

MODELO SIMPLIFICADO DO CIRCUITO PRIMÁRIO DE UM PWR

Adriano Lobo de Souza
Artur José Gonçalves Faya

Departamento de Tecnologia de Reatores
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear
São Paulo, SP

SUMÁRIO

Neste trabalho descreve-se o programa de computador RENUR desenvolvido para efetuar uma simulação simplificada de componentes do circuito primário de uma central nuclear tipo PWR. Especificamente desenvolveu-se modelos matemáticos para a simulação termohidráulica do núcleo do reator e pressurizador. O restante do circuito primário é tratado como um único volume.

No núcleo do reator emprega-se um modelo nodal para o tratamento do fenômeno de condução de calor na barra de combustível, considerando-se um canal médio para tratar o comportamento médio do núcleo e um canal quente para cálculos de DNBR. No pressurizador emprega-se um modelo homogêneo.

Apresenta-se resultados obtidos para condições de estado estacionário bem como para um transiente de rejeição de carga. Em relação a resultados de programas de computador mais elaborados, a aderência é satisfatória e a economia em tempo computacional considerável.

ABSTRACT

The computer program RENUR was developed to perform a very simplified simulation of a typical PWR primary circuit. The program has mathematical models for the thermal-hydraulics of the reactor core and the pressurizer, the rest of the circuit being treated as a single volume.

Heat conduction in the fuel rod is analyzed by a nodal model. Average and hot channels are treated so that the bulk response of the core and DNBR can be evaluated. A Homogenous model is employed in the pressurizer.

Results are presented for a steady-state situation as well as for a loss of load transient. Agreement with the results of more elaborate computer codes is good with substantial reduction in computer costs.

NOMENCLATURA

c	calor específico a pressão constante, J/kg °C
h	entalpia específica, J/kg
L	altura ativa da barra de combustível, m
M	massa, kg
\dot{m}	vazão mássica, kg/s
p	pressão, N/m ²
Q	potência, w
q'''	densidade de potência, w/m ³
R	resistência térmica, °C/w
R ₁₂	$(1/\lambda_{c1} + 1/\lambda_{c2}) / 8\pi L$
R ₂₃	$1/16\pi L \lambda_{c2} + \ln(r_r / r_c) / 4\pi L \lambda_r + 1/2\pi r_G L \alpha_G$
R _{3a}	$\ln(r_r / r_G) / 4\pi L \lambda_r + 1/2\pi r_r L \alpha_a$
r	raio, m
T	temperatura, °C
t	tempo, s
μ	energia interna específica, J/kg
V	volume, m ³
v	volume específico, m ³ /kg
λ	condutividade térmica, w/m °C
α	coeficiente de transferência de calor, w/m ² °C

SUBSCRITOS

a	fluido primário
AL	alívio
AMB	ambiente
AQ	aquecedor
ASP	aspergidor
c	combustível
G	folga (gap)
GV	gerador de vapor
g	vapor saturado
PF	perna fria
P	pressurizador
R	reator
r	revestimento
SEC	segurança
su	surto

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho procura-se avaliar o desempenho de modelos bastante simplificados do circuito primário de uma central nuclear tipo PWR para casos transientes onde os componentes que dominam o comportamento temporal das principais grandezas são o núcleo do reator e o pressurizador. Ou seja, aqueles casos em que a influência do gerador de vapor é mínima ou possa ser simulada como uma perturbação, por exemplo. Visa-se também a análise de comportamento de variáveis empregadas para atuar mecanismos de controle da usina.

Tenta-se obter uma redução substancial dos tempos de computação em relação a programas comercialmente disponíveis embora mantendo um nível de precisão satisfatório.

Analisa-se um caso típico de parada de bomba e casos de surtos positivos e negativos no pressurizador causados por desbalanceamento entre a potência gerada no núcleo e o calor transportado do primário para o secundário através do gerador de vapor (transientes de perda de carga, por exemplo).

