

1610-15 33-22

UFPE



Nº 67

TESE DE Mestrado
PRONUCLEAR

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS EXPERIMENTOS: CIRCULAÇÃO
NATURAL NO CTE-150 E REMOLHAMENTO NA ITR UTILIZANDO
O TRAC-PF1

AUTOR: JOSÉ DUARTE DA SILVA

RECIFE - PE
MAIO - 1994

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

Av. Prof. Luiz Freire, S/N — Cidade Universitária

CEP 50000 — RECIFE — PE — BRASIL

JOSÉ DUARTE DA SILVA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS
EXPERIMENTOS: CIRCULAÇÃO NATURAL NO CTE-150 E
REMOLHAMENTO NA ITR UTILIZANDO O TRAC-PF1**

**Dissertação submetida ao Mestrado em Ciência
e Tecnologia Nuclear, do Departamento de
Energia Nuclear, da Universidade Federal de
Pernambuco, para obtenção do título de Mestre
em Ciência, Área de Concentração:
Termohidráulica**

ORIENTADOR: DR. FERNANDO ROBERTO DE ANDRADE LIMA

CO-ORIENTADOR: DR. ANTÔNIO CARLOS DE O. BARROSO

RECIFE - PERNAMBUCO - BRASIL

MAIO - 1994

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEAR**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS
EXPERIMENTOS: CIRCULAÇÃO NATURAL NO CTE-150 E
REMOLHAMENTO NA ITR UTILIZANDO O TRAC-PF1**

JOSÉ DUARTE DA SILVA

**RECIFE - PERNAMBUCO - BRASIL
MAIO - 1994**

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS EXPERIMENTOS: CIRCULAÇÃO NATURAL NO CTE-150 E REMOLHAMENTO NA ITR UTILIZANDO O TRAC-PF1

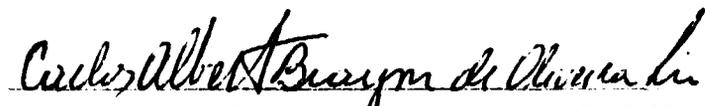
José Duarte da Silva

APROVADA EM: 25/05/94

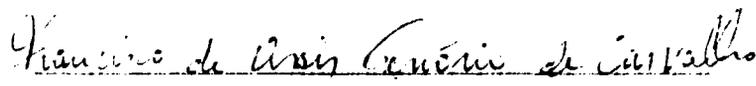
ORIENTADOR: Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima

CO-ORIENTADOR: Dr. Antônio Carlos de Oliveira Barroso

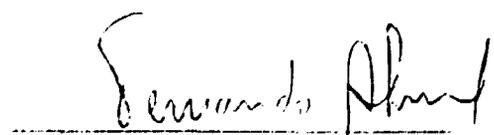
COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de O. Lira - DEN/UFPE


Prof. Dr. Elias da Silva Filho - DEN/UFPE


Prof. Dr. Francisco de Assis Tenório de Carvalho - UFRPE

Visto e permitida a impressão


Coordenador do CMCTN/DEN/UFPE

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS
EXPERIMENTOS: CIRCULAÇÃO NATURAL NO CTE-150 E
REMOLHAMENTO NA ITR UTILIZANDO O TRAC-PF1**

**A Socorro, Felipe,
Rafael e Bruno.**

AGRADECIMENTOS

A Antônio Belchior Júnior, as sugestões e esclarecimentos relativos ao uso do TRAC.

Ao Prof. Antônio Carlos de Oliveira Barroso, as leituras, sugestões, apoio e interesse na realização deste trabalho.

Ao Prof. Antônio Celso Dantas Antonino, as leituras e sugestões para a simplificação do texto.

Ao Prof. Atílio Dall'Olio, o interesse, as conversas informais que contribuíram para elucidar muitas questões.

Ao Prof. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira, as leituras e sugestões durante a preparação e execução das simulações.

Ao Prof. Elias Silva Filho, os esclarecimentos, as sugestões e críticas que de certo modo demarcaram o campo coberto pela dissertação.

Ao Prof. Fernando Roberto de Andrade Lima, a orientação, incentivo e apoio recebidos.

A Flávio de Araújo Filho, o apoio computacional relacionado ao TRAC.

A Profa. Francisca Aragão, Coordenadora do Depto. de Ensino da ETFPE, o incentivo e apoio para iniciar o Curso de Mestrado.

A Jair de Lima Bezerra, o apoio e a amizade.

Ao Prof. Ricardo Tavares Nunes, Vice-Diretor da ETFPE, o interesse no trabalho desenvolvido.

A Profa. Rita de Cássia Fernandes de Lima, os artigos, as leituras e sugestões durante a preparação e execução das simulações.

Ao Prof. Rômulo de Lacerda Júnior, Diretor da ETFPE, o entusiasmo e apoio recebidos.

Ao Prof. Zacarias Ernani das Candeias, a dedicação e paciência com que nos ensinou os fundamentos do cálculo numérico e da computação.

A Adriano, Alvim, Aníbal, Cláudio, José Luiz, Lúcia, Rita e Rubens pela receptividade quando da minha visita ao Circuito Térmico Experimental CTE-150, na COPESP/SP.

Aos colegas professores de Física da ETFPE que acreditaram na realização deste trabalho.

A Escola Técnica Federal de Pernambuco, a permissão para cursar o Mestrado no DEN/UFPE.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1. Procedimento para validação do TRAC.....	9
2. Parte do sistema primário do CTE-150	35
3. Esquema do circuito com os elementos simulados.....	39
4. Esquema de modelagem dos elementos do CTE-150	42
5. Diagrama do escoamento na instalação ITR.....	50
6a. Esquema de modelagem da seção de testes	51
6b. Nodalização radial e axial da seção de testes.....	51
7. Temperatura do fluido a jusante de A4.....	57
8. Temperatura do fluido a montante de A4	59
9. Aumento de temperatura.....	61
10. Evolução temporal da taxa de escoamento do fluido.....	62
11. Temperaturas de parede medidas e calculadas.....	65
12. Propagação da frente de resfriamento rápido.....	67
13. Temperaturas de parede calculadas com TRAC.....	68
14. Temperaturas de parede calculadas com TRAC e RELAP....	69
15. Quantidade de água arrastada pelo vapor - DEN/UPPE....	70
16. Quantidade de água arrastada pelo vapor - COPESP.....	71
17. Quantidade de água arrastada pelo vapor - CNEN/UB.....	72

LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁGINA
1. Evolução do TRAC.....	6
2. Experimentos selecionados para a Validação de Desenvolvimento.....	12
3a. Condições experimentais de teste FLECHT para os cálculos do TRAC.....	13
3b. Resumo dos resultados calculados e medidos à altura do feixe de barras no experimento FLECHT.....	14
4. Instalações selecionadas para a fase Validação Independente do TRAC.....	16
5. Características dos testes selecionados para cálculos com o TRAC-PF1/MOD1.....	18
6. Variáveis consideradas na aproximação do estado estacionário.....	29
7. Variáveis amostradas.....	37
8. Descrição dos componentes utilizados na simulação do CTE-150.....	41
9. Descrição dos componentes utilizados na simulação da seção de testes.....	52
10. Resultados típicos para circulação natural.....	63
11. Resultados típicos para circulação natural.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área de escoamento, m^2
C	coeficiente de atrito dinâmico
C_i	coeficiente de cisalhamento
e	energia interna específica, J/kg
g	aceleração da gravidade, m/s^2
h	coeficiente de transferência de calor, $W/m^2.K$
h	entalpia específica, J/kg
p	pressão, Pa
q	densidade de potência, W/m^3
t	tempo, s
T	temperatura, K
V	velocidade, m/s
vol	volume da célula, m^3

LETRAS GREGAS

α	fração de vazios
Γ	taxa de geração de vapor, $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$
ρ	densidade, kg/m^3

SUBSCRITOS

a	gás não condensável
f/l	líquido
g	gás
i	interfacial
v/s	vapor
sl	líquido saturado
w	parede

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS EXPERIMENTOS:
CIRCULAÇÃO NATURAL NO CTE-150 E REMOLHAMENTO
NA ITR UTILIZANDO O TRAC-PP1**

Autor: José Duarte da Silva

Orientador: Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima

Co-orientador: Dr. Antônio Carlos de Oliveira Barroso

RESUMO

A utilização de códigos computacionais para a análise de acidentes e outros transitórios em usinas nucleares pressupõe que seus modelos matemáticos são capazes de reproduzir de forma satisfatória os processos termodinâmicos típicos do sistema, independentemente de suas dimensões.

O código computacional TRAC (Transient Reactor Analysis Code), foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Los Alamos, Novo México, para executar análises não-conservativas de acidentes postulados em reatores à água leve.

Neste trabalho o TRAC foi usado para simular experimentos de circulação natural realizados com o Circuito Térmico Experimental de 150 bar (CTE-150), a primeira instalação de testes integrais do Brasil, na Coordenadoria de Projetos Especiais do Ministério da Marinha (COPESP), São Paulo e um experimento de remolhamento num tubo da seção de testes da Instalação de Testes de Remolhamento (ITR), no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Belo Horizonte.

No CTE-150, é avaliado o comportamento do circuito sob duas diferentes condições de potência térmica: 20 kW e 120 kW. Na ITR, são avaliados a propagação da frente de resfriamento rápido, a taxa de escoamento das gotículas arrastadas pelo vapor e a temperatura nas paredes do tubo em diferentes elevações.

Uma análise comparativa, para avaliar a adequação dos modelos disponíveis no TRAC para representar os fenômenos envolvidos nos experimentos, mostra, que com exceção da velocidade de propagação da frente de remolhamento, há uma boa concordância entre os valores experimentais e calculados.

**COMPUTATIONAL SIMULATION OF THE EXPERIMENTS:
NATURAL CIRCULATION AT CTE-150 AND REWETTING
AT ITR USING TRAC-PF1**

Author: José Duarte da Silva

Adviser: Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima

Coadviser: Dr. Antônio Carlos de Oliveira Barroso

SUMMARY

Utilization of advanced computer codes for analysis of postulated accidents and other transients in nuclear plants requires that the mathematical models can satisfactorily reproduce the typical thermal-hydraulics system process.

The Transient Reactor Code (TRAC) was developed at the Los Alamos National Laboratory to provide an advanced best-estimate predictive capability for the analysis of postulated accidents in light water reactors.

In this work the TRAC was used to simulate experiments of natural circulation realized with the Circuito Térmico Experimental de 150 bar (CTE-150), the first Brazilian integral test facility at "Coordenadoria de Projetos Especiais do Ministério da Marinha" (COPESP), São Paulo and a rewetting experiment in a single tube test section carried out in the "Instalação de Testes de Remolhamento (ITR)" at CDTN, Belo Horizonte.

In the first one, experiments verifies the loop behavior in two transient conditions with different thermal power: 20 kW and 120 kW. In the second, the quench front propagation, the liquid mass collected in the carry over measuring tube and the wall temperature at different elevations during the flooding experiment was measured.

A comparative analysis, for code consistency, shows a good agreement between the code results and experimental data, except for the quench front velocity.

SUMÁRIO

	PÁGINA
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
RESUMO	x
SUMMARY	xii
SUMÁRIO.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos do presente trabalho.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Características do TRAC.....	5
2.1.1. Modularidade dos componentes.....	8
2.1.2. Modularidade das funções.....	8
2.2. Testes para a validação do TRAC.....	9
3. MÉTODOS BÁSICOS.....	19
3.1. Hidrodinâmica.....	19
3.1.1. Equações de campo.....	19
3.1.2. Equações constitutivas.....	23
3.2. Transferência de calor na estrutura.....	24
3.3. Estratégias gerais de solução.....	24
3.3.1. Solução para o regime transitório.....	25
3.3.2. Soluções para o estado estacionário.....	26

4. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	33
4.1. Circuito Térmico Experimental de 150 bar.....	33
4.1.1. Operação do circuito.....	36
4.1.2. Medida dos parâmetros no CTE-150.....	37
4.1.3. Experimentos simulados.....	38
4.1.4. Modelo físico adotado.....	40
4.1.5. Condições de contorno e hipóteses assumidas.....	42
4.2. Instalação de Testes de Remolhamento	46
4.2.1. Seção de testes.....	47
4.2.2. Medida dos parâmetros na instalação de testes	47
4.2.3. Experimento simulado.....	49
4.2.4. Modelo físico adotado.....	51
4.2.5. Condições de contorno e hipóteses assumidas.....	52
5. RESULTADOS.....	56
6. CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
APÊNDICE 1: Componentes e funções usados no TRAC.....	79
APÊNDICE 2: Calor transferido na estrutura.....	83

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de códigos computacionais avançados para a análise da eficiência do resfriamento de emergência do núcleo durante um acidente por perda de refrigerante primário (APRP) em reatores à água leve requer suporte de dados experimentais obtidos através de estudos dos fenômenos específicos (teste de efeitos separados) e de experimentos em instalações de testes integrais em grande escala simulando a operação de todos os componentes e controles essenciais de uma usina nuclear.

A compreensão do fenômeno de circulação natural numa geometria complexa como a de uma usina nuclear constitui um dos passos mais importantes da pesquisa em segurança e operação de reatores nucleares.

Para obter-se conhecimentos nesta área, iniciou-se um programa analítico e experimental na COPESP em 1991. Este programa inclui estudos fundamentais dos escoamentos monofásico e bifásico e aplicação das técnicas atuais de simulação [1].

Experimentos foram realizados para verificar a capacidade da instalação de testes integrais da Coordenadoria de Projetos Especiais do Ministério da Marinha (COPESP), chamada Circuito Térmico Experimental de 150 bar (CTE-150), de operar em regime de circulação natural. Nestes experimentos as vazões e temperaturas foram determinadas para diferentes condições de potência térmica: 20 kW e 120 kW.

Outro programa de pesquisa em segurança de reatores encontra-se em andamento no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/MG), e contempla as atividades experimentais e analíticas. A pesquisa experimental se estende desde a fase final da despressurização rápida (blowdown) até a fase de reinundação (reflood) de um acidente por perda do refrigerante primário com grande ruptura (APRPGR). O programa começou com experimentos numa seção de testes com um único tubo na Instalação de Testes de Remolhamento (ITR), para estudo dos fenômenos básicos durante a fase de reinundação de um APRP e continuará numa instalação de testes mais sofisticada, o Dispositivo para Testes de LOCA - Efeitos Separados (DTLES) [2].

1.1. Objetivos do presente trabalho

Os objetivos gerais do presente trabalho são: executar simulações computacionais dos experimentos de circulação natural no CTE-150, a primeira instalação de testes integrais do Brasil, e do experimento de remolhamento realizado na ITR; comparar os resultados calculados com os valores experimentais.

Os objetivos específicos são: calcular a taxa de escoamento e a temperatura do fluido nas pernas quente e fria do CTE-150; avaliar a propagação da frente de resfriamento rápido, a evolução da taxa de escoamento do líquido arrastado pelo vapor e a variação da temperatura da parede em diferentes elevações do tubo da seção de testes da ITR.

