

CIRCULAÇÃO NATURAL EM REATORES NUCLEARES A ÁGUA PRESSURIZADA

Paula Aida Sesini e José Luis Ferraz Bastos

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN/CNEN
Diretoria de Reatores
Travessa R - 400 - Cidade Universitária
05508-900 - São Paulo - SP

RESUMO

Este trabalho apresenta o estágio atual de desenvolvimento do código CERNAT que analisa o comportamento de reatores nucleares operando em regime de circulação natural mono e bi-fásico. No intuito de gerar dados para a validação do código em regime bi-fásico de escoamento, foi montado um circuito experimental de geometria retangular composto por uma fonte quente e um condensador como fonte fria.

INTRODUÇÃO

Dá-se o nome de circulação natural ao regime de operação de um sistema onde a força motriz do escoamento é a força de empuxo gerada pela diferença de densidades no fluido. Circuitos operando em regime de circulação natural apresentam várias aplicações na engenharia, como por exemplo: circuitos de aquecimento de água por energia solar, termosifões para processos químicos, resfriamento de componentes eletrônicos, etc... Em reatores nucleares a circulação natural é usada em operações a baixa potência e na remoção do calor residual em caso de acidentes.

Este trabalho apresenta a fase atual de desenvolvimento do código computacional CERNAT2F, elaborado para a análise de circuitos operando em regime de circulação natural mono e bi-fásico.

Para o regime de circulação natural monofásico foram realizadas várias comparações entre resultados experimentais e numéricos, [1], [2], [3]. Recentemente iniciou-se um programa de testes em regime bi-fásico de escoamento em um circuito simples montado no Departamento de Engenharia Química da USP. As primeiras comparações mostraram resultados satisfatórios.

MODELAGEM NUMÉRICA

Equações de Conservação

O código CERNAT é baseado numa formulação unidimensional das equações de conservação. A metodologia numérica empregada é a dos volumes finitos. As equações de balanço de energia e quantidade de movimento estão associadas ao fluido, enquanto que somente a equação de balanço de energia está associada às partes estruturais. A equação de balanço de energia integrada num volume de controle, para o fluido, é mostrada na Eq. (1):

$$C_p \frac{\partial h_f}{\partial t} = Gf(h_1 - h_p) + Gc_1(c_p T_{w1} - h_p) + Gc_2(c_p T_{w2} - h_p) + S \quad (1)$$

onde o subscrito "S" é o nó fluido precedente e os subscritos "W1" e "W2" são os nós sólidos vizinhos. C_p é a capacitância térmica, Gf é a condutância fluida e $Gc1$ e $Gc2$ são as condutâncias térmicas. O termo S do lado direito da equação é um termo fonte.

Na Eq. (2) é apresentado o balanço de quantidade de movimento integrado ao longo do circuito:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{\Gamma} \left[-\Delta p - \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho R}{\rho} + g \xi - \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho \eta}{\rho} - \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho R}{\rho} - \Gamma \frac{dM}{dt} \right] \quad (2)$$

onde Γ é uma relação geométrica entre o comprimento e a área de escoamento de cada nó. Δp é a diferença de pressão entre a saída e a entrada do circuito. O segundo termo do lado direito da equação representa as forças de atrito onde são contabilizadas as perdas singulares e distribuídas. O termo $g \xi$ é a força de empuxo onde intervém a variação da densidade. Os dois últimos termos da equação estão relacionados com loops paralelos. Os parâmetros com subscrito "c" correspondem aos nós do circuito que pertencem a mais de um loop.

O balanço de energia para os nós sólidos é mostrado na Eq (3):

$$C_s \frac{dT_i}{dt} = Gc1(T_K - T_i) + Gc2(T_L - T_i) + Q \quad (3)$$

onde os nós K e L podem ser nós sólidos ou fluidos na direção radial.

No caso de circulação natural com mudança de fase, o fluido sofre grandes variações de densidade provocando variações na pressão do sistema. Para absorver essas variações de pressão, foi desenvolvido um modelo de tanque de expansão que é conectado ao circuito através de uma linha de surto. A vazão na linha de surto é estimada pela equação de continuidade:

$$M_s = -V \frac{d\bar{\rho}}{dt} \quad (4)$$

onde M_s é a vazão na linha de surto, V é o volume total do circuito e $\bar{\rho}$ a densidade média do fluido no circuito. A Eq (1) de balanço de energia também é usada para o cálculo das temperaturas na linha de surto e reservatório.

