

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Área de concentração: Calor e Fluidos.
Linha de Pesquisa: Sistemas e Equipamentos Térmicos

**“Desenvolvimento de um Dispositivo Experimental e Determinação dos
Parâmetros de Refrigeração por Ebulição Nucleada Confinada para
um Circuito de Irradiação a Água Fervente com a Vareta Combustível
Nuclear Substituída por um Simulador Elétrico”**

Por Antônio Carlos Lopes da Costa
Orientador Prof. Dr. Luiz Machado
Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Nicolau Nassar Koury

Belo Horizonte, 19 de outubro de 2004



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel. : +55 31 3499.5145, Fax: +55 31 3443.3783
E-mail: epgmec@demec.ufmg.br

**"DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO EXPERIMENTAL E
DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE REFRIGERAÇÃO POR
EBULIÇÃO NUCLEADA CONFINADA PARA UM CIRCUITO DE
IRRADIAÇÃO A ÁGUA FERVENTE COM A VARETA
COMBUSTÍVEL NUCLEAR SUBSTITUÍDA POR UM SIMULADOR
ELÉTRICO"**

ANTÔNIO CARLOS LOPES DA COSTA

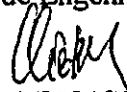
Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Doutor em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Calor e Fluidos".

Tese aprovada em: 19 de outubro de 2004.

Por

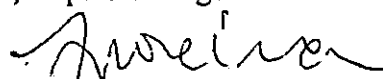

PROF. LUIZ MACHADO


Orientador - Doutor, Depto. de Engenharia Mecânica, UFMG


PROF. RICARDO NICOLAU NASSAR KOURY - CO-O
Examinador - Doutor, Depto. de Engenharia Mecânica, UFMG


PROF. MÁRCIO FONTE-BOA CORTEZ
Examinador - Dr. Ing., Depto. de Engenharia Mecânica, UFMG


PROF. ROBERTO MÁRCIO DE ANDRADE
Examinador - Doutor, Depto. de Engenharia Mecânica, UFMG


PROF. JOÃO MANOEL LOSADA MOREIRA
Examinador - Doutor, CTMSP, USP


PROF. VANDERLEY DE VASCONCELOS
Examinador - Doutor, CDTN

Aos meus pais,
João Pereira da Costa (in memoriam)
e Irene Lopes da Costa

À minha esposa e filhos,
Solange, Rafael, Leandro e Matheus

Pelo apoio e incentivo

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Luiz Machado pela orientação e consideração

Ao Prof. Dr. Ricardo Koury pela co-orientação e incentivo

Aos Professores Dr. Márcio Fonte-Boa Cortez, Dr. João Manoel Losada Moreira, Dr. Vanderley de Vasconcelos e Dr. Roberto Márcio de Andrade por terem aceito o convite para composição da banca examinadora

Aos demais Professores da Pós-graduação em Engenharia Mecânica pelos ensinamentos que de algum modo contribuíram no desenvolvimento deste trabalho

Ao Pesquisador Arivaldo Sacramento, irmão por afinidade, pela convivência e apoio durante todo o curso e trabalho

Ao Engenheiro Marcos Antônio pelo apoio na instrumentação dos experimentos

Aos Tecnologistas Fernando Esteves, Vagner Antônio, Valdir Mendonça, Márcio Dias, Eduardo Saraiva e Luiz Leite e aos Projetistas Edson Ribeiro, Cláudio Cunha e Cláudio Roberto do Setor de Projetos do CDTN pelo apoio e incentivo

Aos Pesquisadores Luiz Ladeira e Moysés Navarro e aos Técnicos Dielson Alves e Paulo Antônio do Laboratório de Termo-hidráulica do CDTN pelo apoio prestado nos experimentos

À Secretária Márcia Valéria pelo apoio na edição deste documento e à Secretária Sandra pela dedicação dispensada aos alunos da Pós-graduação

Na inviabilidade de relacionar todas as pessoas que contribuíram para que este trabalho fosse realizado, registro neste parágrafo meus sinceros agradecimentos e minha imensa gratidão a todos que me incentivaram e ajudaram.

©

RESUMO

Atualmente em nosso país, encontra-se em implantação uma infra-estrutura para qualificação de varetas combustíveis nucleares para reatores a água pressurizada. Como parte da infra-estrutura necessária para realização de testes de irradiação está sendo desenvolvido o Circuito de Irradiação a Água Fervente denominado CAFE-ModI, a ser instalado no reator de pesquisas IEA-R1 do IPEN-CNEN, em São Paulo. Os conceitos empregados no projeto desse circuito de irradiação já foram utilizados com sucesso em outros países, mas, mesmo assim, a sua instalação no referido reator de pesquisas deve ser precedida por um extenso programa de testes para validação experimental de seus critérios de projeto, limites operacionais e processos de fabricação de componentes.

Este trabalho de tese é parte do programa de testes de apoio ao desenvolvimento do circuito de irradiação e deve validar, por via experimental, os cálculos de projeto daquela instalação. A realização do trabalho exigiu, não só a fabricação e montagem de um dispositivo experimental, que representa a cápsula de irradiação e seus sistemas de refrigeração, mas também o desenvolvimento de um simulador elétrico para substituição da vareta combustível nuclear, durante os experimentos realizados fora do reator de pesquisas. O trabalho foi concluído com a realização de uma série de experimentos para avaliação do comportamento da cápsula de irradiação, sob pressões e temperaturas operacionais, e com o levantamento de parâmetros da transferência de calor por ebulição nucleada confinada, necessários para a validação do projeto de seu sistema de refrigeração. Os resultados relativos ao fluxo de calor obtidos de medições experimentais, realizadas no regime de ebulição nucleada, apresentaram boa concordância com os valores calculados com uma correlação obtida de literatura. Esta correlação foi adotada na fase preliminar do projeto da cápsula de irradiação.