2. MODELOS E MÉTODOS

2.1 Pressurizador

No pressurizador supõe-se que líquido e vapor encontram-se em equilíbrio térmico ($T_L = T_V$) constituindo uma mistura homogênea. Assim, a solução do sistema de equações diferenciais ordinárias, constituído de equações de conservação de massa e energia, respectivamente,

$$\frac{dM_P}{dt} = \dot{m}_{su} + \dot{m}_{ASP} - \dot{m}_{AL} - \dot{m}_{SEG} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(M_P u_P)}{dt} &= \dot{m}_{su} h_{su} + \dot{m}_{ASP} h_{PF} - (\dot{m}_{AL} + \dot{m}_{SEG}) h_g \\ &+ \dot{Q}_{AQ}(t) - \dot{Q}_{AMB} \end{aligned} \quad (2)$$

e a equação de conservação de volume

$$\frac{dV_P}{dt} = M_P \frac{dv_P}{dt} + v_P \frac{dM_P}{dt} = 0 \quad (3)$$

permite o cálculo da entalpia específica e pressão. O sistema de equações compreendido por (1), (2) e (3) contém 4 incógnitas (M_P , U_P , P_P e v_P). A quarta relação é a equação de estado escolhendo-se para a mesma o volume específico em função da pressão e entalpia,

$$v_P = v_P(P_P, h_P) \quad (4)$$

Supõe-se que a entalpia da linha de surto, h_{su} , seja a entalpia do líquido saturado enquanto para o aspersor emprega-se a entalpia do líquido

presente na perna fria do circuito primário, hpf .

O controle do aspergidor, aquecedor e válvulas é do tipo liga - desliga (on - off), governados por níveis de atuação específicos com relação à pressão no pressurizador. Nas válvulas adota-se a hipótese de escoamento crítico através dos orifícios das mesmas. A Figura 1 mostra um esquema simplificado do pressurizador.

2.2 Núcleo do Reator

Na análise térmica do núcleo emprega-se o conceito de canal médio para efeito de cálculo de propriedades físicas e grandezas macroscópicas avaliadas empiricamente (coeficiente de transferência de calor, por exemplo). Todavia, identifica-se um canal quente para a determinação do DNBR (razão entre fluxo crítico de calor e fluxo de calor local).

2.3 Barra de Combustível

Na barra de combustível considera-se somente condução radial de calor em virtude dos transientes em consideração.

Divide-se o combustível em duas regiões radiais de volumes iguais enquanto o revestimento possui apenas uma (Figura 2). Usando-se a aproximação de volumes concentrados, pode-se mostrar que o balanço de energia para cada região é representado por:

Região central do combustível (k = 1)

$$M_1 c_1 dT_1/dt = q'''(t)V_1 - (T_1 - T_2) / R_{12} \quad (5)$$

Região anular do combustível (k = 2)

$$M_2 c_2 dT_2/dt = q'''(t)V_2 + (T_1 - T_2) / R_{12} - (T_2 - T_3) / R_{23} \quad (6)$$

Revestimento (k = 3)

$$M_3 c_3 dT_3/dt = (T_2 - T_3) / R_{23} - (T_3 - T_4) / R_{34} \quad (7)$$

Nestas equações R_k , $k+1$ representa a resistência térmica entre a região k e a região $k+1$. R_{12} consiste na resistência condutiva do combustível cerâmico na região central. R_{23} incorpora a resistência condutiva do sólido presente na região 2 e a resistência convectiva usada para simular o transporte de calor na folga. R_{34} compreende a resistência condutiva do material metálico do revestimento e a resistência convectiva entre a superfície externa do revestimento e o fluido refrigerante que escoar.

Correlações empíricas foram empregadas para expressar a dependência com a temperatura de condutividades térmicas e calores específicos.

2.4 Fluido Refrigerante

Tratou-se o fluido presente no circuito primário como um único volume. Assim o balanço de massa para todo o primário resulta