Os resultados foram obtidos através do Programa Computacional TRAC-PF1 (Transient Reactor Analysis Code - versão PF1) [3], utilizando um microcomputador Compaq 386-25 MHz com 16 MB de RAM, operando com o DOS 3.30. A versão do TRAC-PF1 utilizada é o resultado da migração feita para NDP-FORTRAN [4], a partir da adaptação 7.6 executada pelo Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) na versão 6.0 do código original.

Uma análise comparativa entre os resultados obtidos com o TRAC e os valores medidos experimentalmente é apresentada no Capítulo 5 para avaliar a adequação dos modelos disponíveis no TRAC para representar os fenômenos envolvidos nos experimentos.

Este trabalho representa o primeiro passo na capacitação dos pesquisadores do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE) no uso do TRAC para simular acidentes e transitórios termohidráulicos em centrais nucleares do tipo PWR. Representa, também, mais uma contribuição para a fase de Validação Independente do TRAC.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O TRAC é um código avançado não-conservativo (best-estimate) para análises de acidentes em reatores refrigerados a água leve (LWR). Foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Los Alamos, Novo México, sob a responsabilidade de "Reactor Safety Research Division of the US Nuclear Regulatory Commission". Uma versão preliminar, consistindo apenas de componentes unidimensionais, foi completada em Dezembro de 1976, mas não foi publicada nem formalmente documentada. Contudo, foi usada no desenvolvimento do TRAC-Pl e formou a base para os módulos dos componentes unidimensionais.

O programa foi projetado, inicialmente, para a análise de APRPGR em reatores pressurizados a água leve (PWR). Devido à sua versatilidade, contudo, pode-se aplicá-lo diretamente a uma grande variedade de fenômenos, desde simples quedas de pressão em tubos até um acidente completo por perda de refrigerante primário em instalações de testes.

A Tabela 1 mostra a evolução do desenvolvimento do código.

2.1. Características do TRAC

O TRAC pode ser caracterizado como um programa computacional avançado, não conservativo, para sistemas LWR. Os modelos do TRAC foram projetados para permitir soluções realísticas, em oposição aos modelos conservativos usados nos códigos de licenciamento.

Tabela 1 - Evolução do TRAC [5]

VERSÃO	ANO	APLICAÇÃO	APERFEIÇAMENTO
preliminar	1976	APRFRGR	-
TRAC-P1	1977	APRFRGR	Multidimensional
TRAC-P1A	1979	APRFRGR	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nos modelos hidrodinâmicos e de transferência de calor 2. mais fácil de instalar nos vários tipos de computador
TRAC-PD2	-	APRFRGR, embora tenha sido aplicado com sucesso à acidentes com pequena ruptura	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modelos de reinundação e de transferência de calor 2. Métodos de solução numérica 3. Capacidade de simular APRFRGR
TRAC-PF1	1981	Acidentes postulados e outros transitórios em FWR	<ol style="list-style-type: none"> 1. Usa um modelo completo de dois-fluidos com dois passos numéricos 2. Modela melhor o escoamento em contra-corrente 3. Um componente CORE unidimensional permite cálculos rápidos 4. Possui um campo de gás não condensável 5. Lógica e entrada de dados aperfeiçoadas 6. Maior habilidade em simular APRFRGR

A principal diferença entre o TRAC e os outros códigos, por exemplo RELAP4, é que seus modelos geométricos para os componentes do sistema são mais detalhados e os tratamentos para a termohidráulica bifásica partem de princípios básicos gerais.

Devido às suas características avançadas, pode modelar a maioria dos fenômenos físicos que são relevantes para a análise de um APRP. Entre estes fenômenos pode-se destacar:

- Penetração do refrigerante de emergência (ECC) no espaço anular (downcomer) e desvio (bypass);
- Reenchimento da câmara plena inferior, arraste (sweepout) e efeitos de separação de fases;
- Propagação das frentes de resfriamento rápido com inundação por baixo e pelo topo;
- Escoamento multidimensional no espaço anular, núcleo e regiões da câmara plena;
- Formação de piscina e escoamento em contra-corrente limitado na placa suporte superior do núcleo (UCSP);
- Aprisionamento de vapor durante a reinundação;
- Formação de piscina na câmara plena superior;
- Escoamento crítico (choking);
- Injeção direta de água subresfriada ECC em um dado local do sistema, sem zonas artificiais de mistura;
- Arraste de gotículas pelo vapor durante a reinundação;
- Reação água-metal;
- Perdas por atrito nas paredes; e
- Efeitos "golpes de aríete".

Uma característica importante do TRAC é sua capacidade de simular a seqüência completa de um acidente. Por exemplo, o código simula as fases de despressurização rápida (blowdown), reenchimento (refill) e reinundação (reflood) de um APRP. Isto elimina a necessidade de usar diferentes códigos para analisar um determinado acidente.

2.1.1. Modularidade dos componentes.

O programa é completamente modular por componente. Os componentes são especificados pelo usuário nos "dados de entrada" e permitem modelar, praticamente, qualquer planta PWR ou configuração experimental. Isto dá ao TRAC grande versatilidade no campo das possíveis aplicações. Esta modularidade permite, também, que os módulos para cada componente possam ser melhorados, modificados ou acrescentados a outros sem perturbar o restante do código.

2.1.2. Modularidade das funções

O programa é, também, modular por função; a maioria dos cálculos são realizados separadamente. Por exemplo, o algoritmo

básico para a solução da hidrodinâmica unidimensional, o algoritmo para a solução do campo de temperaturas da parede, a seleção dos coeficientes de transferência de calor e outras funções são efetuadas em rotinas ou séries de rotinas separadas que são acessadas por todos os componentes. Esta modularidade funcional permite que o código seja aperfeiçoado assim que novas e melhores correlações sejam propostas. Os componentes e as funções utilizados pelo programa podem ser encontrados no Apêndice 1.

2.2. Testes para validação do TRAC

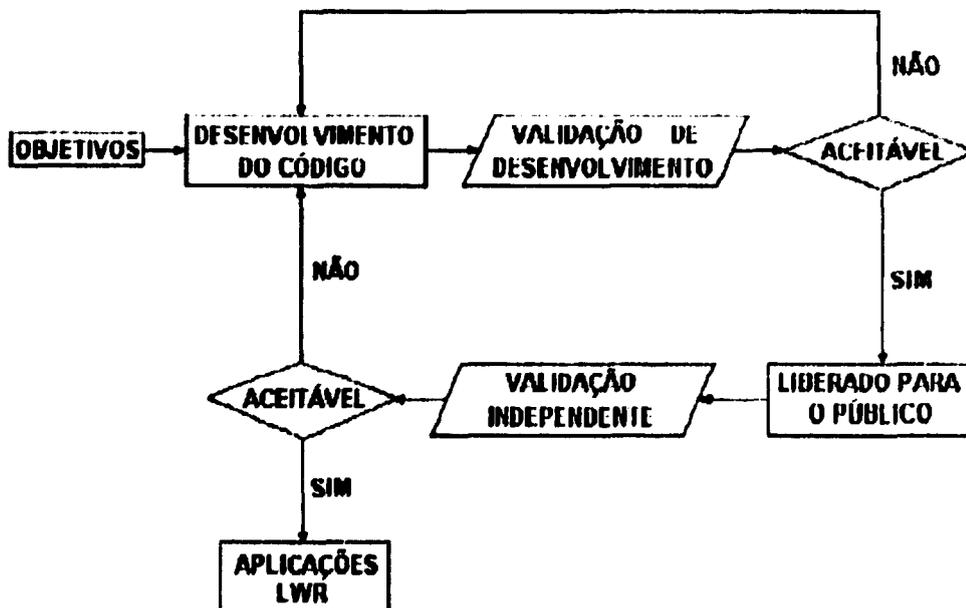


Figura 1. Procedimento para validação do TRAC [5]

A Figura 1 mostra o procedimento geral para os testes e julgamento do TRAC. O programa é testado em duas fases: a primeira, Validação de Desenvolvimento (testes realizados por pesquisadores envolvidos com o desenvolvimento do código) envolve análises pós-testes de uma larga variedade de experimentos termohidráulicos.

O objetivo, da fase Validação de Desenvolvimento, é definir os limites de validade dos métodos, modelos e correlações através da comparação entre os valores calculados e os valores medidos experimentalmente. Nesta fase a sensibilidade do código é examinada quanto aos dados de entrada, aos modelos assumidos e quanto às técnicas de solução; são identificados pontos fracos e/ou experimentos que devem ser efetuados para a completa validação do código.

Quando o código atinge bom desempenho dos seus objetivos, ele é liberado para o público e começa a segunda fase dos testes. É a fase da Validação Independente (testes realizados por pesquisadores não envolvidos com o desenvolvimento do código), que envolve análises pré e pós-testes de experimentos realizados em determinadas instalações.

O objetivo da Validação Independente é determinar a capacidade preditora do TRAC quando aplicado a novos testes envolvendo diferentes escalas e configurações experimentais.

Se os resultados são satisfatórios, o código pode então ser aplicado, com confiança, a transitórios em instalações do tipo PWR.

A Tabela 2 mostra os efeitos termohidráulicos mais importantes e os testes selecionados para a fase Validação de Desenvolvimento do TRAC-PIA. Para as cinco primeiras análises foi utilizada apenas a capacidade unidimensional do código, enquanto que para as demais foram efetuados cálculos multidimensionais.

Os experimentos selecionados incluem testes de efeitos separados (testes que envolvem um só componente), efeitos sinérgicos (vários componentes acoplados, mas uma só fase do APRP) e efeitos integrais (vários componentes e mais de uma fase do APRP).

Tabela 2 - Experimentos Seleccionados para a Validação de Desenvolvimento (CISE = Centro Informazoni Studi Esperienze. FLECHT = Full-Length Emergency Cooling Heat Transfer. LOFT = Loss-of-Fluid Test)[5].

EXPERIMENTO	EFEITO TERMOHIDRÁULICO
1. Despressurização rápida no tubo horizontal Edwards. (Problema Padrão 1)	Efeitos separados, escoamento crítico unidimensional, mudança de fase, atrito na parede.
2. Despressurização rápida em tubo não aquecido - CISE (Teste 4)	Efeitos especificados no n.1 e mais transferência de calor nas paredes do tubo, mudanças na área de escoamento e efeitos gravitacionais.
3. Despressurização rápida em tubo aquecido - CISE (Teste R)	Os mesmos efeitos do n.2 e mais: fluxo crítico de calor (CHF).
4. Despressurização rápida em vaso de escala real MARVIKEN (Teste 4)	Os mesmos efeitos do n.1 e mais: efeitos de escala real.
5. Despressurização rápida em circuito isotérmico - SEMISCALE 1½ (Teste 1011, Problema Padrão 2)	Efeitos sinérgicos e de sistema, escoamento unidimensional, mudança de fase, escorregamento, atrito nas paredes e escoamento crítico nos bocais.
6. Despressurização rápida em circuito aquecido SEMISCALE Mod-1 (Teste S-02-8, Problema Padrão 5)	Os mesmos do n.5 e mais: modelo de vaso tridimensional com transferência de calor nas barras incluindo ebulição nucleada, ponto crítico da ebulição nucleada (DNB) e pós-DNB.
7. Create quasi-static "downcomer" /ECC bypass experiments	Efeitos separados, escoamento contracorrente, arraste interfacial e transferência de calor, condensação.
8. Testes de inundação forçada FLECHT	Efeitos separados, transferência de calor na reinundação, propagação das frentes de resfriamento rápido e gotículas arrastadas pelo vapor.
9. Despressurização rápida com injeção na perna fria em circuito não nuclear LOFT (Test L1-4, Problema Padrão 7)	Efeitos integrais durante a despressurização e reenchimento, escala entre 50% e 100%.

Análises e comparações detalhadas entre os resultados obtidos pelo TRAC e valores experimentais para os testes citados na Tabela 2 são encontrados na Ref.[6]. As Tabelas 3a e 3b ilustram algumas destas comparações.

Tabela 3a - Condições experimentais de teste FLECHT para os cálculos do TRAC [5]

teste Nº	pressão MPa	temperatura do fluido na entrada K	velocidade de escoamento m/s	potência linear de pico, kW/m
03541	0,39	337,6	0,25	4,07
04831	0,28	324,8	0,04	3,12
02414	0,28	327,1	0,02	2,76

De acordo com a Tabela 3b, verifica-se que que o TRAC calcula a temperatura máxima muito bem, para todos os testes. Para o caso da mais alta taxa de escoamento (Teste 03541), os valores de "turnaround time" e do instante do resfriamento rápido estão em boa concordância com os valores experimentais. Porém, para a mais baixa taxa de escoamento não é possível dizer o mesmo.

Tabela 3b - Resumo dos resultados calculados e medidos à altura
do feixe de barras no experimento FLECHT [5]

	teste 03541		teste 04831		teste 02414	
	Exper. TRAC		Exper. TRAC		Exper. TRAC	
temperatura						
inicial, K	1143	1144	1144	1144	1144	1144
temperatura						
máxima, K	1193	1190	1333	1333	1453	1449
aumento de						
temp., K	50	46	189	189	308	305
turnaround						
time, s	8	6	74	40	96	80
instante de						
resfriamen- to rápido, s	71	72	219	170	345	210

A fase de Validação Independente do TRAC está sendo efetuada em várias instalações termohidráulicas, nos Estados Unidos da América e em outros países. A Tabela 4 mostra as principais instalações selecionadas para esta atividade.

Foram efetuadas predições pré e pós-testes para o Teste L2-2 [7], o primeiro teste nuclear LOFT e as análises podem ser encontradas na Ref. [8].

Outros testes, não citados acima, foram realizados com uma versão atualizada, TRAC-PF1/MOD1. Enfocam duas áreas de interesse:

- a) Fenômenos de spray no pressurizador
- b) Fenômeno "boil-up" no feixe de barras. "Boil-up" significa que o experimento foi realizado com massa do fluido aproximadamente constante, pressão constante e a potência vai sendo aumentada em degraus.

Tabela 4 - Instalações seleccionadas para a fase Validação Independente do TRAC [5]

INSTALAÇÃO	LOCALIZAÇÃO	ESCALA	DESCRIÇÃO
Semiscale Mod-3	I d a h o National Engineering Laboratory	Pequena	Instalação em escala 1:1 para APRP Integral com dois circuitos ativos de refrigeração, "downcomer" externo e núcleo com injeção por cima.
LOBI	I s p r a , Italia	Pequena	Instalação para despressurização rápida/reenchimento com dois circuitos ativos de refrigeração e simulação de um FWR em escala 1:1.
FLECHT - SEASET	Westinghouse	Pequena	Instalação para reinundação com efeitos separados e de sistema com um só feixe de barras no núcleo em escala 1:1 um circuito refrigerante.
Nuclear LOFT	I d a h o National Engineering Laboratory	Intermédia	Instalação para APRP integral com feixe nuclear e dois circuitos ativos de refrigeração
PKL	República Federal da Alemanha	Intermédia	Instalação para reenchimento /reinundação com 3 circuitos de refrigeração (sem bombas), "downcomer" externo e 340 barras combustíveis.
CCTF	Japão	Intermédia	Instalação para reinundação com dois circuitos de refrigeração (sem bombas) e núcleo cilíndrico com 2000 barras combustíveis
SCTF	Japão	Grande	Instalação escala 1:1 para reinundação - efeitos separados - elementos tipo placa, pleno superior e inferior e simulação de "downcomer".
UPTF	República Federal da Alemanha	Grande	Instalação de testes em escala 1:1 - efeitos separados - com pleno superior e inferior e "downcomer".
Marviken III	Suécia	Grande	Instalação em escala 1:1 - efeitos separados - para escoamento crítico em tubos.