ABSTRACT

Nowadays, in our country, it is under construction, an infra-structure for qualifying nuclear fuel rods for pressurized water reactors. As a part of the necessary infra-structure to conduct a series of irradiation tests, it is being developed a boiling water loop named CAFE-Mod1 to be installed in the IEA-R1 research reactor at IPEN-CNEN, in São Paulo. The concepts employed in the design of this irradiation loop were already successfully used by other countries; however, the installation of this irradiation loop in the above mentioned research reactor required a previous extensive test program for experimental validation of their design criteria, operational limits and processes used during the manufacturing of their components.

This thesis is part of a test program established to assist the development of the irradiation loop and to validate, by means of some experiments, the design parameters of that facility. In the course of this research work, not only the manufacturing and assembling of the experimental device, representing an irradiation capsule and its cooling system, were carried out, but also an electrical simulator which substituted the nuclear fuel rod during the experiments conducted outside the research reactor. The work was concluded after a series of experiments were performed, evaluating the irradiation capsule behavior under typical reactor operational pressure and temperature. Experimental data for the heat transfer parameters for confined nucleate boiling were obtained for validating the irradiation loop cooling system design. The results obtained for the heat flux under nucleate boiling regime, have agreed with those from a correlation obtained from the literature. This correlation was adopted in the design of the irradiation capsule.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	7
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O CIRCUITO DE IRRADIAÇÃO	9
2.1 INTRODUÇÃO.....	9
2.2 QUALIFICAÇÃO DA VARETA COMBUSTÍVEL NUCLEAR.....	9
2.3 APRESENTAÇÃO DO CIRCUITO DE IRRADIAÇÃO A ÁGUA FERVENTE CAFE-MOD1	13
2.3.1 <i>Crítérios e Limites de Projeto</i>	14
2.3.2 <i>Sistemas e Componentes</i>	16
2.3.3 <i>Descrição Funcional do Circuito de Irradiação</i>	22
2.4 O PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO PROJETO DO CIRCUITO DE IRRADIAÇÃO.....	23
2.5 CONCLUSÃO	25
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 METODOLOGIA	26
3.2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL E SIMULADOR ELÉTRICO.....	28
3.3 SIMULADOR ELÉTRICO DA VARETA COMBUSTÍVEL NUCLEAR	29
3.3.1 <i>O Conceito do Simulador Elétrico Desenvolvido</i>	30
3.3.2 <i>Cálculos para o Simulador Elétrico</i>	32
3.3.3 <i>Avaliação Preliminar do Simulador Elétrico</i>	36
3.3.4 <i>Alimentação Elétrica e Controle de Potência</i>	36
3.4 APRESENTAÇÃO DO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	38
3.4.1 <i>Crítérios e Limites de Projeto</i>	40
3.4.2 <i>Cápsula Simplificada</i>	41
3.4.3 <i>Sistemas Operacionais</i>	47
3.4.4 <i>Mecanismo de Refrigeração da Cápsula Simplificada</i>	51
3.4.5 <i>Instrumentação e Aquisição de Dados</i>	53
3.4.6 <i>Descrição Funcional do Dispositivo Experimental</i>	62
3.5 PROCEDIMENTOS PARA REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	63
3.6 CALIBRAÇÕES DE INSTRUMENTOS E ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	67
3.7 PROCESSAMENTO DOS PARÂMETROS MEDIDOS.....	71
3.8 CONCLUSÃO	72
CAPÍTULO 4 ESTUDO SOBRE EBULIÇÃO APLICADO AOS EXPERIMENTOS	73
4.1 INTRODUÇÃO	73
4.2 PRINCÍPIOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	74
4.3 O PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR EBULIÇÃO	75
4.4 EQUAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA A CÁPSULA SIMPLIFICADA.....	80
4.4.1 <i>Ebulição Nucleada na Parede Externa do Simulador Elétrico</i>	81
4.4.2 <i>Condução Térmica Radial na Parede do Vaso de Pressão</i>	84
4.4.3 <i>Convecção Forçada na Parede Externa do Vaso de Pressão</i>	85
4.4.4 <i>Fluxo de Calor Crítico para a Cápsula Simplificada</i>	86
4.5 VALORES DE REFERÊNCIA PARA OS EXPERIMENTOS	87
4.6 CONCLUSÃO	90
CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	91
5.1 INTRODUÇÃO.....	91
5.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	91
5.2.1 <i>Experimentos com valores fixados de $p=1$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$</i>	91
5.2.2 <i>Experimentos com valores fixados de $p=5$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$</i>	93
5.2.3 <i>Experimentos com valores fixados de $p=10$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$</i>	94
5.2.4 <i>Experimentos com valores fixados de $p=40$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$</i>	96
5.2.5 <i>Experimentos com valores fixados de $p=70$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$</i>	97
5.2.6 <i>Experimentos com valores fixados de $p=110$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$</i>	99
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS E DAS CORRELAÇÕES APLICÁVEIS.....	100
5.4 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ENTRADA DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO NOS RESULTADOS	107

5.5	CÁLCULOS DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA A CÁPSULA SIMPLIFICADA	111
5.6	DETERMINAÇÃO DE FAIXAS DE INCERTEZAS ASSOCIADAS AOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	114
5.7	INTERPRETAÇÕES DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	116
5.8	CONCLUSÃO	120
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....		121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		124
ANEXO I - CALIBRAÇÕES PARA AS CADEIAS DE MEDIÇÕES.....		129
ANEXO II - EXPRESSÕES PARA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS.....		134
ANEXO III - FOTOS DO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....		138