Deve-se observar que as Eqs (1) e (2) estão acopladas devido ao termo de força de empuxo. Por outro lado, o campo de temperaturas no fluido depende da distribuição de temperaturas na estrutura, acoplando as Eqs (1) e (3). Fica claro portanto que todas estas equações são acopladas devendo ser resolvidas simultaneamente.

Modelo Bi-fásico

Para a representação do escoamento bifásico adotou-se, como primeira aproximação, o modelo homogêneo. Este é o modelo mais simples e consiste em representar as fases presentes no escoamento por um fluido fictício cujas propriedades termodinâmicas correspondem a valores ponderados entre as propriedades do líquido e do vapor.

Considerando que as duas fases têm a mesma velocidade e estão em equilíbrio termodinâmico, podemos expressar o título da mistura através da Eq (5):

$$x = \frac{h - h_l}{h_{lg}} \quad (5)$$

onde h é a entalpia da mistura, h_l a entalpia do líquido saturado e h_{lg} o calor de vaporização.

A densidade da mistura é estimada pela Eq (6).

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x}{\rho_v} + \frac{1-x}{\rho_l} \quad (6)$$

As propriedades termodinâmicas como viscosidade, calor específico e condutividade térmica são calculadas como uma média ponderada entre as propriedades do líquido e do vapor.

Para escoamentos monofásicos o fator de atrito é estimado pela correlação de Churchill /4/ tanto para o regime laminar quanto para o regime turbulento. Para o escoamento bi-fásico o fator de atrito é o calculado para o escoamento monofásico multiplicado pelo fator de Martinelli-Nelson.

Regimes de Transferência de Calor

Em um sistema de circulação natural com mudança de fase pode-se encontrar uma grande quantidade de regimes de transferência de calor. A lógica para a seleção destes regimes é mostrada na fig. 1. Inicialmente alguns problemas numéricos, relacionados a mudanças bruscas nos coeficientes de transferência de calor, foram detectados. Estes problemas foram tratados estimando, para um certo regime, os coeficientes de transferência de calor com diferentes correlações e escolhendo o maior valor entre eles. Esta árvore para escolha da correlação de transferência de calor é similar à adotada no código RELAP5/MOD2.

Para o escoamento monofásico de líquido ou de vapor, existem diferentes correlações, fig. 2. O número adimensional Gr/Re^2 avalia se o regime de transferência de calor é predominantemente um regime de convecção forçada ou um regime de convecção natural.

INTHG: é o reformatador dos arquivos de saída para a geração de curvas através de softwares gráficos.

EXPERIMENTO COM MUDANÇA DE FASE

Descrição do Circuito Experimental

O circuito experimental montado compõe-se de uma estrutura retangular de tubos em vidro Pyrex da Corning, uma fonte quente, uma fonte fria e um tanque de expansão, fig. 3. A fonte é um aquecedor elétrico e está localizada na parte inferior da seção vertical do circuito. A potência elétrica aplicada nas resistências do aquecedor é produzida com um variador de tensão alimentado com corrente alternada. A fonte fria é um condensador do tipo serpentina, situada na parte superior da seção vertical oposta a das resistências. O tubo de entrada e saída da água junto com a serpentina conformam um segundo circuito, aberto, cuja função consiste em resfriar o fluido do circuito primário. O tanque de expansão é conectado em um ponto intermediário da seção horizontal inferior, através de uma linha de surto, e é localizado por cima da seção horizontal superior. A sua função é a de absorver as variações de densidade do fluido no circuito. O bocal superior permanece aberto para manter o circuito a pressão ambiente.

O circuito não possui isolante térmico, a menos da base do aquecedor, para possibilitar a visualização do escoamento.

O volume total de água, incluindo tanque de expansão e linha de surto, é de aproximadamente 12 litros.

