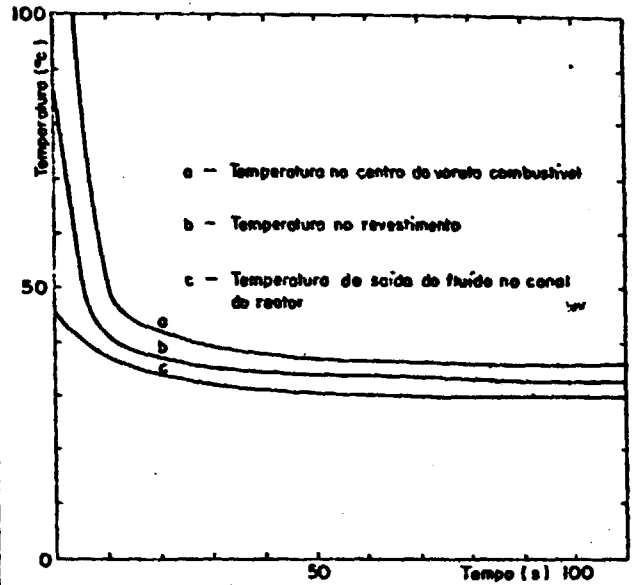


Figura 4. Parada de bomba com o desligamento do reator

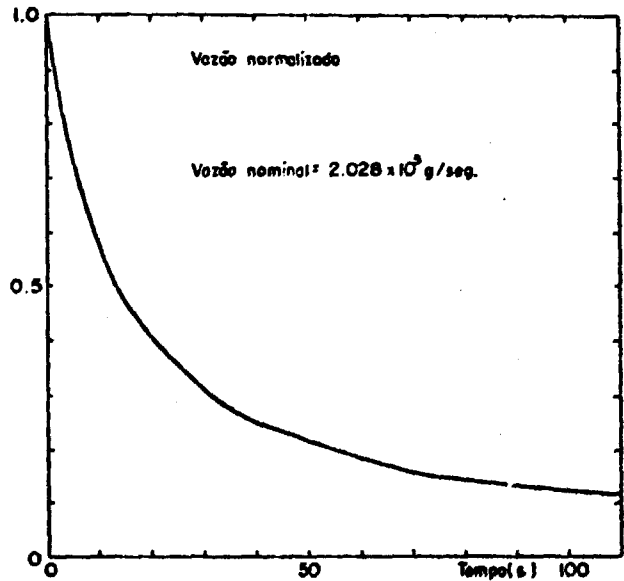


Figura 5. Parada de bomba com o desligamento do reator

CONCLUSÃO

Este programa pode ser utilizado para analisar as disposições adequadas das tubulações de entrada e saída do trocador de calor e reator, bem como, dimensionar a bomba conjuntamente com o comprimento e diâmetros das tubulações. Verificar em certas condições anormais de funcionamento do reator, se existe a possibilidade de violar a integridade das varetas combustíveis.

A adequação dos parâmetros físicos, etc., os con-

ficientes de transferência de calor, fator de fricção, fator de perda de carga, etc, serão aprimorados quando colocados em confronto com outros programas elaborados e através de experimentos em laboratórios.

NOECLATURA

Símbolo	Descrição	Unidade
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
k	Condutividade térmica	$\text{W}/\text{cm}^{\circ}\text{C}$
ρ	Densidade	g/cm^3
C	Calor específico	$\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$
Δr	Espaçamento radial na vareta	cm
Q'''	Taxa de calor volumétrico	W/cm^3
r	Raio	cm
h_{gg}	Coefficiente global de transferência de calor da parte externa da vareta até o centro do revestimento.	$\text{W}/^{\circ}\text{C}$
h_{gf}	Coefficiente global de transferência de calor do centro de uma parede para o fluido ou vice-versa.	$\text{W}/^{\circ}\text{C}$
W	Vazão	g/seg
v	Volume	cm^3
V	Velocidade do fluido	cm/seg
ΔX	Espaçamento nos tubos e tubulações	cm
P	Pressão	dyne/cm^2
g	Aceleração da gravidade	cm/seg^2
f	Fator de fricção	
D	Diâmetro	cm
K	Fator de perda de carga	
H	Altura dinâmica da bomba	cm
w	Velocidade da bomba	RPM
Z	Distância vertical	cm
c	Raio de impeller	cm
A	Área transversal ao fluido	cm^2
I	Momento de inércia	gcm^2
t	Tempo	seg

REFERÊNCIAS

- [1] Gebrim, A.N., Dinâmica de calor no circuito primário do R.P.R., Instituto de Engenharia Nuclear, Comunicação Técnica GAR-01/86, Rio de Janeiro, R.J.
- [2] Puls, G.M., Flow Transient Analysis of a pressurized water reactor during flow coastdown, WAPD-TM-428, April 1968, Bettis Atomic Power Laboratory, Pittsburgh, PA.

ABSTRACT

Aiming at the analysis of some thermohydraulic transients that may affect the safety of a reactor core, a FORTRAN program was developed which evaluates the heat and fluid dynamics in the primary circuit of a research reactor. The selection of the pump, the determination of the length and diameter of the pipes, as well as the appropriate arrangement of the pipes and heat exchanger, are determined from the stationary regime.