Lista de Figuras

	Página
Figura 1.1 Inserção do Trabalho de Tese no Programa de Desenvolvimento CAFE-Mod1	3
Figura 2.1 Ilustração de uma Vareta Combustível Típica para Reatores a Água Pressurizada	11
Figura 2.2 Esquema da Cápsula do Circuito de Irradiação	17
Figura 3.1 Mecanismo de Refrigeração da Cápsula Simplificada	29
Figura 3.2 Arranjo do Simulador Elétrico por Aquecimento Indireto	31
Figura 3.3 Esquema do Simulador Elétrico para Transferência de calor	35
Figura 3.4 Diagrama Unifilar da Alimentação Elétrica do Simulador	38
Figura 3.5 Arranjo dos Componentes do Dispositivo Experimental	41
Figura 3.6 Conjunto da Cápsula Simplificada	43
Figura 3.7 Foto dos Componentes da Cápsula Simplificada	44
Figura 3.8 Estabilizador de Bolhas de Vapor da Cápsula Simplificada	45
Figura 3.9 Fluxograma do Dispositivo Experimental	49
Figura 3.10 Localização dos Termopares no Simulador Elétrico	55
Figura 3.11 Diagrama da Instrumentação do Dispositivo Experimental	60
Figura 3.12 Visualização da Tela do Sistema de Aquisição de Dados	65
Figura 3.13 Cadeias de Medições para Calibrações	69
Figura 4.1 Ebulição em Vaso Aberto da Água na Pressão Atmosférica	77
Figura 5.1 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 1 bar	92
Figura 5.2 Temperaturas na Parede Interna do Vaso de Pressão a 1 bar	92
Figura 5.3 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 5 bar	94
Figura 5.4 Temperaturas na Parede Interna do Vaso de Pressão a 5 bar	94

Figura 5.5 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 10 bar	95
Figura 5.6 Temperaturas na Parede Interna do Vaso de Pressão a 10 bar	96
Figura 5.7 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 40 bar	97
Figura 5.8 Temperaturas na Parede Interna do Vaso de Pressão a 40 bar	97
Figura 5.9 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 70 bar	98
Figura 5.10 Temperaturas na Parede Interna do Vaso de Pressão a 70 bar	98
Figura 5.11 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 110 bar	99
Figura 5.12 Temperaturas na Parede Interna do Vaso de Pressão a 110 bar	100
Figura 5.13 Comparação entre os Valores de ΔT_{SAT} da Tabela 5.8 na Pressão de 1 bar	102
Figura 5.14 Comparação entre os Valores de ΔT_{SAT} da Tabela 5.9 na Pressão de 5 bar	103
Figura 5.15 Comparação entre os Valores de ΔT_{SAT} da Tabela 5.10 na Pressão de 10 bar	104
Figura 5.16 Comparação entre os Valores de ΔT_{SAT} da Tabela 5.11 na Pressão de 40 bar	105
Figura 5.17 Comparação entre os Valores de ΔT_{SAT} da Tabela 5.12 na Pressão de 70 bar	106
Figura 5.18 Comparação entre os Valores de ΔT_{SAT} da Tabela 5.13 na Pressão de 110 bar	107
Figura 5.19 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 1 bar	108
Figura 5.20 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 5 bar	109
Figura 5.21 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 10 bar	110
Figura I.1 Banho Térmico e Ligação dos Termopares para Calibração	129
Figura I.2 Esquema de Interligação dos Transmissores de Pressão para Calibração	132

Lista de Tabelas

	Página
Tabela 3.1 Dimensões e Materiais dos Componentes do Dispositivo Experimental	46
Tabela 3.2 Instrumentação e Aquisição de Dados do Dispositivo Experimental	58
Tabela 3.3 Matriz para Realização dos Experimentos	64
Tabela 4.1 Valores Típicos do Coeficiente de Transferência Convectiva de Calor	80
Tabela 4.2 Temperaturas na Parede Externa do Vaso de Pressão	88
Tabela 4.3 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico	89
Tabela 4.4 Fluxo de Calor Crítico Estimado para a Cápsula Simplificada	89
Tabela 5.1 Resultados dos Experimentos a 1 bar, 0,39 kg/s e 30°C	92
Tabela 5.2 Resultados dos Experimentos a 5 bar, 0,39 kg/s e 30°C	93
Tabela 5.3 Resultados dos Experimentos a 10 bar, 0,39 kg/s e 30°C	95
Tabela 5.4 Resultados dos Experimentos a 40 bar, 0,39 kg/s e 30°C	94
Tabela 5.5 Resultados dos Experimentos a 70 bar, 0,39 kg/s e 30°C	98
Tabela 5.6 Resultados dos Experimentos a 110 bar, 0,39 kg/s e 30°C	99
Tabela 5.7 Propriedades da Água para Determinação de ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico	101
Tabela 5.8 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico para $p = 1$ bar	101
Tabela 5.9 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico para $p = 5$ bar	102
Tabela 5.10 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico para $p = 10$ bar	103
Tabela 5.11 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico para $p = 40$ bar	104
Tabela 5.12 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico para $p = 70$ bar	105
Tabela 5.13 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico para $p = 110$ bar	106
Tabela 5.14 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 1 bar	108
Tabela 5.15 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 5 bar	109