A medição das temperaturas é realizada utilizando termopares tipo T. O circuito possui 16 termopares, quatro dos quais estão dispostos na superfície dos tubos. Os restantes se encontram no interior dos mesmos. Além das temperaturas são medidas a pressão no circuito primário e o nível no tanque de expansão. A pressão é medida utilizando um transmissor de pressão com elemento capacitivo instalado junto à saída do aquecedor. O sensor possui um conversor com saída em sinal de alto nível (4-20 mA). Para a medição do nível é empregada uma sonda capacitiva com conversor acoplado com saída em sinal de alto nível (4-20 mA).

Para a medição da potência elétrica, mede-se a corrente e a tensão aplicadas nas resistências utilizando dois voltímetros de 3 1/2 dígitos. As medições são realizadas a cada 15 minutos durante todo o ensaio. A medição da vazão de resfriamento no secundário é realizada com um rotâmetro OMEL, com fundo de escala de 8,0 l/min, no começo do experimento.

As medidas tanto das temperaturas como da pressão no circuito e o nível no tanque de expansão, são registradas por um sistema de aquisição de dados instalado em microcomputador, com uma taxa de amostragem compatível com o fenômeno.

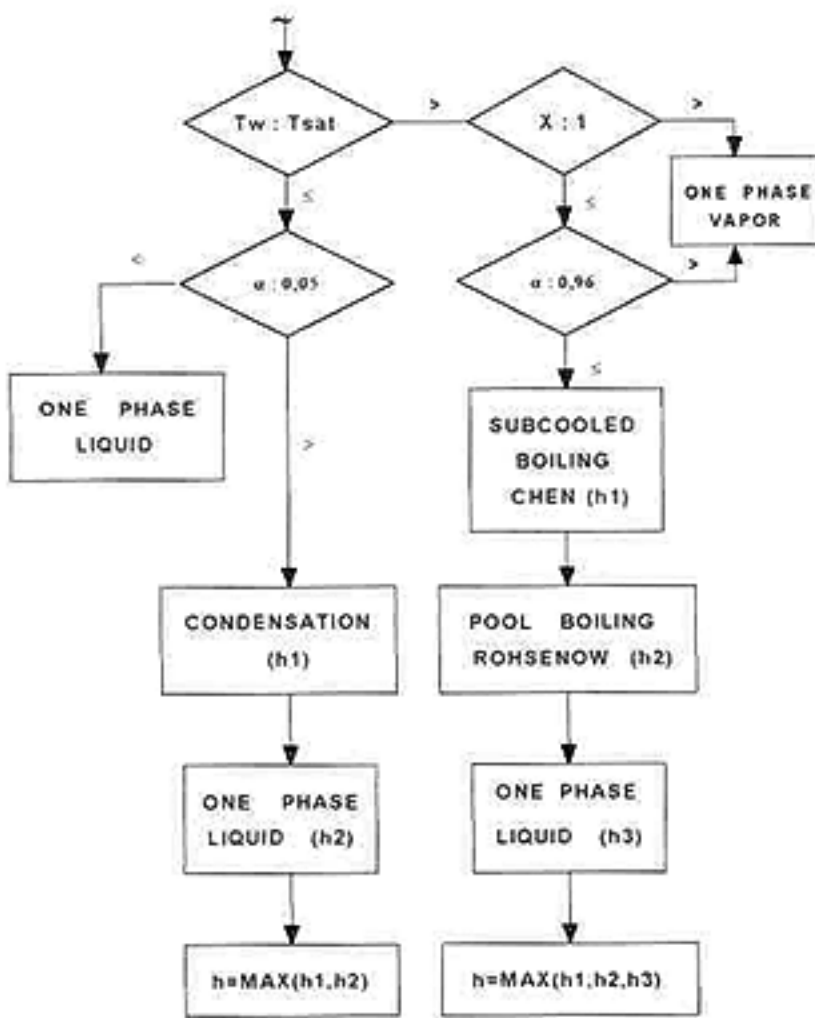


Figura 1 - Regimes de Transferência de Calor.