Para os fenômenos spray no pressurizador foi selecionada a Instalação NEPTUNUS, que foi operada em 1972 na Delft University of Technology. A Instalação de testes NEPTUNUS consiste de um vaso de pressão com uma linha de surto na base e uma linha de spray no topo[9]. Estes experimentos apresentam resultados muito confiáveis pois a instalação é de grande escala (diâmetro do vaso = 0,80 m; altura do vaso = 2,5 m) e foi operada à pressão total (12,4 MPa).

Os resultados fornecidos pelo código estão em boa concordância com os valores experimentais[9].

Para os fenômenos de "boil-up", foram selecionados testes em duas instalações segundo a Tabela 5.

Tabela 5 - Características dos testes selecionados para cálculos com o TRAC-PF1/MOD1 [7]

EXPERIMENTO	THETIS	PERICLES
Instituição	UKAEA	CEA/França
Ano do relatório	1980	1985
Intervalo de pressão	0,2 A 4 MPa	0,3 a 0,55MPa
Intervalo de potência	10 a 150 kW	540 a 1356 kW
Número de barras	61	357

A instalação THETIS consiste de um vaso de pressão cilíndrico em posição vertical contendo a aparelhagem de testes num tubo fechado na base e aberto no topo.

A seção de testes da instalação PERICLES, de forma retangular, contém 3 conjuntos de barras aquecidas eletricamente (7 x 17) dispostos lado a lado formando um feixe de barras (7 x 51); foi operada à pressão de 5,5 bars.

O parâmetro mais importante para este tipo de experimento, a pressão, é calculado com satisfatória concordância em relação aos valores experimentais.

2. MÉTODOS BÁSICOS

Neste capítulo são apresentadas as equações para os fenômenos hidrodinâmicos e de transferência de calor e discutidas as estratégias gerais para as soluções nos transitórios e em estado estacionário.

3.1. Hidrodinâmica

3.1.1. Equações de campo

O código TRAC-PF1 usa o mesmo modelo bifásico de dois-fluidos para o escoamento do fluido em casos unidimensional e tridimensional. As equações que descrevem o modelo de dois-fluidos para o caso tridimensional são dadas por [3] :

Equação para a massa líquida

$$\frac{\partial(1 - \alpha)\rho_l}{\partial t} + \nabla \cdot [(1 - \alpha)\rho_l \vec{V}_l] = -\Gamma \quad (1)$$

Equação para a massa do vapor

$$\frac{\partial(\alpha\rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho_g\vec{V}_g) = \Gamma \quad (2)$$

Equação para a massa do gás não-condensável

$$\frac{\partial(\alpha\rho_n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho_n\vec{V}_g) = 0 \quad (3)$$

Equação para a quantidade de movimento do vapor

$$\frac{\partial\vec{V}_g}{\partial t} + \vec{V}_g \cdot \nabla\vec{V}_g = - \frac{C_d}{\alpha\rho_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) |\vec{V}_g - \vec{V}_l| - \frac{1}{\rho_g} \nabla p - \frac{C_{wg}}{\alpha\rho_g} \vec{V}_g |\vec{V}_g| + \vec{g} \quad (4)$$

Equação para a quantidade de movimento do líquido

$$\begin{aligned} \frac{\partial\vec{V}_l}{\partial t} + \vec{V}_l \cdot \nabla\vec{V}_l = & - \frac{C_d}{(1-\alpha)\rho_l} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) |\vec{V}_g - \vec{V}_l| - \frac{1}{\rho_l} \nabla p \\ & - \frac{C_{wl}}{(1-\alpha)\rho_l} \vec{V}_l |\vec{V}_l| + \vec{g} \end{aligned} \quad (5)$$

Equação para a energia do vapor

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_g e_g) + \nabla \cdot (\alpha \rho_g e_g \vec{V}_g) =$$

$$-p \frac{\partial \alpha}{\partial t} - p \nabla \cdot (\alpha \vec{V}_g) + q_{wg} + q_{ig} + \Gamma h_{ag} \quad (6)$$

Equação para a energia total

$$\frac{\partial [(1-\alpha) \rho_l e_l + \alpha \rho_g e_g]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-\alpha) \rho_l e_l \vec{V}_l + \alpha \rho_g e_g \vec{V}_g] =$$

$$-p \nabla \cdot [(1-\alpha) \vec{V}_l + \alpha \vec{V}_g] + q_{wl} + q_{wg} \quad (7)$$

Nestas equações a densidade e energia do vapor são a soma das componentes condensável e não condensável.

Em adição às relações termodinâmicas necessárias ao fechamento do sistema, são requeridas especificações para o coeficiente de arraste interfacial (c_i), calor transferido nas interfaces (q_{ig}), taxa de geração de vapor (Γ), coeficientes de cisalhamento na parede (c_{vg} e c_{vl}), e o calor transferido através da parede (q_{vg} e q_{vl}).

O valor de Γ é avaliado através da seguinte relação,

$$\Gamma = \frac{-q_{ig} - q_{ll}}{h_{sg} - h_{sl}} \quad (8)$$

onde,

$$q_{ig} = h_{ig} A_i \frac{(T_{ss} - T_g)}{vol} \quad (9)$$

e

$$q_{ll} = h_{ll} A_l \frac{(T_{ss} - T_l)}{vol} \quad (10)$$

sendo,

A_i : área interfacial

h_i : coeficiente de transferência de calor interfacial

T_{ss} : temperatura de saturação correspondente à pressão parcial do vapor.

Os termos correspondentes ao calor transferido através da parede assumem a forma,

$$q_{wg} = h_{wg} A_{wg} \frac{(T_w - T_g)}{vol} \quad (11)$$

$$q_{wl} = h_{wl} A_{wl} \frac{(T_w - T_l)}{vol} \quad (12)$$

3.1.2. Equações constitutivas.

As equações de campo, eq. (1) a eq. (7), necessitam de equações constitutivas ou auxiliares. As equações de estado para cada fase são requeridas. São necessários, também, o cisalhamento entre o líquido, vapor e a parede, arraste interfacial, calor transferido na parede, calor transferido na interface, e a taxa líquida de vaporização.

No TRAC-PF1 são desprezados, nas equações de quantidade de movimento, os termos relativos ao vapor gerado em curto intervalo de tempo e de forma pulsante. As quantidades de calor transferido na parede, q_{wg} e q_{wl} , são computadas na forma padrão.

As equações constitutivas utilizadas pelo TRAC-PF1 podem ser encontradas na Ref. [3].

3.2. Transferência de calor na estrutura

Os três mecanismos fundamentais de transferência de calor são modelados pelo TRAC-PF1. Eles incluem o calor transferido na interface entre as fases líquida e vapor, condução de calor na estrutura dos componentes do reator, e o calor transferido entre a estrutura e o fluido. O calor transferido nas interfaces é discutido na Ref. [3]. As duas outras modalidades podem ser encontradas no Apêndice 2.

3.3. Estratégias gerais de solução

Cada intervalo de tempo, nos cálculos de transitórios, consiste de várias iterações em todos os componentes do sistema. A finalidade destas iterações é convergir para a solução das equações de diferenças finitas não lineares.

Dois tipos de cálculos para estado estacionário podem ser executados pelo TRAC. O primeiro tem aplicabilidade geral enquanto que o segundo é usado para obter condições iniciais de estado estacionário para um PWR.

3.3.1. Solução para o regime transitório.

Na solução das equações termohidráulicas, pelo menos seis passos são executados em cada componente. A subrotina PREP executa dois passos em todos os componentes. Durante o primeiro passo, coeficientes de transferência de calor (HTCs) são avaliados e as matrizes para as equações estabilizadoras do movimento são obtidas e reduzidas. No segundo passo é feita retro-substituição na equação do movimento. Os próximos dois ou mais passos chamam as rotinas básicas hidrodinâmicas até que uma solução seja encontrada dentro do critério de convergência ou que o número máximo de iterações seja excedido.

Se o processo de iteração convergir, um par de passos finais é executado. O primeiro destes passos reduz as equações estabilizadoras para massa e energia, o segundo para compilar as soluções destas equações, atualizar a condução do calor na parede, barra ou placa, e gera as informações

requeridas para o intervalo de tempo seguinte. Se o processo de iteração não convergir, o intervalo de tempo é dividido pela metade; então, outra tentativa é feita. Depois de seis tentativas mal sucedidas, o código produz um arquivo de saída e finaliza o processamento.

3.3.2. Soluções para o estado estacionário.

Dois cálculos distintos estão disponíveis para o estado estacionário: cálculos generalizados de estado estacionário e cálculo de inicialização PWR. O primeiro determina as condições independentes do tempo para um sistema de geometria e parâmetros quaisquer, porém fixados. O segundo ajusta certos parâmetros do circuito às condições de escoamento especificadas pelo usuário, porém apenas para determinadas geometrias típicas de sistemas PWR.

Ambos utilizam as rotinas fluidodinâmicas e de transferência de calor para procurar as condições independentes do tempo. A pesquisa termina quando a variação nas grandezas térmicas e fluidas é menor do que o valor especificado pelo usuário.

Embora as mesmas subrotinas sejam usadas nos cálculos transitórios e de estado estacionário, existem diferentes caminhos nos quais seu comportamento difere nos dois cálculos. As diferenças mais marcantes são:

- Os intervalos de tempo usados para os cálculos da transferência de calor e escoamento do fluido não precisam ser iguais durante um cálculo de estado estacionário.

- É inibida a ocorrência de fluxo crítico de calor (CHF) durante os cálculos de estado estacionário. Isto resulta num HTC que não pode sofrer rápida redução por "burnout".

- Pressurizadores são modelados como condições de contorno sobre a pressão durante os cálculos do estado estacionário. Então, o inventário de massa e energia de cada pressurizador, bem como a pressão, permanece constante independente da taxa de escoamento entre ele e o restante do sistema.

- Trips (variáveis lógicas que controlam certas operações tais como abertura e fechamento de válvulas, utilização de tabelas, etc.) são inibidas durante os cálculos de estado estacionário.

- A potência do reator é zero para o período em que se inicializa os cálculos do estado estacionário. Em seguida, é aumentada até seu valor nominal quando a velocidade do fluido tiver se aproximado do seu valor de equilíbrio.

- Durante os cálculos do estado estacionário a fonte de quantidade de movimento na bomba é considerada como a média para evitar oscilações.

- Não são efetuados cálculos de cinética de reatores.

3.3.2.1. Cálculos generalizados de estado estacionário.

Os cálculos generalizados de estado estacionário consistem de uma taxa de variação normalizada baseada na primeira derivada numérica da fração de vazios, pressão, temperatura do líquido e do vapor, e velocidades. A taxa de variação de determinado parâmetro é verificada a cada 50 intervalos de tempo durante o processamento computacional do estado estacionário. Quando o máximo valor absoluto desta taxa, para todas as células do sistema, for menor que o critério de convergência especificado pelo usuário, os cálculos de estado estacionário serão encerrados.

3.3.2.2. Cálculos de inicialização PWR.

Os cálculos de inicialização PWR fornecem um modo conveniente para o usuário conseguir as principais condições de operação de um PWR através do ajuste de certos parâmetros operacionais. Estas condições são: potência do reator, pressão do pressurizador, taxa de escoamento do fluido no circuito primário e temperaturas na entrada do vaso. A Tabela 6 mostra a relação das variáveis que são consideradas na aproximação do estado estacionário.

Tabela 6 - Variáveis consideradas na aproximação do estado estacionário

VARIÁVEIS PARA O ESCOAMENTO UNIDIMENSIONAL DO FLUIDO	
VARIÁVEL DEPENDENTE	FORÇAS GENERALIZADAS
Velocidade da mistura	Atrito na parede Gradientes de pressão Gravidade Fluxos de quant. movimento
Massa da mistura	Fontes Fluxos de massa
Energia da mistura	Fontes Fluxos de energia
Massa do vapor	Fontes Mudança de fase Fluxos de massa
Energia do vapor	Fontes Mudança de fase Fluxos de energia

Tabela 6 - Variáveis consideradas na aproximação do estado estacionário (continuação)

VARIÁVEIS PARA O ESCOAMENTO TRIDIMENSIONAL DO FLUIDO	
VARIÁVEL DEPENDENTE	FORÇAS GENERALIZADAS
Velocidade do vapor	Atrito na parede Atrito entre fases Gradientes de pressão Gravidade Fluxos de quant. movimento
Velocidade do líquido	Atrito na parede Atrito entre fases Gradientes de pressão Gravidade Fluxos de quant. movimento
Massa da mistura	Fontes Fluxos de massa
Energia da mistura	Fontes Fluxos de energia
Massa do vapor	Fontes Mudança de fase Fluxos de massa
Energia do vapor	Fontes Mudança de fase Fluxos de massa
VARIÁVEIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	
VARIÁVEL DEPENDENTE	FORÇAS GENERALIZADAS
Temperatura	Fontes de energia Fluxos de calor

Os valores dos parâmetros de operação são determinados por um processo iterativo. Cada iteração começa com a execução de uma seqüência de intervalos de tempo do transitório. Estas iterações levam o estado do sistema para perto do estado estacionário.

As temperaturas de entrada do vaso e as vazões do circuito são comparadas com os valores desejados para cada circuito primário. Quando estes valores concordarem com o critério especificado pelo usuário, os cálculos serão encerrados. Caso contrário, o estado do sistema ao final desta seqüência é usado para avaliar novos valores dos parâmetros de operação.

Na avaliação dos parâmetros de operação, cada circuito primário de escoamento do fluido é tratado independentemente. O acoplamento entre os circuitos é tratado implicitamente pelo método usado na avaliação das características do vaso para cada circuito.

Como as subrotinas do transitório forçam a pressão do PRIZER (pressurizador) e a potência do VESSEL (núcleo) para seus valores prescritos, apenas são consideradas variações nas vazões do circuito e temperaturas de entrada do VESSEL.

O programa usa apenas informações do estado corrente do sistema na avaliação de novo conjunto de parâmetros de operação; nenhuma informação das iterações anteriores é armazenada. Os novos parâmetros do circuito são multiplicados por um fator de relaxação antes dos cálculos serem realizados.

4. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

4.1. Circuito Térmico Experimental de 150 bar (CTE-150)

O CTE-150 é uma instalação de testes integrais de altas pressões e temperaturas, situada na COPESP, que simula o desempenho de uma usina nuclear real. É a primeira do Brasil na categoria.

Suas partes principais são: sistema primário, sistema secundário, sistema de refrigeração e sistema de purificação do refrigerante. A Figura 2 mostra parte do sistema primário com seus componentes principais e a posição dos instrumentos utilizados no experimento.