Tabela 5.16 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 10 bar	110
Tabela 5.17 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para $p = 1\text{ bar}$, $v = 0,39\text{ kg/s}$ e $T_{in} = 30^{\circ}\text{C}$.	112
Tabela 5.18 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para $p = 5\text{ bar}$, $v = 0,39\text{ kg/s}$ e $T_{in} = 30^{\circ}\text{C}$	112
Tabela 5.19 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para $p = 10\text{ bar}$, $v = 0,39\text{ kg/s}$ e $T_{in} = 30^{\circ}\text{C}$.	113
Tabela 5.20 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para $p = 40\text{ bar}$, $v = 0,39\text{ kg/s}$ e $T_{in} = 30^{\circ}\text{C}$	113
Tabela 5.21 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para $p = 70\text{ bar}$, $v = 0,39\text{ kg/s}$ e $T_{in} = 30^{\circ}\text{C}$	114
Tabela 5.22 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para $p = 110\text{ bar}$, $v = 0,39\text{ kg/s}$ e $T_{in} = 30^{\circ}\text{C}$	114
Tabela I.1 Parâmetros das Curvas de Calibração dos Termopares do Vaso de Pressão	130
Tabela I.2 Parâmetros das Curvas de Calibração dos Termopares do Simulador Elétrico A	130
Tabela I.3 Parâmetros das Curvas de Calibração dos Termopares do Simulador Elétrico C	131
Tabela I.4 Parâmetros das Curvas de Calibração dos Termopares da Água de Resfriamento	131
Tabela I.5 Parâmetros das Curvas de Calibração dos Transmissores de Pressão e de Vazão	132

SIMBOLOGIA

<u>Símbolo</u>	<u>Grandeza</u>	<u>Unidade SI</u>
A	Área de seção transversal	m^2
c_{p_f}	Calor específico a pressão constante	$J/kg^\circ C$
D_h	Diâmetro hidráulico	m
g	Aceleração gravitacional	m/s^2
h	Coefficiente de transferência de calor	$W/m^2^\circ C$
h_{fg}	Entalpia de vaporização	J/kg
I	Corrente elétrica	A
k	Condutividade térmica	W/mK
k_{Th}	Condutância térmica	W/mK
L	Comprimento	m
P	Potência	W
p	Pressão	bar
q	Taxa de transferência de calor	W
\dot{q}	Fluxo de calor	W/m^2
\dot{q}_{crit}	Fluxo de calor crítico	W/m^2
R	Resistência elétrica	Ω
r	Raio do tubo	m
T	Temperatura	$K, ^\circ C$
V	Tensão elétrica	V
\dot{v}	Vazão mássica	kg/s
u	Velocidade	m/s

<u>Símbolo</u>	<u>Grandeza</u>	<u>Unidade SI</u>
λ	Resistividade elétrica	Ω/mm
μ	Viscosidade dinâmica	kg/ms
ν	Viscosidade cinemática	m^2/s
ρ	Densidade	kg/m^3
σ	Tensão superficial	N/m
Δ	Diferença	$\text{K}, ^\circ\text{C}$

<u>Índice</u>	<u>Denominação</u>
e	externo
f	líquido
g	gás
i	interno
max	máximo
s	superfície
sat	saturação

NÚMEROS ADIMENSIONAIS

Número de Nusselt $Nu = hD_h / k$

Número de Reynolds $Re = \rho V D_h / \mu$

Número de Prandt $Pr = C_p \mu / k$

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

A operação de uma usina nuclear de potência é baseada na produção de calor através do seu combustível nuclear e na utilização desse calor para geração de vapor que aciona o conjunto turbina e gerador para produção de energia elétrica. Os combustíveis nucleares da maioria dos reatores de potência a água pressurizada em operação no mundo na forma de pastilhas cilíndricas de dióxido de urânio encapsuladas em um tubo metálico de revestimento, sendo o conjunto denominado de vareta combustível nuclear [El-Wakil, 1971]. A energia térmica responsável pelo processo de geração de eletricidade é produzida através da reação de fissão nuclear que ocorre no combustível da vareta [Glasstone, 1994]. O revestimento da vareta é fundamental no processo de refrigeração do combustível nuclear e no confinamento dos elementos químicos radioativos produzidos pelas reações de fissão. O desenvolvimento de novos projetos de varetas combustíveis nucleares deve ser apoiado por um programa de qualificação experimental da vareta realizado em reatores de pesquisas, utilizando dispositivos experimentais conhecidos como circuitos de irradiação [McAnemy, 1973].

Um circuito de irradiação tem a função de reproduzir, no ambiente da vareta combustível em teste, as condições operacionais previstas para a mesma durante sua utilização em um reator de potência e viabilizar o levantamento das variáveis físicas do novo projeto de vareta combustível. O circuito deve ser projetado para funcionar com elevado índice de segurança, evitando acidentes que possam danificar a vareta combustível em teste, garantindo a integridade física do reator de pesquisas onde está sendo realizado o experimento e impedindo a contaminação radioativa do mesmo na hipótese de vazamento dos materiais radioativos existentes na vareta combustível. Experimentos realizados em reatores de pesquisas, utilizando circuitos de irradiação para qualificação experimental de protótipos de novas varetas combustíveis nucleares, são conhecidos como testes de irradiação.

Um circuito de irradiação a água fervente é constituído, basicamente, por uma cápsula de irradiação, pelos seus sistemas operacionais e pela instrumentação de proteção e controle [Atkinson e Rigg, 1962]. A cápsula de irradiação recebe a vareta combustível nuclear a ser qualificada e é posicionada no núcleo de um reator de

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

A operação de uma usina nuclear de potência é baseada na produção de calor através do seu combustível nuclear e na utilização desse calor para geração de vapor que aciona o conjunto turbina e gerador para produção de energia elétrica. Os combustíveis nucleares da maioria dos reatores de potência a água pressurizada em operação no mundo na forma de pastilhas cilíndricas de dióxido de urânio encapsuladas em um tubo metálico de revestimento, sendo o conjunto denominado de vareta combustível nuclear [El-Wakil, 1971]. A energia térmica responsável pelo processo de geração de eletricidade é produzida através da reação de fissão nuclear que ocorre no combustível da vareta [Glasstone, 1994]. O revestimento da vareta é fundamental no processo de refrigeração do combustível nuclear e no confinamento dos elementos químicos radioativos produzidos pelas reações de fissão. O desenvolvimento de novos projetos de varetas combustíveis nucleares deve ser apoiado por um programa de qualificação experimental da vareta realizado em reatores de pesquisas, utilizando dispositivos experimentais conhecidos como circuitos de irradiação [McAnemy, 1973].