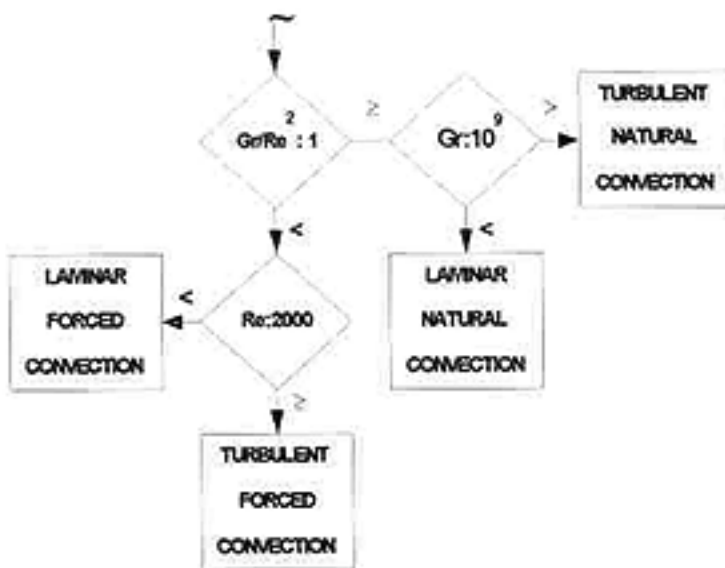


Figura 2 - Escoamento Monofásico de Líquido ou Vapor

Estrutura do Código

O código CERNAT é constituído por três programas principais:

PREPRO: é um pré-processador geométrico cujo objetivo é facilitar a descrição do circuito e gerar automaticamente uma tabela de conectividade entre nós;

LOOP: é o integrador do sistema de equações álgebra-diferenciais gerado pela discretização nodal do sistema;

A evolução temporal das temperaturas e da pressão do fluido no circuito são estudadas modificando-se dois parâmetros: a potência elétrica da fonte quente e a vazão de resfriamento no secundário. Durante cada experimento esses parâmetros são mantidos constantes. O experimento é iniciado com o fluido do circuito primário em repouso e a temperatura uniforme. A gravação dos sinais de temperatura e pressão é feita automaticamente a intervalos regulares de 5 segundos a partir do instante em que o aquecedor é ligado.

Foram realizados vários experimentos com diferentes níveis de potência e vazão de resfriamento. Ao todo gerou-se um banco de dados composto por 10 experimentos sem mudança de fase e 6 experimentos onde ocorreu geração de vapor.

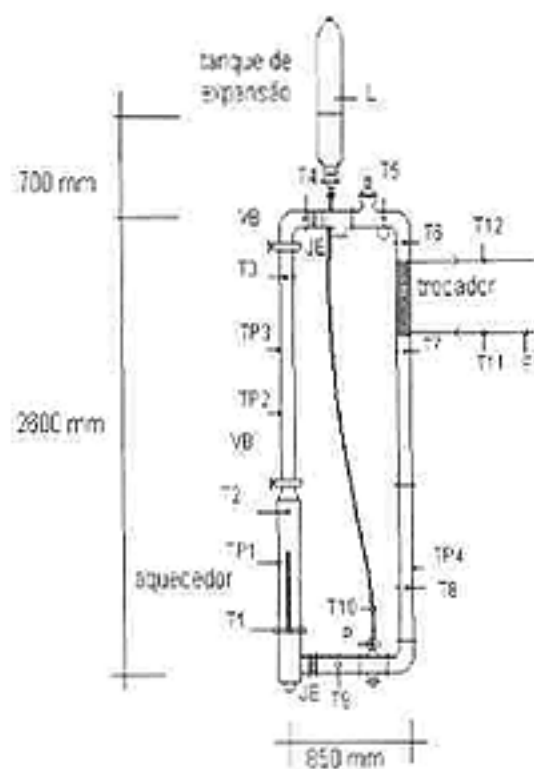


Figura 3.- Circuito Experimental de Circulação Natural

Modelagem do Circuito Experimental

A representação do circuito experimental é feita definindo-se um conjunto de nós para o circuito primário, circuito secundário e tanque de expansão. São também definidos nós representando as paredes das tubulações para que sejam levadas em consideração a transferência de calor entre fluido e estrutura, fig. 4.