O experimento de circulação natural foi executado no CTE-150 com a seguinte configuração e condições iniciais:

- aquecedor A4, bomba B1 e trocador de calor T1 alinhados através da linha de 4";

- secundário desligado;
- pressurizador S3 com 15 bar de pressão de nitrogênio;
- trocador de calor T1 alinhado com B1 e A4;
- bomba B1 desligada;
- taxa de escoamento da água de resfriamento através de T1, fixa, igual a 2,5 kg/s;
- válvulas do primário, alinhadas na configuração, completamente abertas;
- fluido inicialmente parado em todo o circuito primário.
- temperatura da água de refrigeração, na entrada do secundário do trocador de calor T1, igual a 20°C.
- temperatura da água no sistema primário igual a 24°C/28°C.

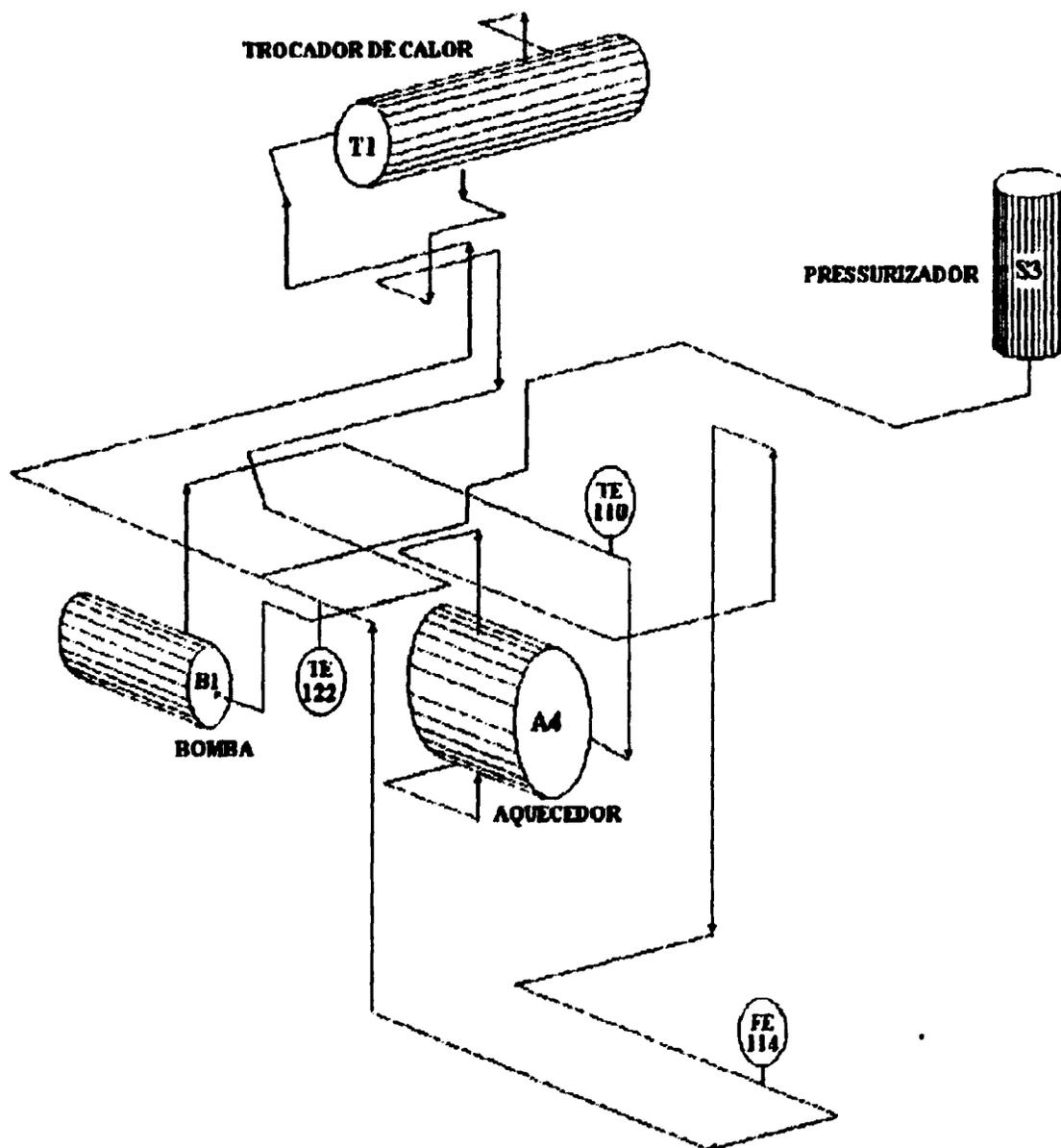


Figura 2. Parte do sistema primário do CTE-150

4.1.1. Operação do circuito

O circuito, a partir das condições iniciais descritas anteriormente, foi operado, com uma potência inicial de 20 kW. Esta potência foi mantida até o estabelecimento térmico e dinâmico do escoamento. Em seguida a potência é aumentada para 120 kW num único degrau de 100 kW.

A coleta de dados, efetuada a cada minuto, é iniciada já na primeira fase do experimento (potência de 20 kW). As condições para o término do experimento são:

- maior variação da temperatura inferior a 1°C/hora ou
- período de amostragem máximo de 5 horas.

Na Tabela 7 são indicadas as variáveis amostradas e os instrumentos utilizados em suas medições.

Tabela 7 - Variáveis Amostradas

DESCRIÇÃO DA VARIÁVEL	TAG
Temperatura do fluido a montante de A4	TE-110
Temperatura do fluido a jusante de A4	TE-122
Taxa de escoamento do fluido jusante A4	FE-114

4.1.2. Medidas dos parâmetros no CTE-150

A medição das variáveis de processo foi realizada por meio de instrumentos cujos TAG's estão indicados na Tabela 7. Toda a instrumentação utilizada apresentava fundo de escala e precisão adequados às respectivas faixas da medição das variáveis de processo de interesse, com exceção da turbina FE-114 que teve seus sinais gravados.

Experimentos anteriores realizados com o CTE-150 sugerem que as medidas efetuadas pelos termoresistores apresentam uma incerteza global da ordem de 0,35 graus celsius.

A aquisição de dados foi efetuada pelo Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) e/ou Sistema de Aquisição de Dados (SAD) instalados no CTE-150.

4.1.3. Experimentos simulados

Dois experimentos de convecção natural realizados na instalação CTE-150 foram selecionados para análise dos resultados fornecidos pelo código TRAC-PF1. Os experimentos consistem da circulação natural num circuito composto pelo aquecedor A4, trocador de calor T1, Pressurizador S3, bomba B1 e tubulações de interconexão.

O objetivo desta simulação é calcular a evolução temporal dos seguintes parâmetros:

- temperatura do fluido na perna quente (TE-122);
- temperatura do fluido na perna fria (TE-110);
- taxa de escoamento do fluido na perna quente (FE-114).

Um esquema do circuito do CTE-150 utilizado para estes experimentos é mostrado na Figura 3.

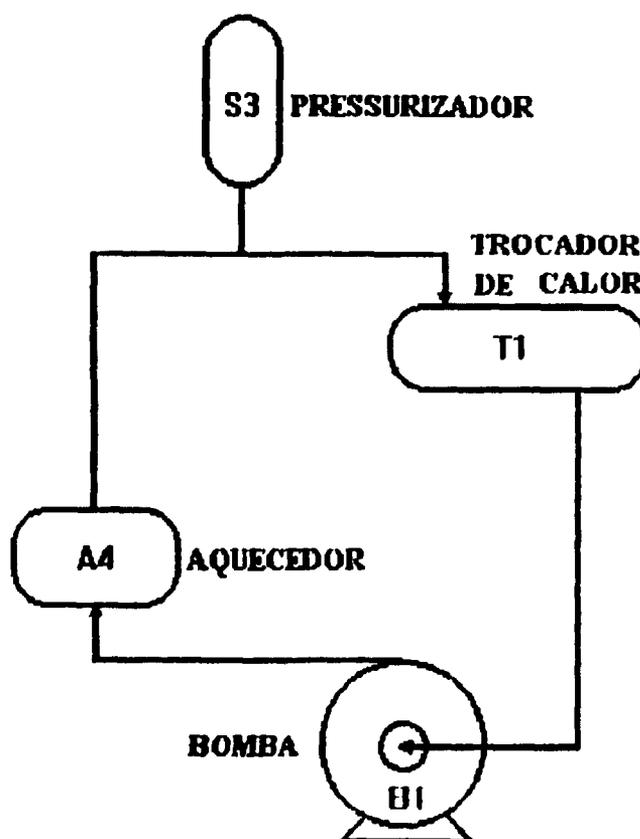


Figura 3. Esquema do circuito com os elementos simulados

Suas principais características são:

- tubulação do primário: SXX de 4"
- material em contato com o fluido: aço inox 304;
- pressão no circuito primário: 15 bar;
- volume total de água: 1,3 m³

4.1.4. Modelo físico adotado

O circuito do CTE-150, composto pelo aquecedor A4, bomba B1, trocador de calor T1, pressurizador S3 e tubos de interconexão, utilizados para a Operação Nº 09/92, foi modelado com os componentes PIPE, PUMP, STGEN, FILL, e BREAK do código TRAC-PF1, conforme mostrado na Figura 4.

A discriminação de cada componente quanto ao tipo, identificação e número de células encontra-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Descrição dos componentes utilizados na simulação

COMPONENTES	TIPO DE COMPONENTE	NÚMERO DE IDENTIFICAÇÃO	NÚMERO DE CÉLULAS
Água de resfriamento	FILL	5	-
Saída de refrigeração	BREAK	6	-
Aquecedor A4	PIPE	3	5
Tubulação entre A4 e T1	TEE	4	5
Trocador de Calor T1	STGEN (tubo reto)	1	7
Bomba B1	PUMP	8	2
Pressurizador	BREAK	7	-
Tubulação entre T1 e B1	PIPE	2	5

4.1.5. Condições de contorno e hipóteses assumidas

O aquecedor A4 foi modelado com um componente PIPE, contendo 5 volumes axiais e diâmetro interno de 0,3634 m. O comprimento total para este componente corresponde ao comprimento do caminho médio percorrido pelo fluido no aquecedor A4 considerando a existência de chicanas.

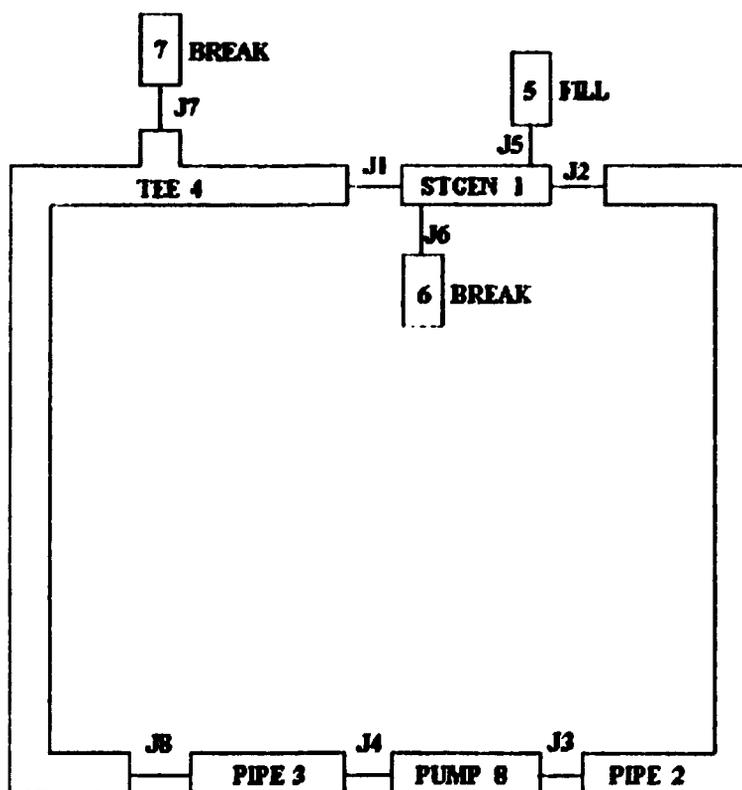


Figura 4. Esquema de modelagem do elemento do CTE-150

Calor é fornecido diretamente ao fluido através de uma tabela de potência, fornecida em forma de rampa. A potência aumenta linearmente de 0 a 20kW em 17 minutos, permanecendo constante, e igual a 20kW, até o instante $t = 300$ minutos. Na segunda fase do experimento a potência aumenta de 20kW até 120kW, em 33 minutos, permanecendo constante até o final do experimento ($t = 600$ minutos). Este procedimento foi adotado de forma a evitar as dificuldades em avaliar a "inércia térmica" do aquecedor A4, no caso do aquecimento ser feito pelas paredes do tubo. Os valores de 17 e 33 minutos foram considerados porque, nestes intervalos de tempo, a temperatura do fluido a jusante de A4, praticamente, não sofre alterações.

O presurizador S3 foi modelado por um componente BREAK que impõe uma condição de contorno sobre a pressão, no circuito primário, mantendo-a constante e igual a 15 bar durante a simulação; para tanto pode ocorrer descarga de parte do fluido primário através deste componente.

O trocador de calor T1 foi modelado por um componente STGEN (gerador de vapor) com 7 volumes axiais no sistema primário e 5 no secundário. O fluido escoou pelo sistema secundário com taxa constante de 2,5 kg/s à temperatura de 20°C e pressão atmosférica.

As áreas para transferência de calor são consideradas como:

a) no sistema primário: um valor 150% maior que o correspondente à da superfície interna de contato entre os 57 tubos e o fluido do circuito primário.

b) no sistema secundário: um valor 150% maior que o correspondente à superfície lateral externa desses tubos, e que encontra-se em contato com o fluido secundário.

Estes valores foram admitidos porque observou-se que: com as áreas iguais às de T1, os resultados para as temperaturas eram, aproximadamente, 150% maiores que os valores experimentais.

A bomba B1 foi simulada pelo componente PUMP com curvas homólogas referentes ao Circuito Semiscale, já estão embutidas no código TRAC-PP1, porque a velocidade específica da bomba do CTE-150 é da mesma ordem de grandeza da bomba do referido circuito [10].

A tubulação de interconexão entre o trocador de calor T1 e a bomba B1, chamada perna fria, foi modelada pelo componente PIPE.

A tubulação de interconexão entre o aquecedor A4 e o trocador de calor T1, perna quente, foi modelada pelo componente TEE.

O comprimento total dos tubos que constituem a perna quente foi considerado igual ao da perna fria do circuito, para evitar que o fluido do circuito primário apresentasse taxa de escoamento diferente de zero, já no início da simulação.

Foram consideradas as perdas de carga causadas pela presença de joelhos no circuito primário. Foi utilizada a relação de Blasius.

O material para todos os componentes em contato com a água foi considerado como aço inox 304.

Os parâmetros calculados pelo programa correspondem aos valores nas posições onde se situam os instrumentos de medidas associados àqueles parâmetros.