Um circuito de irradiação tem a função de reproduzir, no ambiente da vareta combustível em teste, as condições operacionais previstas para a mesma durante sua utilização em um reator de potência e viabilizar o levantamento das variáveis físicas do novo projeto de vareta combustível. O circuito deve ser projetado para funcionar com elevado índice de segurança, evitando acidentes que possam danificar a vareta combustível em teste, garantindo a integridade física do reator de pesquisas onde está sendo realizado o experimento e impedindo a contaminação radioativa do mesmo na hipótese de vazamento dos materiais radioativos existentes na vareta combustível. Experimentos realizados em reatores de pesquisas, utilizando circuitos de irradiação para qualificação experimental de protótipos de novas varetas combustíveis nucleares, são conhecidos como testes de irradiação.

Um circuito de irradiação a água fervente é constituído, basicamente, por uma cápsula de irradiação, pelos seus sistemas operacionais e pela instrumentação de proteção e controle [Atkinson e Rigg, 1962]. A cápsula de irradiação recebe a vareta combustível nuclear a ser qualificada e é posicionada no núcleo de um reator de

pesquisas para realização dos testes de irradiação. A parte do circuito que é instalada no saguão do reator de pesquisas constitui seus sistemas operacionais e serve para reproduzir, no interior da cápsula de irradiação, mais especificamente na região da vareta em teste, as condições de temperatura, pressão e de radiação que a vareta encontrará durante sua utilização em reatores de potência. A instrumentação, juntamente com os sistemas operacionais, é responsável pelas medições e controle das variáveis físicas experimentais e pela proteção do reator de pesquisas, do circuito de irradiação e da vareta combustível em teste.

O Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP está desenvolvendo, em parceria com o CDTN-CNEN, um Circuito de Irradiação a Água Fervente denominado CAFE-Mod1, para qualificação do combustível nuclear brasileiro projetado pelo CTMSP. O circuito de irradiação CAFE-Mod1, contendo a vareta combustível a ser qualificada, será montado no reator IEA-R1 do IPEN-CNEN, em São Paulo. A partir das especificações técnicas da vareta combustível nuclear a ser qualificada e do projeto de engenharia do CAFE-Mod1, pesquisadores do CDTN desenvolveram um dispositivo experimental para realização dos experimentos de ebulição confinada a serem realizados para validação do projeto e dos processos de fabricação do circuito de irradiação. As informações sobre o circuito de irradiação foram retiradas de documentos de engenharia do seu projeto básico e poderão ser modificadas como consequência dos resultados do programa experimental para validação de seu projeto e dos processos de fabricação propostos para seus componentes [Costa, Esteves, Lima e Silva, 1998].

O conceito escolhido para o CAFE-Mod1 emprega o fenômeno de ebulição nucleada confinada em uma geometria diferente da convencional e, por essa razão, exige que estudos experimentais sejam realizados para melhor compreensão de seu funcionamento e para levantamento de seus parâmetros térmicos e hidráulicos. Ao invés da situação convencional, onde as bolhas de vapor produzidas por ebulição estão livres para se deslocarem para cima, na nova geometria proposta um sistema de discos metálicos horizontais é utilizado para limitar a trajetória e o tamanho das bolhas de vapor. O espaço compreendido entre dois discos metálicos sucessivos é denominado de célula de convecção e ele serve para guiar as bolhas de vapor desde seu ponto de origem sobre a superfície vertical aquecida para uma superfície metálica resfriada onde ocorrerá a condensação das bolhas de vapor.

O conceito de utilização de discos guias para orientação de bolhas foi utilizado originalmente por M. Neumann e colaboradores no Nuclear Research Centre, Jülich, Alemanha, para testes de projetos de varetas combustíveis [Neumann e Reichardt, 1968]. A vareta combustível nuclear, os discos guias e o refrigerante primário a uma pressão de 7,2 MPa ficavam contidos em um vaso de liga de alumínio, conforme relatado no artigo de John C. Whitehouse, em 1992. A remoção de calor foi conseguida utilizando água como fluido secundário que escoava em um canal em forma de anel tubular entre o vaso de pressão interno e a contenção secundária. A cápsula de irradiação neste caso foi instalada em um canal vertical experimental de 50 mm de diâmetro de um reator de testes de materiais. O enfoque básico do artigo citado foi a descrição de um circuito de irradiação a água fervente para testes de irradiação, não sendo tratados no mesmo os experimentos preliminares para validação do projeto e dos processos de fabricação do circuito de irradiação, conforme proposto por este trabalho de tese.

Outra publicação encontrada e relacionada ao tema foi o trabalho de tese realizado também por John C. Whitehouse na Escola de Engenharia Nuclear da University of New Wales, Austrália [Whitehouse, 1976]. Neste trabalho, o objetivo principal era estudar como a geometria de discos modifica o comportamento da ebulição e modelar os diversos modos de transferência de calor observados durante seus experimentos. Foram utilizados como fluido de trabalho o Freon-11 e, como fluido secundário, a água. Como o objetivo da tese exigia a visualização do fenômeno de ebulição foi utilizado como material do vaso de pressão e da contenção secundária o borosilicato. Os discos guias foram construídos de resina *epoxy*. O sistema primário operou em pressões de até 1,8 MPa. Nesta publicação são descritos, com clareza, os diferentes regimes de ebulição nucleada encontrados no interior da seção de testes contendo um simulador elétrico e os discos guias, deixando claro que os regimes da ebulição nucleada modificada pela presença das células de convecção diferem bastante daqueles encontrados em ebulição de vaso.