Devido à complexidade geométrica do trocador de calor que é composto por duas serpentinas entrelaçadas, os resultados de um determinado caso monofásico foi utilizado para calibrar o modelo numérico. Entenda-se por calibração do modelo, a identificação dos coeficientes de perda de carga localizada na região do trocador de calor. Em seguida verificou-se o comportamento deste modelo contra outros casos experimentais monofásicos. A fig. 5

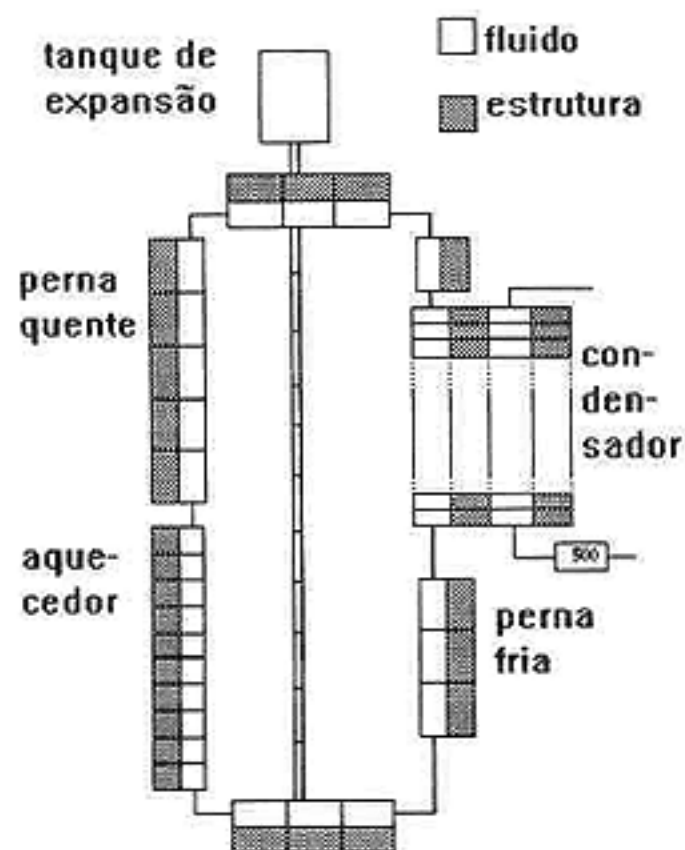


Figura 4 - Descrição Nodal do Circuito

mostra uma comparação para um potência dissipada no aquecedor de 4700 W e uma vazão de resfriamento de 3.0 l/min. Observa-se uma boa representação das temperaturas de perna quente e fria tanto na região inicial como no regime permanente. Para outros casos monofásicos os resultados foram igualmente satisfatórios.