4.2. Instalação de Testes de Remolhamento (ITR).

A Instalação de Testes ITR foi projetada para o estudo dos fenômenos básicos durante a fase de reinundação de um APRP. Um esquema simplificado do escoamento na instalação é mostrado na Figura 5. A instalação consiste essencialmente da seção de testes e 3 partes principais:

- ramo de controle da água de alimentação;
- ramo de controle da pressão; e
- ramo de medidas das gotículas arrastadas pelo vapor.

Antes do início do experimento, no ramo de controle da alimentação, a água é posta nas condições iniciais requeridas pelo experimento (temperatura, pressão e taxa de escoamento).

4.2.1. Seção de testes

A seção de testes consiste de um tubo de Hastelloy-Alloy C-22, disposto verticalmente. O diâmetro externo do tubo é 12,7 mm, a espessura da parede é 1,24 mm e o comprimento total é de 3,0 m.

Este tubo foi aquecido diretamente por corrente contínua e externamente revestido com lã de vidro para reduzir as perdas de calor devidas à convecção e irradiação.

Termopares de "Chromel-Alumel" revestidos de aço inoxidável com diâmetro externo de 0,5 mm foram soldados em 11 orifícios ao longo do comprimento do tubo.

4.2.2. Medida dos parâmetros na instalação de testes

As temperaturas são medidas com termopares de Chromel-Alumel, de 0,0015 m de diâmetro externo, revestidos com aço inoxidável.

O ponto de medida da pressão do sistema está localizado no gerador de vapor, onde um transmissor de pressão com um intervalo de 0 a 1 MPa foi instalado. A pressão na entrada da seção de testes é medida por um segundo transmissor com um intervalo de 0 a 0,6 MPa.

Um medidor de escoamento tipo turbina mede a taxa de escoamento de água deionizada na entrada da seção de testes.

O calor perdido é levado em consideração usando-se a seguinte relação:

$$\dot{Q}_p = 5,3 \times 10^{-6} T^4 - 3,0 \times 10^{-5} T^3 + 7,9 \times 10^{-3} T^2 + 0,43 T - 3,9 \quad (8)$$

onde:

- \dot{Q}_p é o calor perdido através da parede externa do tubo da seção de testes, W/m^2
- T é a temperatura da parede, $^{\circ}C$.

A aquisição de dados é efetuada, durante a realização do experimento, pelo Sistema de Aquisição de Dados (SAD).

4.2.3. Experimento simulado

Um experimento de reinundação realizado na instalação ITR foi selecionado porque representa condições severas onde ocorrem grandes variações das grandezas termodinâmicas em pequenos intervalos de tempo; em oposição aos transitórios lentos observados nos experimentos de circulação natural. O experimento consistiu na reinundação de um tubo aquecido da seção de testes com escoamento interno. Depois que todo o comprimento aquecido sofre resfriamento rápido, é desligada a potência de aquecimento.

O objetivo desta simulação é calcular a evolução dos seguintes parâmetros:

- temperatura da parede nos pontos $z_1 = 0,38\text{m}$; $z_2 = 1,50\text{m}$; e $z_3 = 2,62\text{m}$;
- taxa de escoamento de água no topo do tubo; e a
- propagação da frente de resfriamento rápido.

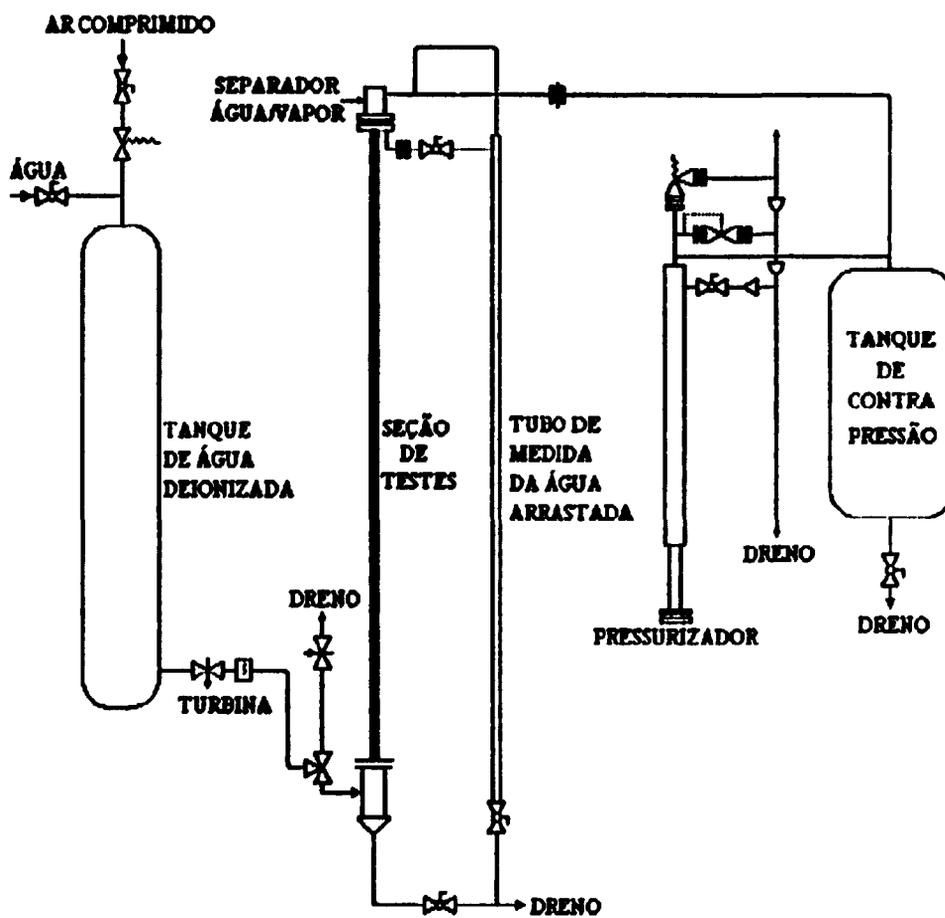


Figura 5. Diagrama do escoamento na instalação ITR

4.2.4. Modelo físico adotado

O modelo adotado para simular este experimento consiste de 3 componentes e 2 junções, sendo a seção de testes composta de 20 volumes axiais e 3 nós radiais, conforme mostrado nas Figuras 6a. e 6b. A discriminação de cada componente quanto ao tipo, identificação e número de células é mostrada na Tabela 9.

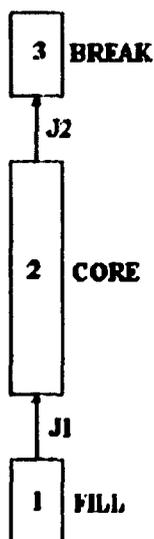


Figura 6a. Esquema de modelagem da seção de testes.

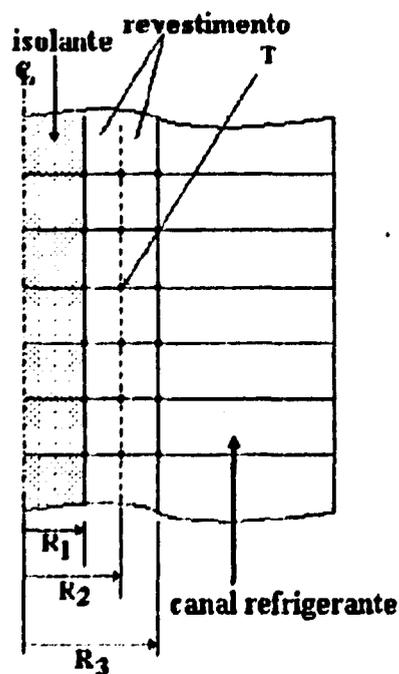


Figura 6b. Nodalização radial e axial da seção de testes

Tabela 9 - Descrição dos componentes utilizados na simulação

COMPONENTES	TIPO DE COMPONENTE	NÚMERO DE IDENTIFICAÇÃO	NÚMERO DE CÉLULAS
Água de alimentação	FILL	1	-
Seção de Testes	CORE	2	20
Fechamento Tubo	BREAK	3	-

4.2.5 - Condições de contorno e hipóteses assumidas.

A seção de testes da ITR foi modelada com um componente CORE, consistindo em uma vareta combustível e um canal refrigerante.

O diâmetro externo e a área da seção transversal do revestimento da vareta foram considerados iguais, respectivamente, ao diâmetro interno e à área da seção transversal da parede do tubo.

A área do canal refrigerante foi considerada igual à área de escoamento do tubo. Isto conserva as características geométricas de troca de calor.

Na inclusão das perdas térmicas, para o ambiente, foram feitas as seguintes considerações:

a) A máxima potência térmica de perdas para o exterior ocorre apenas nos instantes iniciais quando a superfície apresenta, ainda, uma elevação de temperatura, resultando em cerca de 8% da potência elétrica inicial.

b) Os primeiros cálculos mostraram que com 15 segundos de transitório, antes de qualquer remolhamento, a temperatura média da parede já é da ordem de 450 °C, o que reduz as perdas a 5% da potência elétrica. Além disso, durante a fase mais importante do transitório, de 18 a 80 segundos, a temperatura média é de aproximadamente 377 °C e neste caso as perdas são de 3% da potência elétrica.

c) Os valores acima indicam que neste experimento, as perdas térmicas não devem ter grande influência no comportamento das variáveis calculadas.

Desta forma, ao invés de levá-las em conta de forma exata, foi utilizado um valor médio, avaliado pela eq. (9), com os valores de temperatura obtidos nos primeiros cálculos.

$$\bar{\Phi}_p = \frac{1}{\tau L} \int_0^{\tau} \int_0^L \Phi_p(T) dz dt \quad (9)$$

onde:

$L = 3 \text{ m}$ é o comprimento aquecido

$\tau = 80 \text{ s}$ é o horizonte de tempo de importância para o experimento

$\Phi_p(T)$ é dado pela eq. (8).

Este procedimento resultou em $\bar{\Phi}_p = 740 \text{ W/m}^2$, sendo o valor correspondente, em watt, subtraído da potência fornecida para compensar as perdas.

O material da barra combustível foi considerado isolante e sua temperatura uniforme e igual à temperatura inicial do tubo.

O revestimento foi considerado de aço INOX 316 ao invés de Hastelloy-Alloy C-22, devido às semelhanças entre as propriedades físicas dos dois materiais. Além do mais, o efeito das variações das propriedades destes materiais com a temperatura podem ser desprezadas, uma vez que as incertezas na temperatura de remolhamento e no coeficiente de transferência de calor são ainda maiores [11].

As temperaturas calculadas pelo programa correspondem aos valores das temperaturas no ponto médio da espessura do tubo, onde se situam, aproximadamente, os termopares.

5. RESULTADOS

5.1. Experimentos de Circulação Natural no CTE-150

As figuras e tabelas a seguir apresentam os resultados experimentais e calculados para os dois experimentos de circulação natural que foram realizados no CTE-150. Os experimentos são caracterizados pelo código alfanumérico T2JnnnSi, com o seguinte significado:

T2 - a aquisição de dados, durante o experimento, é efetuada a cada minuto;

Jnnn - potência dissipada pelos resistores de A4, em kW;

Si - número da seqüência gravada.

Resultados típicos para as grandezas relevantes neste tipo de experimento podem ser vistos nas Tabelas 10 e 11.

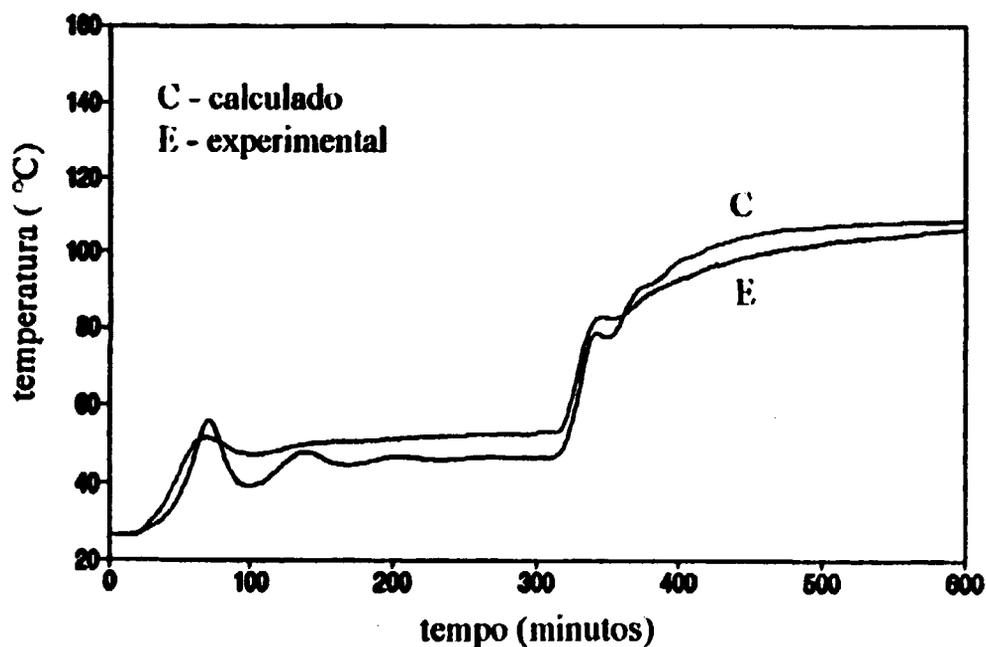
5.1.1. Resultados para o Experimento T2J20S3 - T2J120S3

Figura 7. Temperatura do fluido na perna quente

A Figura 7 mostra que entre 0 e 300 minutos (primeira fase do experimento) ocorreram oscilações antes da estabilização da temperatura.

Foi observado, durante as simulações, que de acordo com a forma como a potência era fornecida, estas flutuações diminuíam ou aumentavam.

Segundo mostra o gráfico da Figura 9, a máxima diferença entre os valores calculados e medidos ocorreu na primeira fase do experimento e vale 17%. A diferença diminuiu para 11% no estado estacionário.

Entre 300 e 600 minutos (segunda fase do experimento), praticamente, não existiram oscilações na temperatura do fluido na perna quente. A máxima diferença entre os valores calculados e experimentais atinge 5% e diminuiu para 3% no estado estacionário.