Após pesquisa bibliográfica extensiva na literatura pertinente, foram encontradas somente estas duas publicações relacionadas a este trabalho, sendo que o artigo referido no parágrafo anterior é o único relacionado a estudos de ebulição, tendo no entanto objetivos diferentes e limitações de pressão e temperatura. Assim, os projetistas do CAFE-Mod1 decidiram que uma investigação sobre os parâmetros de ebulição

confinada específicos para as condições de operação do circuito de irradiação, que está sendo desenvolvido em nosso país, era imprescindível.

O regime de ebulição nucleada tem sido, há muito tempo, reconhecido como um mecanismo de transferência de calor muito eficiente com aplicações nas indústrias química, de refrigeração, térmica para geração de energia elétrica e, até mesmo, para refrigeração de dispositivos eletrônicos. Como consequência de sua importância na transferência de calor, numerosas investigações têm sido realizadas sobre o comportamento dos mecanismos físicos da ebulição, sempre com soluções que se aplicam a casos específicos [Stephan e Auracher, 1981]. Devido à complexidade do fenômeno, não se conseguem correlações empíricas de aplicações generalizadas. As correlações obtidas experimentalmente têm validade restrita para aplicação na faixa de valores para a qual ela foi elaborada. Assim, o conceito adotado para a refrigeração primária no interior do vaso de pressão da cápsula do circuito de irradiação por ebulição nucleada determinou a necessidade de um programa de experimentos sobre ebulição confinada. Este programa experimental deve ser realizado em uma seção de testes representando precisamente os materiais, as formas e as dimensões da cápsula de irradiação para caracterização do comportamento da ebulição no interior do vaso de pressão e para levantamento das variáveis operacionais importantes para o circuito de irradiação.

Com o objetivo de validar experimentalmente os componentes desenvolvidos e os critérios e parâmetros utilizados no projeto de engenharia do circuito de irradiação CAFE-Mod1, um extenso programa de investigação foi planejado e está atualmente em andamento no CDTN. Dentre estas atividades experimentais estão os testes sobre o comportamento térmico de uma réplica da cápsula de irradiação submetida ao regime de ebulição nucleada, conforme previsto para os testes de irradiação de qualificação do combustível nuclear desenvolvido e construído em nosso país. Estes resultados experimentais, além de serem empregados para a validação do projeto e dos processos de fabricação adotados para o CAFE-Mod1, serão utilizados, também, para a análise de segurança do circuito de irradiação e para o desenvolvimento de um programa computacional de previsão dos resultados de testes de irradiação com novos projetos de varetas combustíveis.

Na Figura 1.1 são mostradas as principais atividades relacionadas ao desenvolvimento do CAFE-Mod1, indicando também os órgãos executores de cada etapa do projeto. A análise de segurança da instalação e da operação do circuito de irradiação CAFE-Mod1 no reator IEA-R1 são de responsabilidade do IEN-CNEN. Este trabalho de tese, executado junto ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, possibilitou o levantamento de informações sobre o comportamento do CAFE-Mod1 antes de sua instalação no reator de pesquisas.

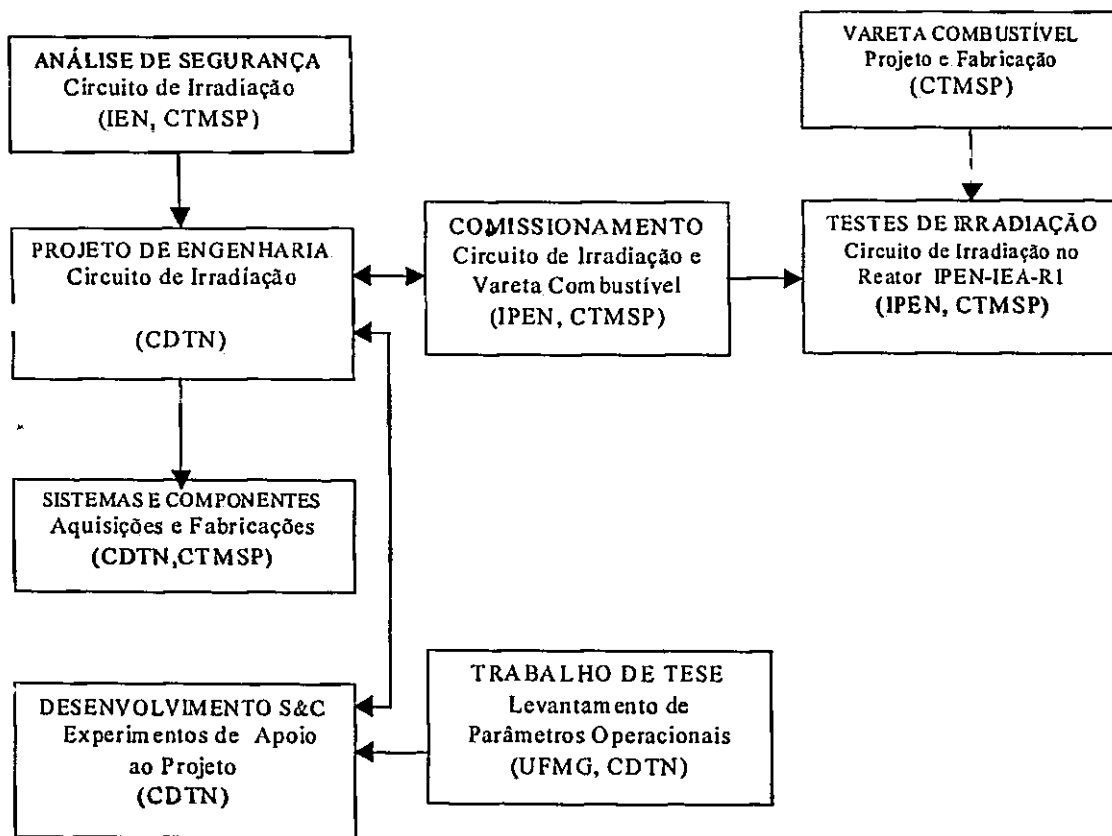


Figura 1.1 Inserção do Trabalho de Tese no Programa de Desenvolvimento do CAFE-Mod1

A importância dos processos de ebulição na transferência de calor de diversas áreas e, principalmente, a aplicação direta dos resultados deste experimento sobre o comportamento térmico da cápsula de irradiação para a conclusão do primeiro projeto nacional de um circuito de irradiação, constituem as principais motivações para

elaboração deste trabalho de tese junto ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.