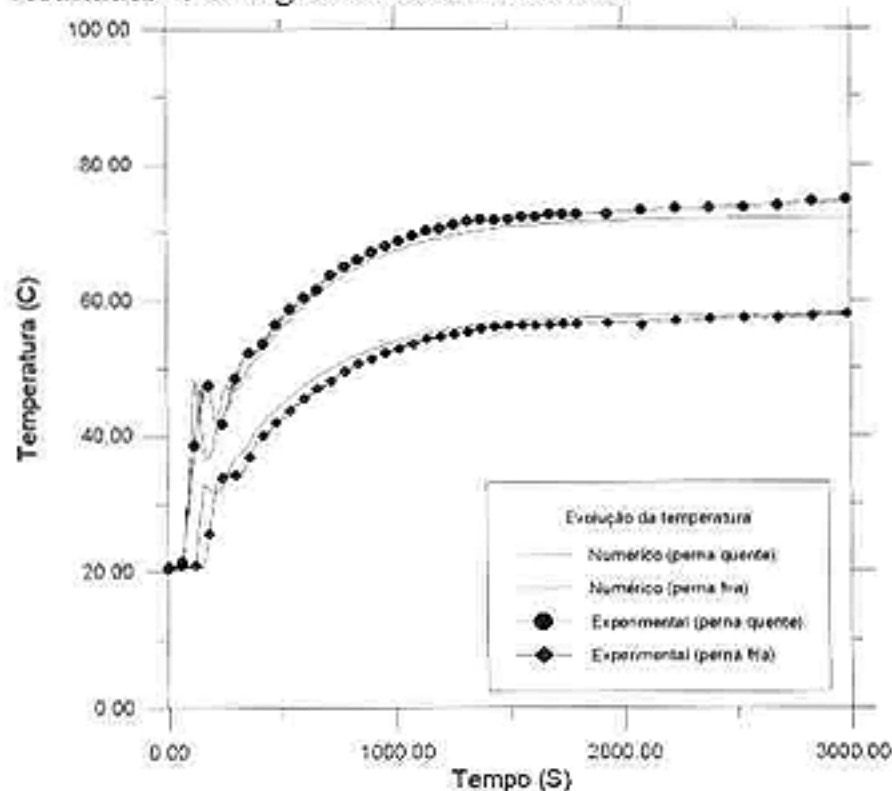


Figura 5 - Evolução da Temperatura em Escoamento Monofásico

Alterando-se o fluxo de calor dissipado e a vazão de resfriamento, simulou-se uma situação onde ocorre mudança de fase. A fig. 6 mostra os resultados numéricos e experimentais para o caso de 6600 W e 1.4 l/min. Nota-se

que as temperaturas de perna quente e fria são globalmente bem avaliadas. No entanto, o regime cíclico observado experimentalmente não foi detetado pelo modelo. A fig. 7 mostra a evolução da temperatura de saída do secundário. Nota-se que o modelo numérico superestima esta temperatura e, como no caso da perna quente, não deteta o regime cíclico.

As oscilações observadas experimentalmente na temperatura saturação do fluido - temperatura de perna quente - são resultado da variação de pressão no circuito, induzidas pela oscilação do nível de água no tanque de expansão. No modelo, a pressão foi considerada constante o que conduziu a uma temperatura de saturação constante.

Como melhoria para o modelo propõe-se:

1- introduzir o efeito de variação de pressão no circuito primário.

2- introduzir perdas convectivas para o meio ambiente.

Verificou-se, no experimento, um comportamento termo-hidráulico bastante complexo com diversos regimes de escoamento bifásico na perna quente. Pode-se caracterizar as instabilidades no sistema como sendo do tipo "Chugging" onde observam-se, na região do aquecedor, as fases de encubação, expulsão e reenchimento de fluido. Durante pequenos intervalos de tempo ocorre refluxo no circuito com vazões no sentido oposto ao esperado. Estes fenômenos locais não podem ser representados pelo modelo numérico devido ao método de integração adotado - "Método do Momento Integral" - onde uma única vazão é calculada para todo o circuito.