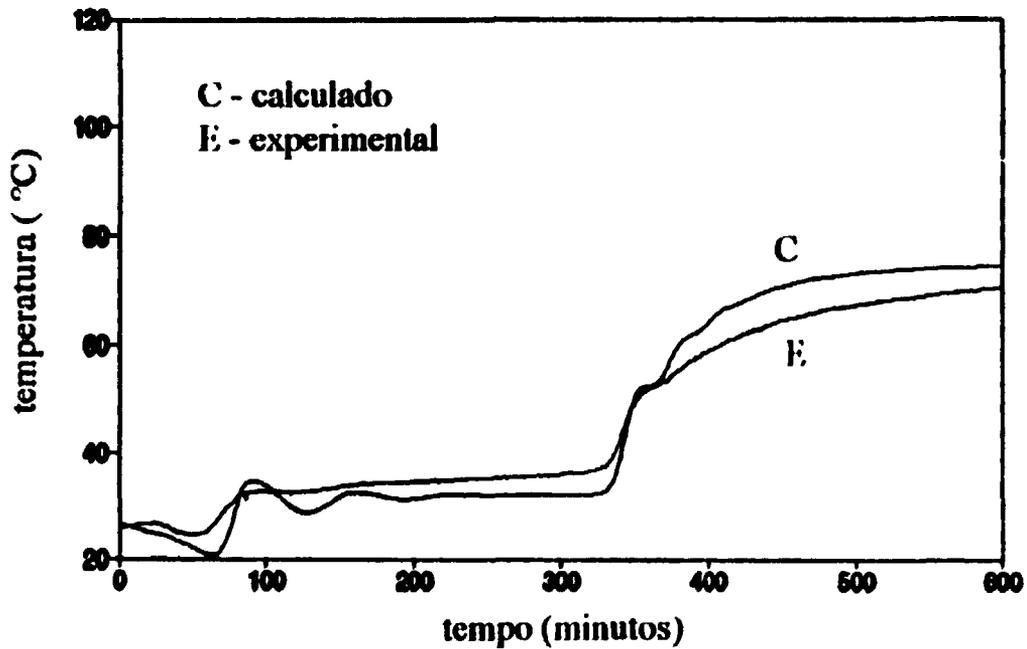


Figura 8. Temperatura do fluido na perna fria

Na Figura 8, observa-se que entre 0 e 300 minutos ocorreram oscilações antes da estabilização da temperatura e que os valores calculados diferem de 9% com relação aos dados experimentais.

Foi observado, durante as simulações, que estas flutuações acompanhavam o aumento ou diminuição da área para troca de calor no STGEN. Quando é atingido o estado estacionário, a diferença entre os valores calculados e medidos é de 10%.

Entre 300 e 600 minutos as oscilações, praticamente, não existiram. No estado estacionário, a diferença entre os valores calculados e experimentais é de 6%.

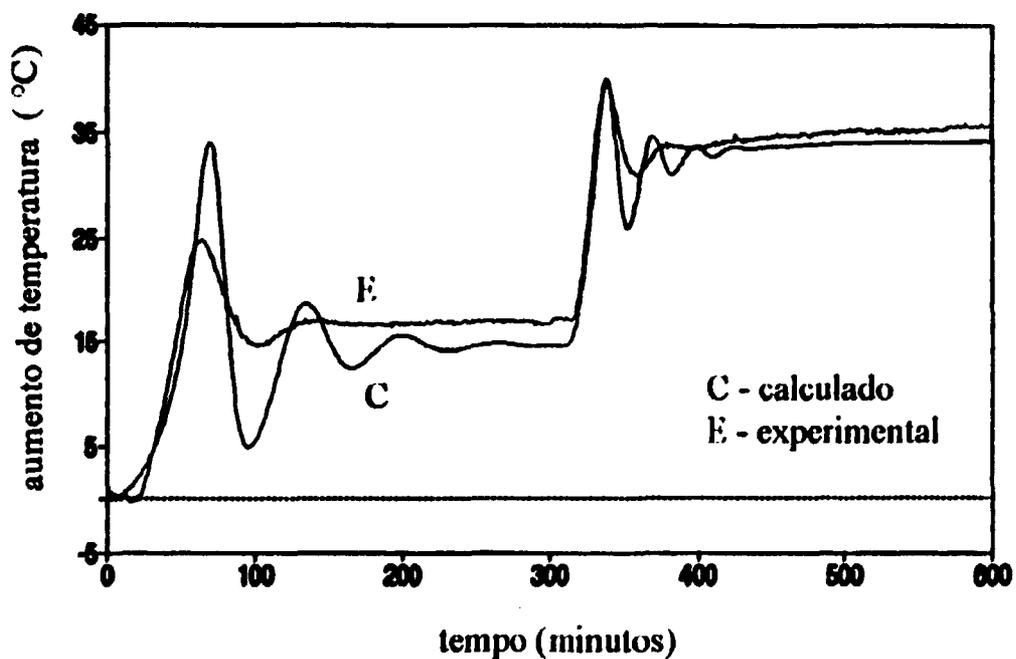


Figura 9. Aumento de temperatura

A Figura 9 mostra o aumento da temperatura do fluido ao passar pelo aquecedor A4. As maiores oscilações ocorreram na primeira fase do experimento. A diferença entre os valores calculados e medidos é de 3% no final do experimento.

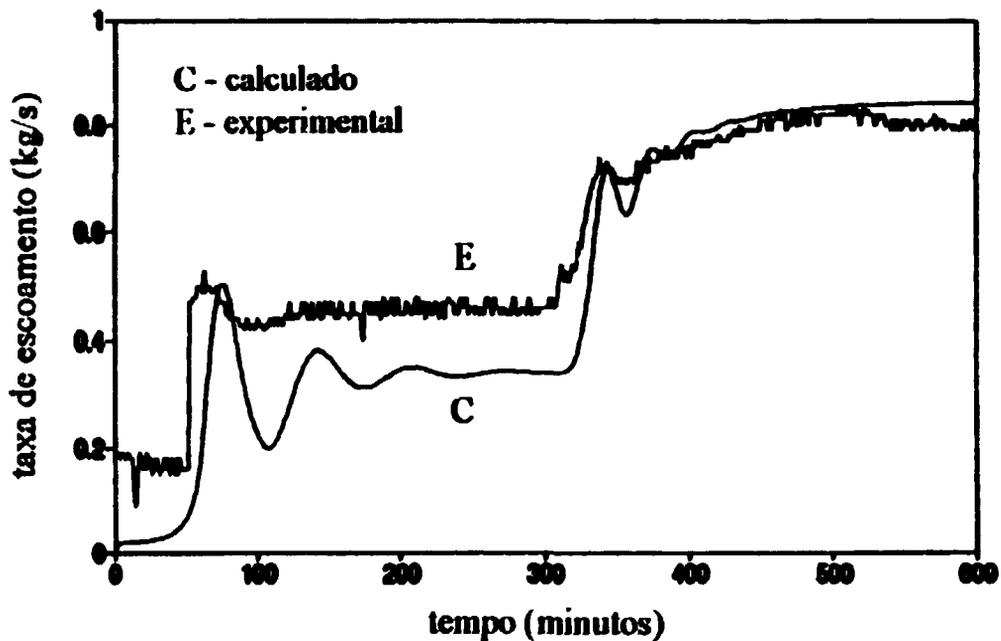


Figura 10. Evolução temporal da taxa de escoamento do fluido

Os resultados, na Figura 10, mostram que entre 0 e 300 minutos ocorreram oscilações e que estas seguiram as flutuações da diferença de temperatura entre as pernas quente e fria do circuito.

No estado estacionário, a diferença entre as vazões, calculada e experimental, foi de 26%. Deve-se salientar, porém, que a turbina utilizada nestas medições operou num intervalo muito longe da sua calibração - 3,0 a 30,0 kg/s - e que as maiores incertezas ocorrem para os valores mais baixos.

Entre 300 e 600 minutos as oscilações são menores. A diferença foi de 5% no final do experimento.

Tabela 10 - Resultados típicos para circulação natural em estado estacionário

Teste T2J20S3		Teste T2J120S3	
Experimental	TRAC	Experimental	TRAC

temperatura da PQ*, °C	52,42	46,56	105,76	108,73
temperatura da PF*, °C	35,82	32,08	70,17	74,17
aumento de temperatura, °C	16,60	14,48	35,59	34,56
taxa de escoamento, kg/s	0,46	0,34	0,80	0,84

* PQ = perna quente PF = perna fria

5.1.2. Resultados para o Experimento T2J20S1 - T2J120S2

Os resultados para a simulação deste experimento são mostrados na Tabela 11, onde os valores apresentados correspondem aos estados estacionários relativos às potências de 20kW e de 120kW. Neste caso, a temperatura inicial do fluido não era uniforme ao longo do circuito; variava entre 24°C e 28°C.

Tabela 11 - Resultados típicos para circulação natural em estado estacionário

Teste T2J20S1		Teste T2J120S2	
Experimental	TRAC	Experimental	TRAC

temperatura da PQ*, °C	51,56	46,68	105,42	108,23
temperatura da PF, °C	34,57	32,13	71,27	74,17
aumento de temperatura, °C	16,99	14,55	34,15	34,06
taxa de escoamento, kg/s	0,48	0,34	0,75	0,84

* PQ = perna quente PF = perna fria

5.2. Experimento de Remolhamento na ITR

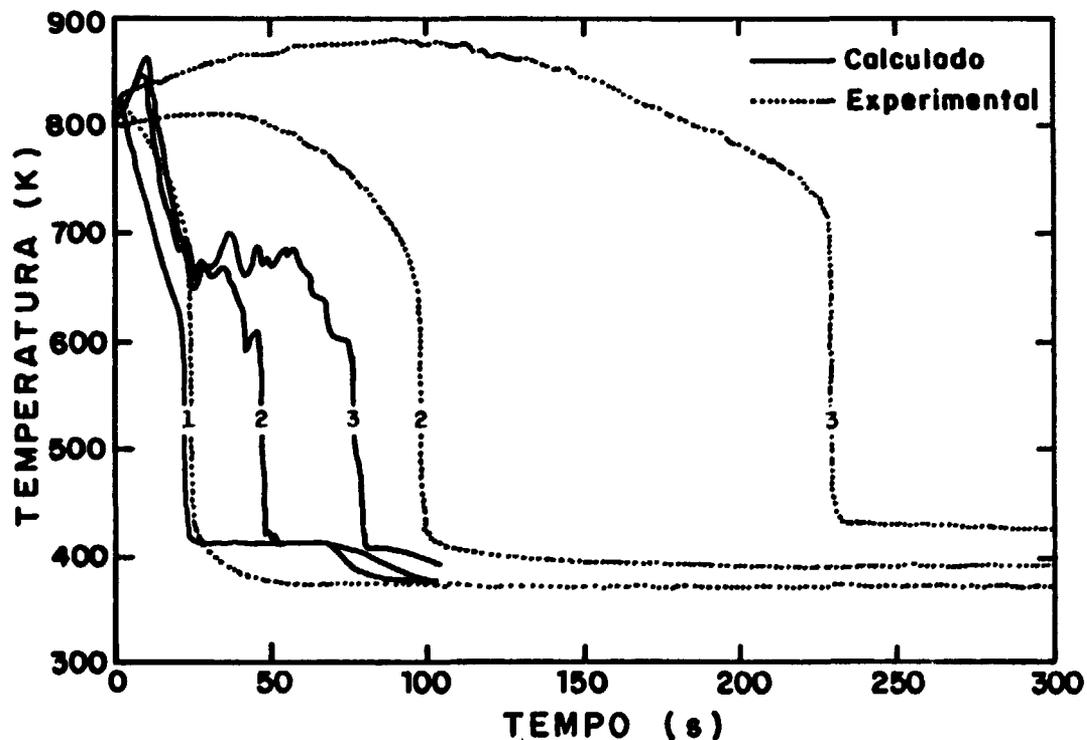


Figura 11. Temperaturas de parede medidas e calculadas

A Figura 11 mostra os valores para as temperaturas de parede, em três diferentes alturas, da seção de testes. As curvas 1, 2 e 3 correspondem, respectivamente, às cotas $z_1 = 0,38\text{m}$; $z_2 = 1,50\text{m}$ e $z_3 = 2,62\text{m}$. (esta convenção será adotada para os gráficos seguintes).

Estes resultados foram obtidos com o TRAC-PF1 pelo grupo do DEN/UFPE [12].

As temperaturas máxima e mínima apresentam boa concordância com os valores experimentais.

Os instantes em que ocorreram o resfriamento rápido são 60% menores que os medidos experimentalmente, com exceção daquele na cota $z_1 = 0,38\text{m}$.

Isto porém, está em acordo com a Tabela 3b. Para o teste 02414, cuja taxa de escoamento é da mesma ordem de grandeza desta, os valores calculados são menores que os experimentais.

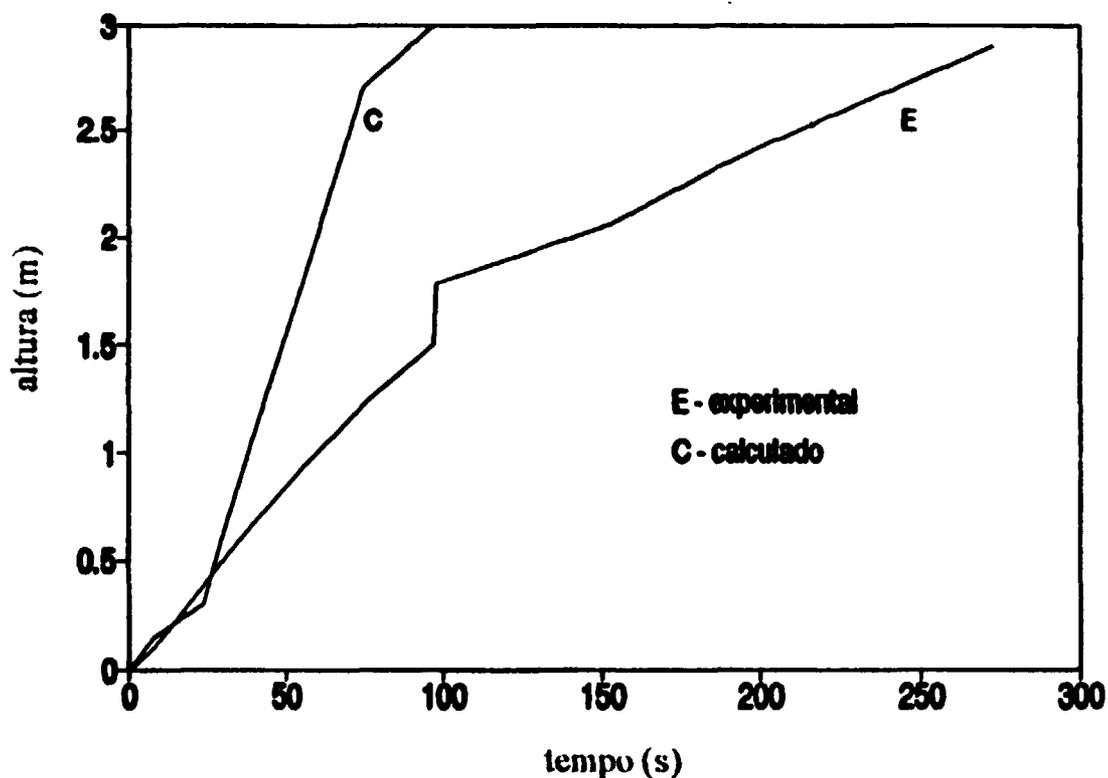


Figura 12. Propagação da frente de resfriamento rápido.

A Figura 12 mostra que a velocidade de propagação da frente de resfriamento rápido calculada é 60% maior do que a medida experimentalmente. Este fato está em acordo com os resultados, mostrados na Figura 11, para os instantes de resfriamento rápido cujos valores calculados são 60% menores que os experimentais.