$$dM_a/dt = -\dot{m}_{su} - \dot{m}_{ASP} \quad (8)$$

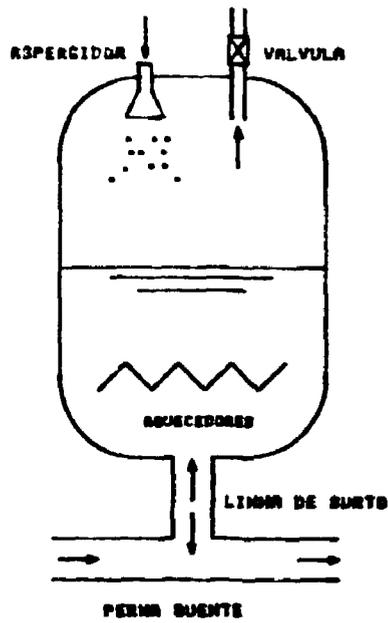


FIGURA 1 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DO PRESSURIZADOR

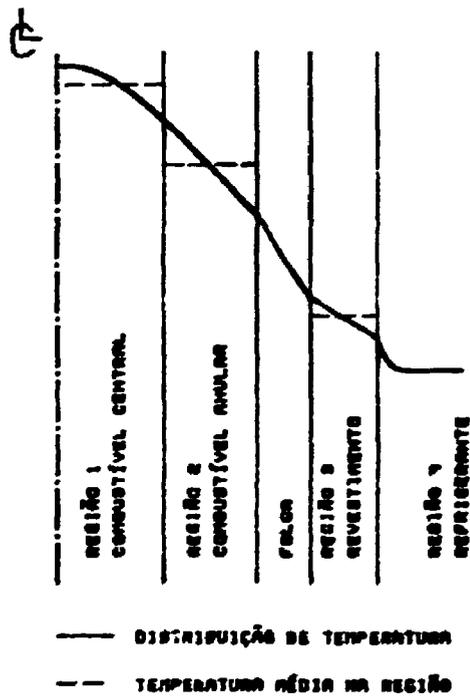


FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO RADIAL DE TEMPERATURA NAS
REGIÕES DA BARRA DE COMBUSTÍVEL

onde \dot{m}_{su} e \dot{m}_{ASP} são considerados positivos quando deixam o volume do primário e são inseridos no pressurizador. Não se considera válvulas de alívio em outras posições que não no pressurizador.

O balanço de energia para o volume do primário (desprezando-se a potência da bomba) pode ser expresso por

$$d(M_a u_a)/dt = -\dot{m}_{su} h_{su} - \dot{m}_{ASP} h_{PF} + \dot{Q}_R(t) - \dot{Q}_{GV}(t) \quad (9)$$

onde supõe-se que a pressão no primário seja uniforme (P_a).

As equações (8) e (9) constituem um sistema com quatro incógnitas M_a , U_a , P_a e v_a que é suplementado por uma equação de estado,

$$v_a = v_a(P_a, h_a) \quad (10)$$

e a seguinte hipótese,

$$dP_a/dt = dP_p/dt \quad (11)$$

isto é, a variação de pressão no circuito primário acompanha a do pressurizador.

3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Simulou-se diversos casos testes em condições estacionárias e transientes para avaliar qualitativa e quantitativamente o desempenho do programa RENUM.

Inicialmente testou-se o modelo usado para simular o transporte de calor na barra de combustível. Empregou-se dados típicos de reatores pressurizados a água leve para dois casos: no primeiro o fator de pico de canal quente é 2,64 e no segundo, 3,94. Na Tabela 1 apresenta-se os desvios percentuais entre os programas RENUM e COBRA III [1] e na Tabela 2 entre RENUM e FRAPCOM I [2]. Os resultados mostram-se satisfatórios. Embora o emprego de quatro ou cinco regiões no combustível pudesse trazer uma melhoria nos desvios, esta opção acarretaria um aumento significativo no tempo computacional que contraria um dos objetivos básicos deste trabalho.

Em seguida simulou-se um transiente de surtos positivos e negativos no pressurizador de Angra 1 [3]. A Figura 3 apresenta o comportamento temporal da pressão comparando os resultados do programa RENUM contra os do programa SIPRES - T e dados fornecidos pelo fabricante. A diferença máxima entre os resultados do RENUM e dados do fabricante é da ordem de 2% atestando assim o bom desempenho do modelo do pressurizador.

Finalmente analisou-se um caso teste de perda de carga para a central nuclear de Shippingport operando a uma potência de 74 MW [4]. Na Figura 4 nota-se que os resultados do programa RENUM são qualitativamente bons pois o comportamento temporal da pressão acompanha a tendência dos resultados experimentais. Quantitativamente a máxima diferença entre o cálculo e a experiência situou-se ao redor de 3%.