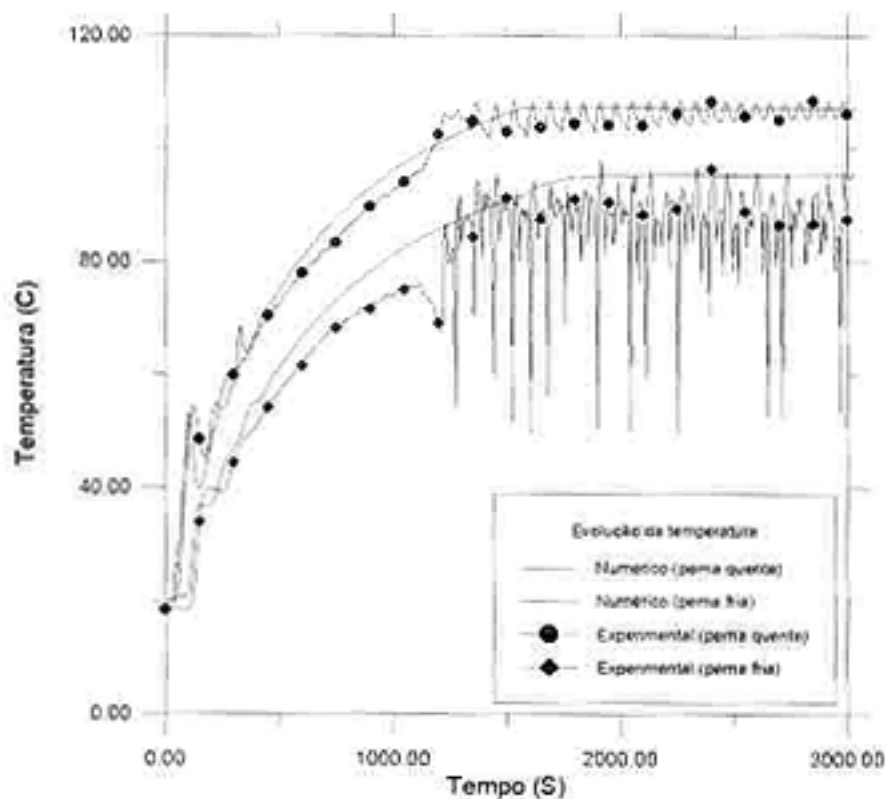


Figura 6 - Evolução da Temperatura em Escoamento Bi-fásico

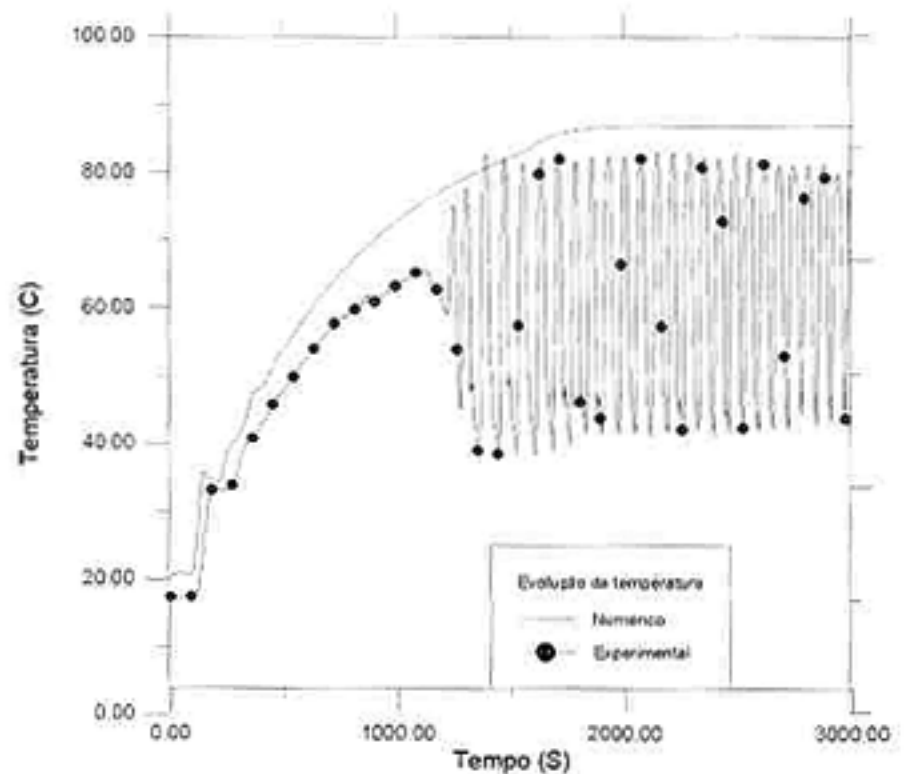


Figura 7 - Evolução da temperatura de saída do secundário.

CONCLUSÕES

O código CERNAT reproduz parcialmente o comportamento do circuito experimental em regime de circulação natural bi-fásico. Tanto na perna quente como na perna fria o modelo apresenta um nível de temperatura comparável com os resultados experimentais. Por outro lado, o modelo não deteta os regimes cíclicos presentes no experimento.

REFERÊNCIAS

- [1] Ferraz Bastos, J.L. e Takeshi Vieira da Rocha, R., **Desenvolvimento de um Programa para a modelagem do Fenômeno de Circulação Natural em Reatores Nucleares**, IV General Congress on Nuclear Energy, pág. 107-111, abril 1992.
- [2] Ferraz Bastos, J. L. e Valcov Loureiro, L., **Experimental Transient Analysis of Natural Circulation in a Complex Geometry**, Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, pág. 801-806.
- [3] Ferraz Bastos, J. L. e Torres, M. W. , **Transient Analysis of Natural Circulation in Parallel Loops**, ENCIT 94.
- [4] Churchill, S. W., **Friction Factor Equation Spans all Fluid Flow Regimes**, Chemical Engineering, pág. 91-92, 1977.

ABSTRACT

This paper presents the current state of development of CIRNAT2F. This code analyses the behavior of nuclear reactors operating in natural circulation regime for one and two-phase flow. To get data for the code validation, in two-phase flow, an experimental rectangular circuit was built. This circuit has an electrical resistance as the heat source and a coil cooler as the cold sink.