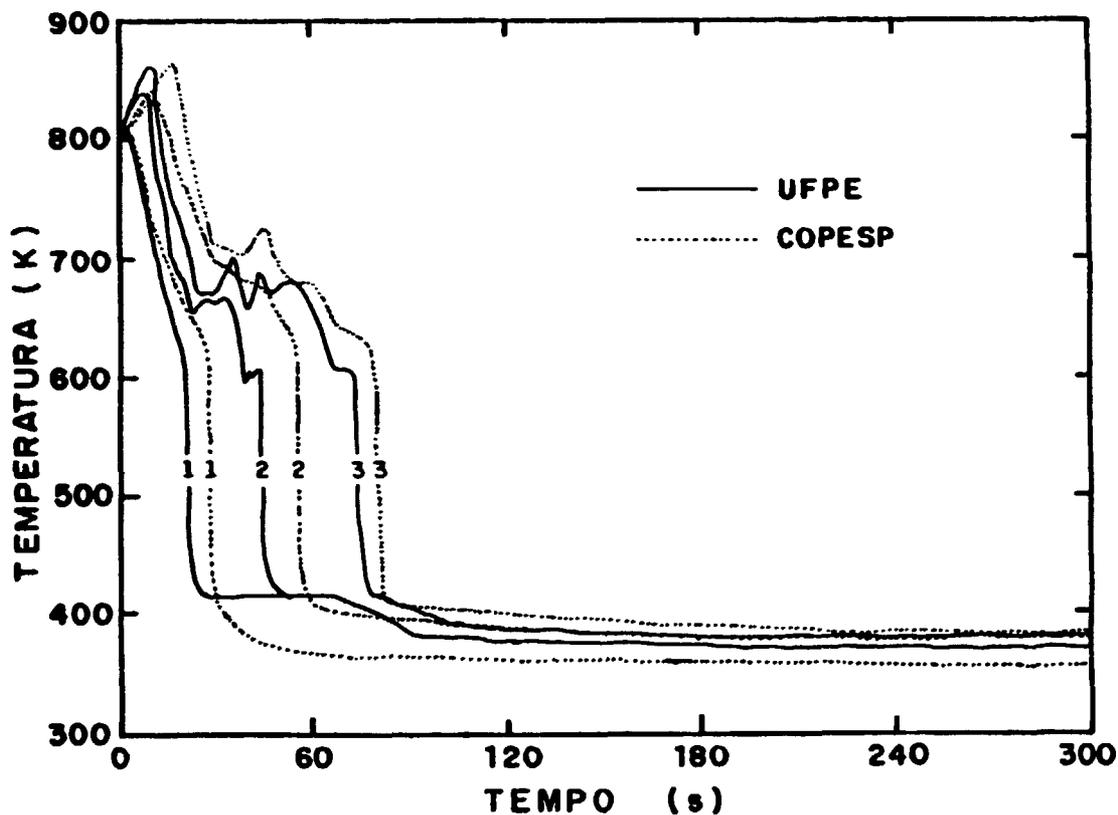


Figura 13. Temperaturas de parede calculadas com o TRAC

A Figura 13 mostra os resultados obtidos, com o TRAC-PF1 pelos grupos do DEN/UFPE e COPESP, para o experimento de remolhamento da seção de testes da ITR [12,13]. Embora tenham sido calculados com o mesmo código, foram adotados diferentes hipóteses e componentes. Observa-se boa concordância entre estes valores.

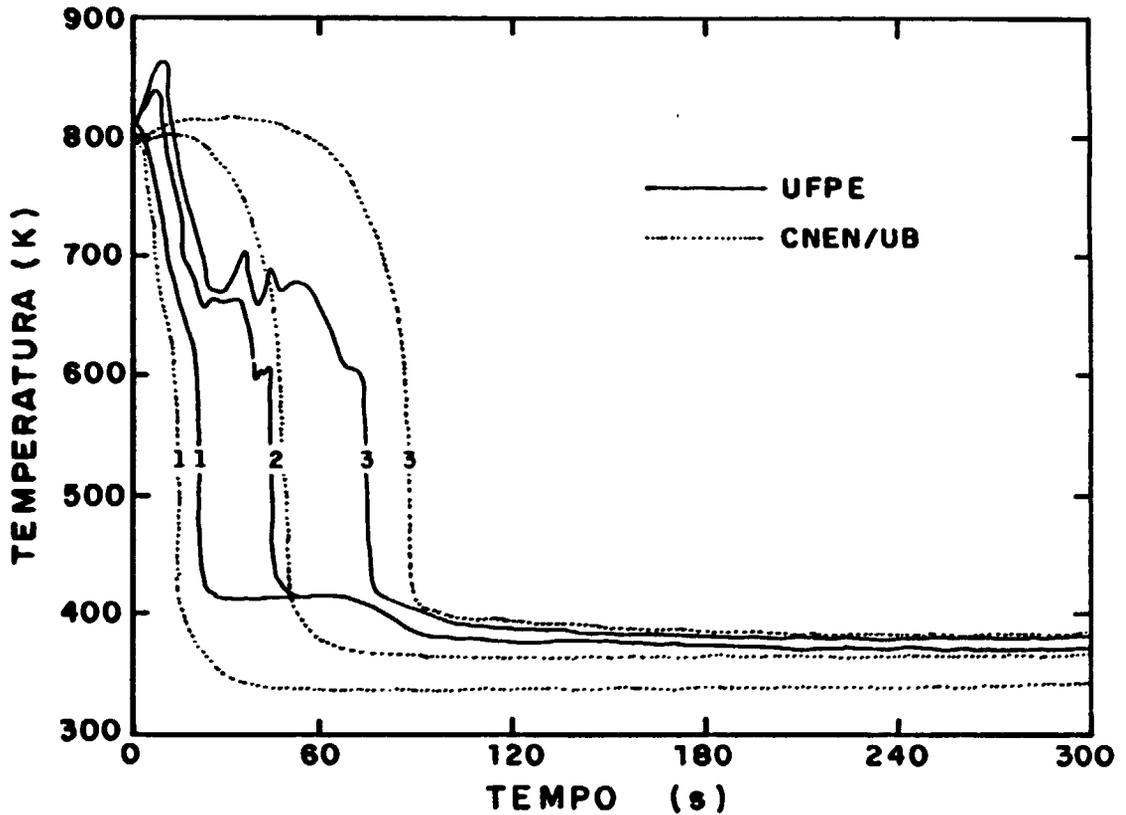


Figura 14. Temperaturas de parede calculadas com TRAC e RELAP.

A Figura 14 apresenta os resultados, obtidos com o TRAC-PF1 (grupo do DEN/UFPE) e com REPAP5/MOD2 (grupo da CNEN/UB), para o experimento de remolhamento da seção de testes da ITR [12,14]. Observa-se, também, uma boa concordância entre estes valores.

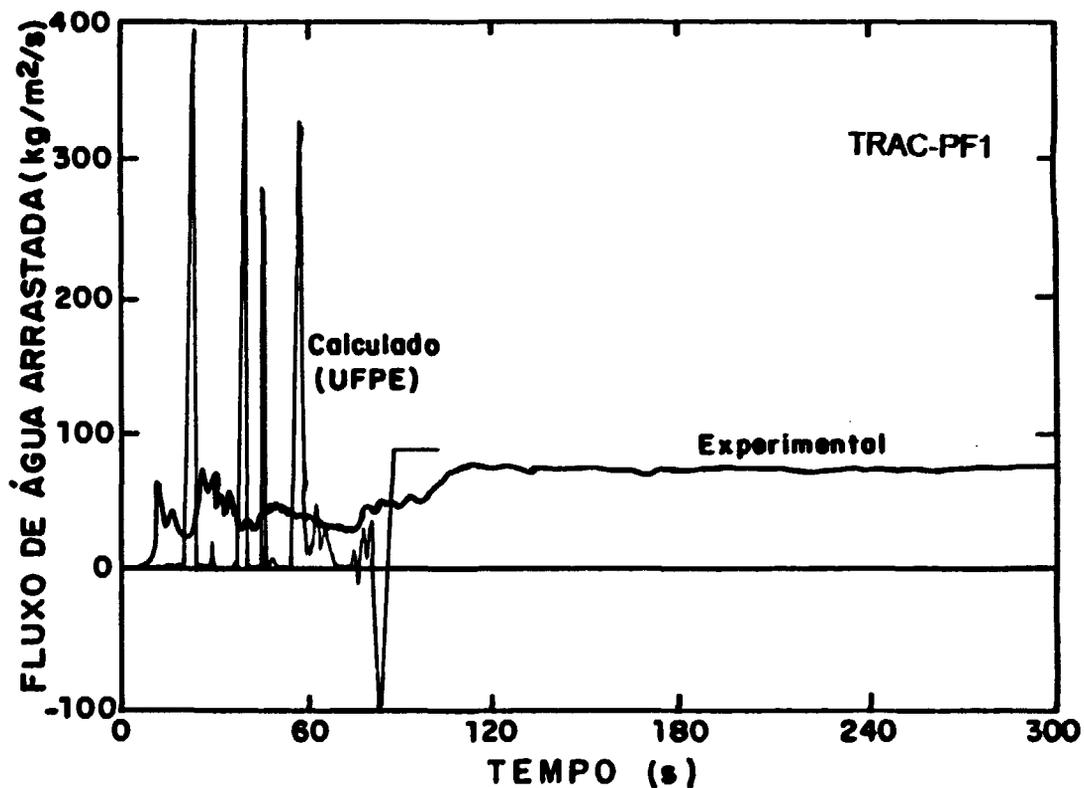


Figura 15. Quantidade de água arrastada pelo vapor -DEN/UFPE.

A Figura 15 mostra os valores calculados e medidos para o fluxo de água arrastada pelo vapor na seção de testes durante o experimento de remolhamento na ITR. Os resultados teóricos foram obtidos com o TRAC-PF1 pelo grupo do DEN/UFPE [12].

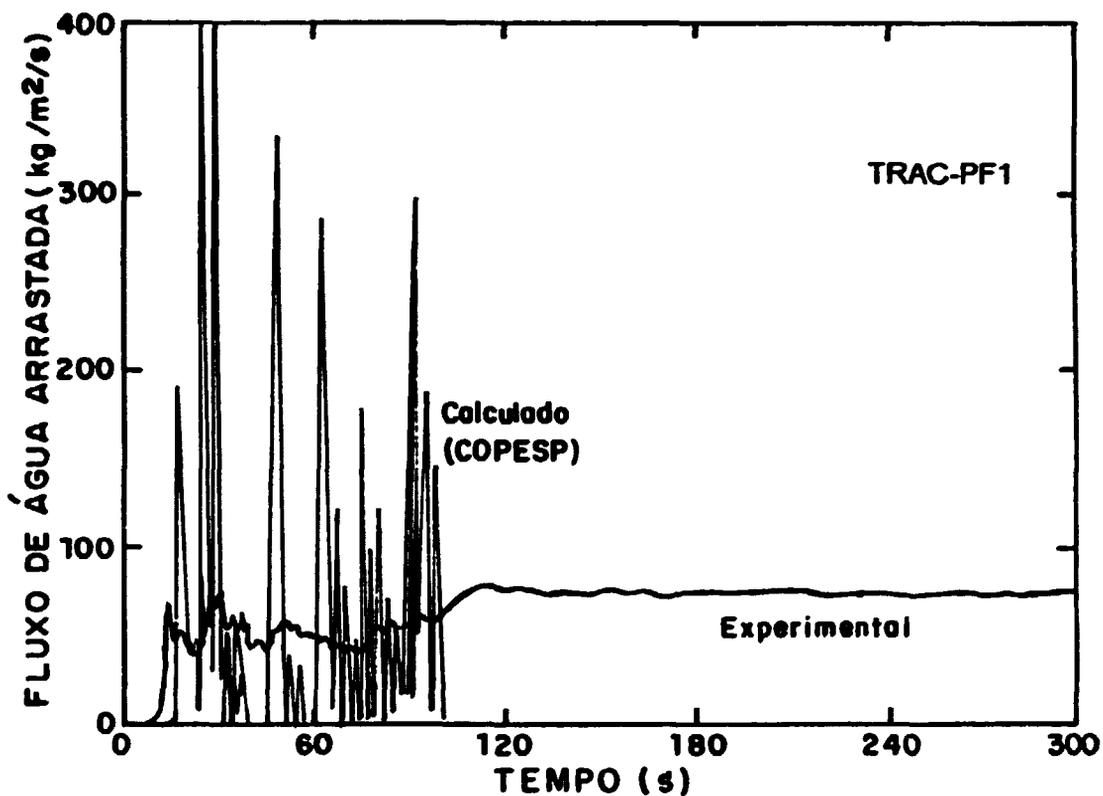


Figura 16. Quantidade de água arrastada pelo vapor -COPESP.

A Figura 16 mostra os valores calculados e medidos para o fluxo de água arrastada pelo vapor na seção de testes durante o experimento de remolhamento na ITR. Os resultados teóricos foram obtidos com o TRAC-PF1 pelo grupo da COPESP [13].

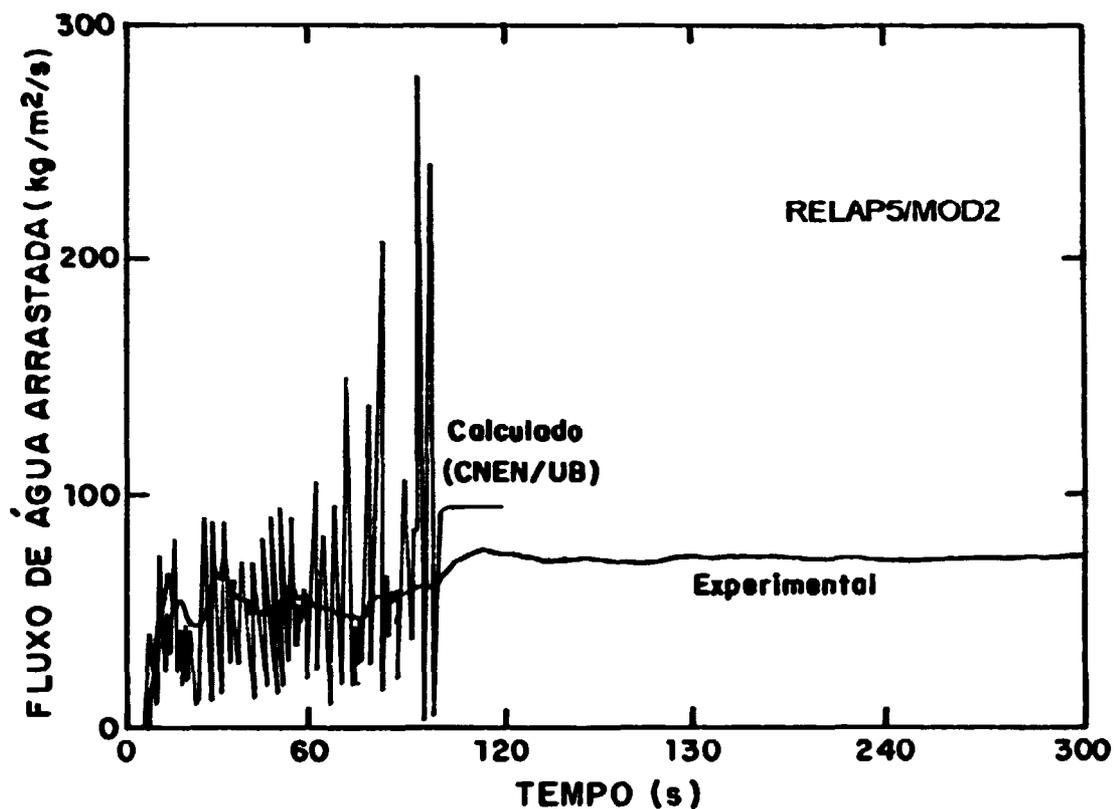


Figura 17. Quantidade de água arrastada pelo vapor - CNEN/UB.