Em relação ao objetivo de redução de tempos computacionais o programa RENUM gasta 0,5 milisegundos por volume de controle por incremento de tempo no computador CDC 170/750. Este número deve ser comparado com aquele obtido num transiente típico de análise de acidentes com o Código RELAP5/MOD1 [5] no mesmo computador que é de aproximadamente 2,0 milisegundos por volume de controle

por incremento de tempo, muito embora deva-se notar que o programa RENUR integra equações diferenciais ordinárias enquanto o programa RELAP5/MOD1 resolve um sistema de equações diferenciais parciais pelo método de diferenças finitas.

Tabela 1 - Desvios Percentuais entre as Distribuições de Temperatura Obtidas com os Programas RENUR e COBRA III

Posição Radial mm	Canal Médio %	Canal Quente %
0,0	-10,8	0,0
3,0	-7,7	-8,6
4,25	-3,9	-0,4
4,90	-5,1	-9,3
6,45	+0,7	-0,3

Tabela 2 - Desvios Percentuais entre as Distribuições Radiais de Temperatura Obtidas com os Programas RENUR e FRAPCOM

Posição Radial mm	Canal Médio %	Canal Quente %
0,0	-6,3	+4,2
4,25	+1,5	+32,7
4,30	-2,3	-0,8
4,60	-2,7	-1,4
4,90	-2,7	-2,0
6,45	+0,4	-3,1

4. BIBLIOGRAFIA

- 1 BORGES, R.C., Análise Termohidráulica de Reatores Tipo PWR Utilizando o Método de Fronteira Lateral Aberta, Dissertação de Mestrado, IME, RJ, 1980.

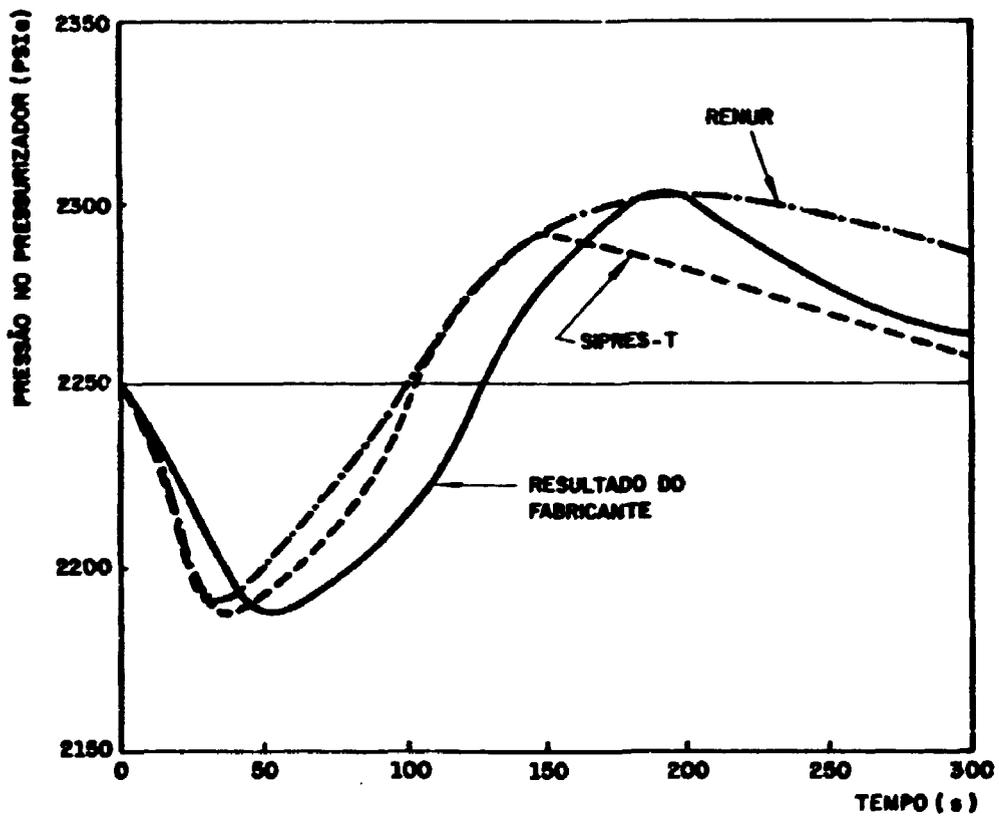


FIGURA 3 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PRESSÃO NO PRESSURIZADOR DA CENTRAL ANGRA-I PARA TRANSIENTES DE SUETOS