Esta avaliação experimental do comportamento térmico do circuito de irradiação a água fervente que está sendo desenvolvido por Institutos de Pesquisas do setor nuclear brasileiro, com a finalidade de qualificar varetas combustíveis para reatores nucleares de potência, exigiu o desenvolvimento, a fabricação e a montagem de um dispositivo experimental, similar ao circuito real, e de um simulador elétrico para varetas combustíveis nucleares utilizadas em reatores nucleares a água pressurizada. O estudo foi realizado com a utilização de um simulador elétrico com as mesmas características geométricas e dimensionais, mesmo material de revestimento e mesma densidade de potência térmica da vareta combustível nuclear a ser qualificada. O simulador é posicionado em uma cápsula simplificada que utiliza geometria de grades e discos metálicos horizontais para modificação do processo de refrigeração por ebulição.

Neste primeiro capítulo, além da visão geral sobre o estudo experimental realizado e da apresentação dos trabalhos encontrados na literatura e que serviram como referência para os experimentos de ebulição confinada executados, são relacionados os objetivos deste trabalho de tese.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre as principais especificações técnicas do CAFE-Mod1 e da vareta combustível nuclear a ser qualificada pelo mesmo. Estas especificações técnicas foram utilizadas como referência pelos pesquisadores no desenvolvimento, projeto e fabricação do dispositivo experimental e do simulador elétrico.

No capítulo 3 é descrito o simulador elétrico de vareta combustível nuclear que foi desenvolvido e fabricado para realização dos experimentos propostos neste trabalho. Este capítulo descreve também o dispositivo experimental e os procedimentos para realização dos experimentos propostos.

Em seqüência, no quarto capítulo é apresentado o estudo sobre os fundamentos da ebulição de vaso aplicados ao funcionamento térmico da cápsula simplificada e relacionadas as correlações empíricas identificadas na literatura e aplicadas em cálculos preliminares sobre a transferência de calor no dispositivo experimental. Os valores de

elaboração deste trabalho de tese junto ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.

Esta avaliação experimental do comportamento térmico do circuito de irradiação a água fervente que está sendo desenvolvido por Institutos de Pesquisas do setor nuclear brasileiro, com a finalidade de qualificar varetas combustíveis para reatores nucleares de potência, exigiu o desenvolvimento, a fabricação e a montagem de um dispositivo experimental, similar ao circuito real, e de um simulador elétrico para varetas combustíveis nucleares utilizadas em reatores nucleares a água pressurizada. O estudo foi realizado com a utilização de um simulador elétrico com as mesmas características geométricas e dimensionais, mesmo material de revestimento e mesma densidade de potência térmica da vareta combustível nuclear a ser qualificada. O simulador é posicionado em uma cápsula simplificada que utiliza geometria de grades e discos metálicos horizontais para modificação do processo de refrigeração por ebulição.

Neste primeiro capítulo, além da visão geral sobre o estudo experimental realizado e da apresentação dos trabalhos encontrados na literatura e que serviram como referência para os experimentos de ebulição confinada executados, são relacionados os objetivos deste trabalho de tese.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre as principais especificações técnicas do CAFE-Mod1 e da vareta combustível nuclear a ser qualificada pelo mesmo. Estas especificações técnicas foram utilizadas como referência pelos pesquisadores no desenvolvimento, projeto e fabricação do dispositivo experimental e do simulador elétrico.

No capítulo 3 é descrito o simulador elétrico de vareta combustível nuclear que foi desenvolvido e fabricado para realização dos experimentos propostos neste trabalho. Este capítulo descreve também o dispositivo experimental e os procedimentos para realização dos experimentos propostos.

Em seqüência, no quarto capítulo é apresentado o estudo sobre os fundamentos da ebulição de vaso aplicados ao funcionamento térmico da cápsula simplificada e relacionadas as correlações empíricas identificadas na literatura e aplicadas em cálculos preliminares sobre a transferência de calor no dispositivo experimental. Os valores de

referência obtidos através dos cálculos preliminares e utilizados durante a realização dos experimentos, são também apresentados neste capítulo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados dos experimentos, uma comparação destes resultados experimentais com valores calculados utilizando correlações tradicionais da área de ebulição e os valores determinados para o coeficiente de transferência de calor e para a condutância térmica na região de ebulição nucleada. No sexto e último capítulo são relacionadas as conclusões gerais decorrentes dos experimentos de troca de calor da cápsula simplificada e as sugestões para futuros trabalhos relacionados ao tema.