A Figura 17 mostra os valores calculados e medidos para o fluxo de água arrastada pelo vapor na seção de testes durante o experimento de remolhamento na ITR. Os resultados foram obtidos com o RELAP5/MOD2 pelo grupo da CNEN/UB [14].

As Figuras 15, 16 e 17 mostram que os resultados dos diversos grupos, com códigos diferentes, não concordam com os resultados experimentais, entretanto, são coerentes entre si.

6. CONCLUSÕES

6.1. Experimento de Circulação Natural no CTE-150

Os resultados da simulação, para os experimentos de circulação natural no CTE-150, apresentaram os resultados esperados tanto para vazões quanto para as temperaturas do fluido no estado estacionário.

Quanto às maiores diferenças que foram observadas no início do experimento, é possível atribuí-las ao fato de que o TRAC-PF1 não possui componentes específicos para simular a termohidráulica do aquecedor A4 e do trocador de calor T1.

Isto mostra que o TRAC possui a capacidade de efetuar cálculos de parâmetros relevantes para o fenômeno de convecção natural em instalações de testes integrais do tipo CTE-150.

É possível que melhores resultados sejam encontrados utilizando-se modelos específicos para o aquecedor A4 e para o trocador de calor T1. Sugere-se, para futuros trabalhos, o desenvolvimento de componentes específicos para modelar aquecedores elétricos e trocadores de calor.

6.2. Experimento de Remolhamento na ITR

Com relação ao experimento de remolhamento na ITR, pode-se afirmar que qualitativamente os resultados obtidos representam bem o fenômeno simulado.

O TRAC-PFl calculou bem as temperaturas máxima e mínima ao longo da parede da seção de testes.

Ocorreram divergências entre os valores experimentais e calculados para o fluxo de água arrastada pelo vapor e para o instante do resfriamento rápido.

Os resultados obtidos por diferentes grupos, com diferentes códigos estão em boa concordância, embora, apresentem divergências com os dados experimentais. Pode-se inferir, então, a possibilidade de erros experimentais e/ou de que o código não seja capaz de reproduzir fielmente os experimentos de remolhamento com baixas vazões de inundação [15].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BASTOS, J.L.F. *Análise de Dados Experimentais da Rotina de Circulação Natural no CTE-150, São Paulo, COPESP, 1992. 12p.*
- [2] LADEIRA, L.C.D.; LAVORATO, W.R.A.; REZENDE, H.C. *3rd Thermal-Hydraulics Special Theme - (TE/TH-3). Proposed Exercise. Guidelines for the Participants, Belo Horizonte, CNEN/CDTN, 1992.*
- [3] MAHAFFY, J.H.; LILES, D.R.; METZGER, V.B., comp. *TRAC/PF1: An Advanced Best Estimate Computer Program for Pressurized Water Reactor Analysis, s.l, Los Alamos Scientific Laboratory, s.d., 287p.*
- [4] ARAÚJO FILHO, F. *Migração do Código TRAC-PF1 Usando o NDP-FORTRAN, São Paulo, COPESP (Relatório interno RP8/01-89). 1989.*

- [5] VIGIL, J.C. & PRYOR, R.J. Development and Assessment of the Transient Reactor Analysis Code (TRAC), Nuclear Safety, Tennessee, 21(2): 171-83, Mar./ Apr. 1980.
- [6] VIGIL, J. C. & WILLIAMS, K. A., comp. TRAC-PIA Developmental Assessment, Report LA-8056-MS, Los Alamos Scientific Laboratory, Nov. 1979.
- [7] WILLIAMS, K. A., Pretest and Posttest Predictions of LOFT Nuclear Test L2-2, reported in Nuclear Reactor Safety Quartely Progress Report, October 1-December 31, 1978, NRC Report NUREG/CR-0762 (LA-7769-PR), Los Alamos Scientific Laboratory, May 1979.
- [8] MANDELL, D.A. & WILLIAMS, K.A., L2-2 Parametric Study, reported in Nuclear Reactor Safety Quartely Progress Report, January 1 - March 31, 1979, NRC Report NUREG/CR-0868 (LA-7867-PR), p.18, Los Alamos Scientific Laboratory, July 1979.

- [9] FORGE, A. et al. Comparative calculations on selected two-phase flow phenomena using major PWR system codes. Commission of European Communities, Luxembourg 1990.
- [10] MADEIRA, A. A.; PONTEDEIRO, A. C.; GALETTI, M. R. S.; BORGES, R. C. TE/TH-2: Resultados do Grupo da CNEN/RJ, VIII Encontro Nacional de Física de Reatores e Termoi-dráulica, Atibaia/SP, Setembro de 1991.
- [11] OLEK, S. & ZVIRIN, Y. The Effect of Temperature Dependent Properties on the Rewetting Velocity, *Int. J. Multiphase Flow*, s.l., 11(4): p. 577-81. 1985.
- [12] SILVA, J.D; BARROSO, A.C.O; LIRA, C.A.B.O; ANDRADE LIMA, F. R; LIMA, R. C. F. TE/TH3 Resultados do Grupo do DEN/UPPE, Anais do IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica, Caxambu, p.37-41. 1993.

- [13] BELCHIOR JUNIOR, A; SILVA, A.T. TE/TH-3:- Resultados do Grupo da COPESP, Anais do IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica, Caxambu, p. 34-36. 1993.
- [14] MADEIRA, A. A; GALETTI, M. R. S; BORGES, R.C. TE/TH-3: Resultados do Grupo da CNEN/UB, Anais do IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica, Caxambu, p. 27-30. 1993.
- [15] LADEIRA, L.C.D; LAVORATO, W.R.A; REZENDE, H.C. IX ENFIR: TE/TH3 Remolhamento de uma Seção de Testes Tubular por Injeção Inferior de Refrigerante, Anais do IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica, Caxambu, p.19-26. 1993.

APÊNDICE 1**1. MÓDULOS DE COMPONENTES**

ACCUM Simula um acumulador cheio de água borada(ECC) e pressurizada com gás nitrogênio; usa o modelo de difusão unidimensional. As propriedades da fase vapor são consideradas iguais às do gás nitrogênio e velocidades de difusão são especificadas para produzir uma interface líquido-vapor bem definida durante a descarga. O nitrogênio não pode sair do componente durante uma descarga.

PIPE Simula o escoamento termohidráulico num tubo unidimensional usando o modelo "drift-flux" com cinco equações.

PRIZER Simula um pressurizador usando o modelo "drift-flux" unidimensional com velocidades de difusão especificadas para produzir uma interface líquido-vapor bem definida durante a descarga. O pressurizador é considerado adiabático.

- PUMP** Descreve a interação do fluido bifásico com uma bomba centrífuga usando as capacidades do módulo PIPE e correlações de bombas para geração do momentum da mistura.
- STGEN** Modela um gerador de vapor, tipo tubo reto ou tubo em U, usando um modelo unidimensional (drift-box). Os cálculos para a hidrodinâmica dos lados primário e secundário são efetuados separadamente com acoplamento através da transferência de calor.
- TEE** Modela a termohidráulica de um tubo com três ramos.
- VALVE** Modela o escoamento termohidráulico numa válvula usando as capacidades básicas do módulo PIPE. A ação da válvula é simulada controlando-se a área de escoamento e o diâmetro hidráulico entre duas células.
- VESSEL** Modela um vaso PWR com suas partes internas ("downcomer", pleno inferior, núcleo, pleno superior, etc) usando uma representação geométrica tridimensional($r-\theta-z$) ou bidimensional($x-y$) e um modelo bifásico de seis equações para avaliar o escoamento do fluido dentro do vaso.

CORE Modela um vaso PWR com suas partes internas usando uma representação geométrica unidimensional e um modelo bifásico de seis equações para avaliar o escoamento do fluido dentro do vaso.

FILL Impõe condições de contorno, fixas ou dependentes do tempo, sobre a velocidade na junção com o componente adjacente.

BREAK Impõe condições de contorno, fixas ou dependentes do tempo, sobre a pressão numa célula além da junção com seu componente adjacente.

2. MÓDULOS DE FUNÇÕES

DF1D Resolve as equações de diferenças finitas para o modelo "drift-flux" unidimensional usando um algoritmo semi-implícito ou completamente implícito.

- TF3D** Resolve as equações de diferenças finitas para o modelo bifásico multidimensional usando um algoritmo semi-implícito. Existe, também, um pacote constitutivo para prover escorregamento interfacial e nas paredes, massa interfacial e transferência de calor.
- THERMO** Fornece as propriedades termodinâmicas da água líquida e do vapor d'água.
- FWALL** Computa os coeficientes de atrito entre as duas fases e as paredes e os coeficientes de perdas associados às mudanças abruptas de área.
- SLIP** Calcula as velocidades relativas entre as fases líquida e de vapor para o modelo "drift-flux" unidimensional. O procedimento é baseado num mapa do regime de escoamento similar ao usado para a hidrodinâmica tridimensional no vaso.
- RODHT** Resolve as equações unidimensionais (cilíndricas) de diferenças finitas para a condução térmica nas barras incluindo as regiões de pastilha, "gap" e do revestimento.

- SLABHT** Resolve a temperatura em uma placa de configuração arbitrária usando parâmetros concentrados.
- CYLHT** Resolve as equações unidimensionais (cilíndricas) de diferenças finitas para a condução térmica na parede dos tubos.
- HTCOR** Fornece os coeficientes de transferência de calor da parede para o fluido baseado nas condições locais.

APÊNDICE 2

1. Calor transferido entre a estrutura e o fluido.

A energia trocada entre a estrutura e o fluido é modelada pela lei de Newton do resfriamento. O algoritmo acoplado (Figura 1) é semi-implícito. Para cada novo intervalo de tempo, as equações fluidodinâmicas são resolvidas baseadas nos valores prévios para os coeficientes de transferência de calor nas paredes (h) e temperaturas nas superfícies das paredes (T_w); isto é,

$$q_w^{n+1} = h^n (T_w^n - T_f^{n+1}) \quad (3.1)$$

Uma vez resolvidas as equações fluidodinâmicas, as distribuições de temperatura nas paredes são deduzidas da equação de condução.

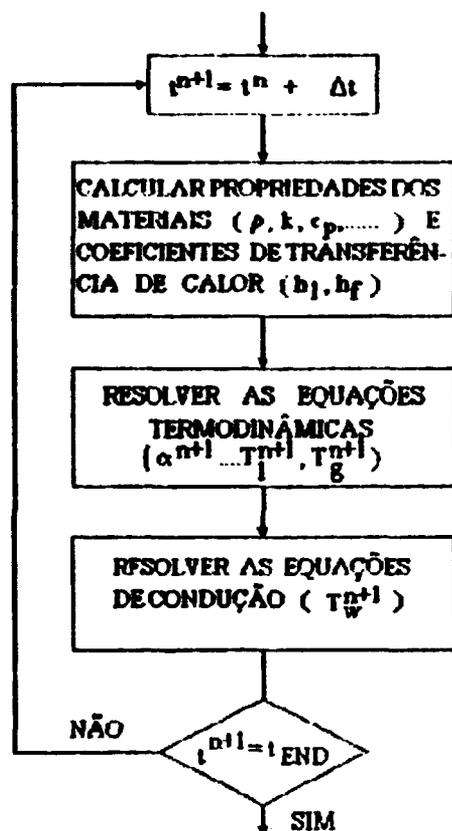


Figura 1. Acoplamento semi-implícito entre a transferência de calor e a hidrodinâmica

2. Modelos para condução de calor.

Os modelos estão separados de acordo com sua função geométrica. O primeiro modelo analisa a condução do calor dentro das paredes dos componentes unidimensionais, tais como paredes dos tubos. Os outros dois estão associados com transferência de calor nos componentes estruturais do vaso.

2.1. Condução do calor em paredes cilíndricas.

A distribuição de temperatura dentro das paredes dos componentes unidimensionais é determinada pela subrotina CYLHT. Uma solução é obtida dum aproximação em diferença finita para a equação de condução unidimensional,

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \dot{q}''' \quad (3.2)$$

As equações de diferenças finitas são derivadas aplicando-se o método integral aos elementos de volume.

2.2. Condução de calor nas placas.

Condução de calor dentro da estrutura do vaso, tais como paredes do "downcomer" e placas suporte, é modelada na

subrotina SLABHT. A distribuição de temperatura é obtida da equação unidimensional de condução,

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} \dots \quad (3.3)$$

Condição de contorno aplicada à superfície interna ($i=1$),

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{i=1} = [h_1(T_1 - T_1) + h_g(T_g - T_1)] \quad (3.4)$$

2.3. Condução de calor nas barras.

A condução do calor nas barras do reator é analisada pela subrotina RODHT, barra por barra. A formulação pode modelar diversas geometrias para as barras. Pode-se analisar condução do calor gerado eletricamente ou através de reações nucleares. São incluídos os efeitos de geração interna de calor, condução no "gap", reação água-metal, e variações nas propriedades das barras.

A resposta térmica das barras no vaso é modelada pela equação de condução cilíndrica bidimensional (r, z) . É assumida simetria azimutal.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{q}''' + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rk \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (3.5)$$

Condições de contorno aplicadas às barras no vaso:

1. O topo $(z=z_u)$ e a base $(z=z_l)$ das barras são consideradas isoladas,

$$k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_l, z_u} = 0$$

2. A linha que passa axialmente pelo centro da barra é uma linha de simetria,

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

3. O calor transferido nas superfícies internas e externas do "gap" ($r=r_{gap}^-, r_{gap}^+$) e a superfície do revestimento ($r=r_0$) é especificado usando-se a lei de Newton do resfriamento,

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{gap}^+} = h^{+gap} (T_{r_{gap}^+} - T_{r_{gap}^+})$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = -h_{fluid} (T_{r_0} - T_{fluid})$$

onde r_{gap}^- = raio menor do "gap"
 r_{gap}^+ = raio maior do "gap"
 $h_{gap}^+ = h_{gap}^- (r_{gap}^- / r_{gap}^+)$ para conservar a energia.

3. Transferência de calor da parede para o fluido.

Os coeficientes de transferência de calor (HTC) parede-fluido são obtidos de uma curva de ebulição generalizada construída dentro da subrotina HTCOR. As correlações para HTC da subrotina HTCOR são usadas por todos os componentes do TRAC sob quaisquer condições. Explicações relativas à lógica da escolha para o HTC podem ser encontradas na Ref.[3].