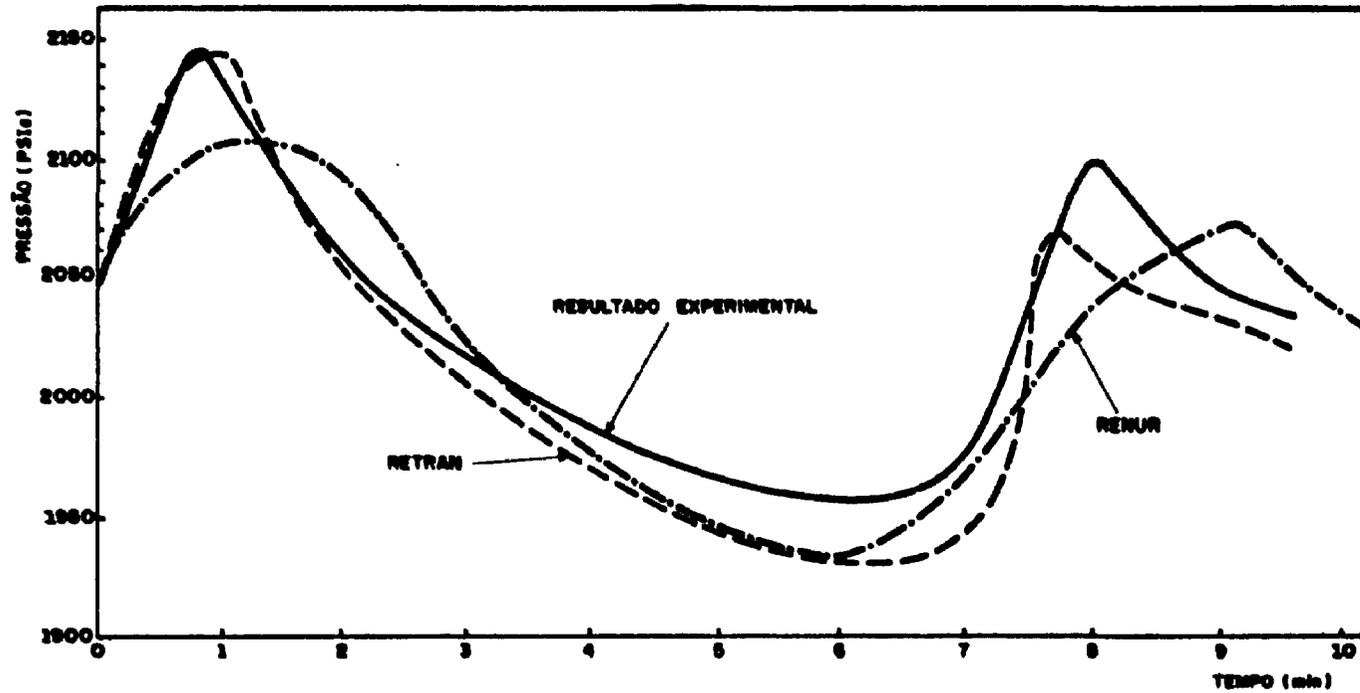


FIGURA 4 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PRESSÃO NO PRESSURIZADOR DE SHIPPINGPORT PARA UM TRANSIENTE DE PERDA DE CARGA

- 2 BERNA, G.A., BOHN, M.P. e COLEMAN, D.R., FRAPCOM 1, A Computer Code for the Steady State Analysis of Oxide Fuel Rods, Idaho National Engineering Laboratory, Report CDAP-TR-78-032-R1, November 1978.

- 3 VANNI, E.A., Simulador Digital do Pressurizador e Bomba do Circuito Primário do Reator com Água Pressurizada, Dissertação de Mestrado, IME, RJ, 1978.

- 4 RETRAN-02 - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems, Vol. 4, EPRI-NP-1850 CCM, January 1983.

- 5 RELAP 5/MOD1 - Code Manual - Models and Numerical Methods. NUREG-CR-1826, EGG-270, E.G. and G. Idaho, Inc., March 1982.