1.2 Objetivos

O objetivo principal do programa experimental descrito neste trabalho de tese foi o levantamento de parâmetros térmicos da cápsula do circuito de irradiação CAFE-Mod1 quando submetida ao regime de ebulição nucleada antes de sua instalação no reator de pesquisas para testes de irradiação com varetas combustíveis nucleares. Com esta finalidade o trabalho de tese foi dividido em três etapas:

- i. desenvolver e construir um dispositivo experimental para representar o circuito de irradiação e um simulador elétrico para substituir a vareta combustível nuclear durante os experimentos a serem realizados antes da instalação do CAFE-Mod1 no reator de pesquisas IEA-R1;
- ii. planejar e executar um programa experimental para avaliar o comportamento térmico e mecânico dos componentes desenvolvidos para o circuito de irradiação CAFE-Mod1 e para realizar o levantamento de parâmetros térmicos para a cápsula de irradiação, quando submetida ao regime de ebulição nucleada sob as condições operacionais previstas para os testes de irradiação;
- iii. processar os resultados experimentais e determinar, com base nestes resultados, coeficientes de transferência de calor para validação ou não dos coeficientes utilizados na fase de projeto básico de engenharia do circuito de Irradiação CAFE-Mod1.

Dentre os resultados experimentais obtidos podem ser destacados: o levantamento de perfis de temperaturas do simulador elétrico e do vaso de pressão a

partir de condições operacionais previstas para o circuito de irradiação; a determinação dos coeficientes de transferência de calor para a região do estabilizador de bolhas de vapor; e a avaliação do comportamento da junta dissimilar de união do aço inoxidável com a liga de alumínio, utilizada no corpo do vaso de pressão, quando submetida às condições operacionais de pressão e de temperatura previstas para o circuito de irradiação.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O CIRCUITO DE IRRADIAÇÃO

2.1 Introdução

O desenvolvimento de reatores nucleares seguros e eficientes é sempre baseado em programas experimentais abrangentes e de grande importância para qualificação de varetas combustíveis, de materiais estruturais e de outros componentes [Atkinson e Rigg, 1962]. O domínio da tecnologia de construção de circuitos de irradiação não constitui meramente um meio de condução de programas de testes de irradiação; na verdade contribui substancialmente para o aperfeiçoamento da tecnologia nuclear [Whitehouse, 1976]. Este capítulo resume as especificações técnicas e as condições operacionais da vareta combustível nuclear a ser qualificada e do circuito de irradiação a água fervente utilizadas como referência para o desenvolvimento, projeto e fabricação do dispositivo experimental e do simulador elétrico. As informações apresentadas se limitam às características técnicas que, de algum modo, influenciaram os pesquisadores no desenvolvimento do dispositivo experimental e do simulador elétrico e na definição das variáveis físicas a serem medidas durante a realização dos estudos de ebulição nucleada confinada deste trabalho. As informações técnicas apresentadas neste capítulo sobre o circuito de irradiação a água fervente que está sendo desenvolvido em nosso país foram obtidas diretamente da documentação do projeto de engenharia do mesmo [Costa, Esteves, Lima e Silva, 1998].

2.2 Qualificação da Vareta Combustível Nuclear

O combustível nuclear é a parte ativa e consumível do núcleo de um reator e deve periodicamente ser repostado para manter a potência do reator em seu valor nominal. Os átomos de urânio do combustível nuclear sofrem uma reação nuclear de fissão, controlada e auto-sustentada ao capturarem os nêutrons, resultando na liberação de energia térmica e produção de elementos químicos altamente radioativos, os quais ficam confinados no interior da vareta combustível.

Na maioria dos reatores nucleares de potência a água pressurizada existentes no mundo, a vareta combustível é constituída de uma coluna de pastilhas cerâmicas do combustível nuclear de dióxido de urânio (UO_2) encapsuladas em um tubo de

revestimento de aço inoxidável e mantidas sob pressão por meio de uma mola localizada em sua parte superior. O revestimento é fechado por tampões de extremidades soldados ao revestimento e pressurizado internamente com gás hélio. Entre a mola e as pastilhas de dióxido de urânio, e entre estas e o tampão inferior, são colocadas pastilhas de alumina com a função de isolamento térmico. Cada pastilha de dióxido de urânio típica tem altura de 10,3 mm e diâmetro de 8,49 mm. O tubo de revestimento é de aço inoxidável AISI-348 com diâmetro externo de 9,8 mm e interno de 8,6 mm. Funcionalmente, o revestimento da vareta posiciona o combustível no núcleo do reator para produção de energia térmica a partir da reação de fissão nuclear, serve de barreira para separar o combustível nuclear do refrigerante primário, permite a transferência do calor gerado no combustível para a água de refrigeração, suporta a diferença de pressão externa e interna e acomoda os efeitos químicos, térmicos, mecânicos e de irradiação no seu material. Na Figura 2.1 é representada uma vareta combustível típica para reatores nucleares a água pressurizada e possível de ser qualificada no circuito de irradiação a água fervente.

O núcleo de um reator constitui a fonte de calor de uma usina nuclear e é formado por um número elevado de varetas combustíveis, agrupadas muito próximas umas das outras para possibilitar a manutenção da reação de fissão controlada e auto-sustentada responsável pela produção de calor. A transferência da energia térmica produzida na vareta combustível para o fluido de refrigeração é o principal fator de limitação da potência de operação de um reator [El-Wakil, 1971].

Durante a operação de um reator nuclear, seu combustível produz energia térmica a uma potência linear de pico típica da ordem de 500 W/cm e produz também diversos elementos químicos altamente radioativos, provenientes das fissões. A principal função de segurança da vareta combustível é evitar a dispersão dos produtos de fissão altamente radioativos na água de refrigeração do reator. O projeto da vareta combustível deve garantir a manutenção da sua integridade para desempenho dessa importante função de segurança, mesmo considerando que seus componentes estarão submetidos a valores elevados de temperaturas, pressões e de fluxos neutrônicos, o que resulta em esforços mecânicos e térmicos severos, em acentuada corrosão e em alterações significativas nas propriedades dos materiais empregados na sua fabricação.

VARETA COMBUSTÍVEL COM PASTILHAS UO_2

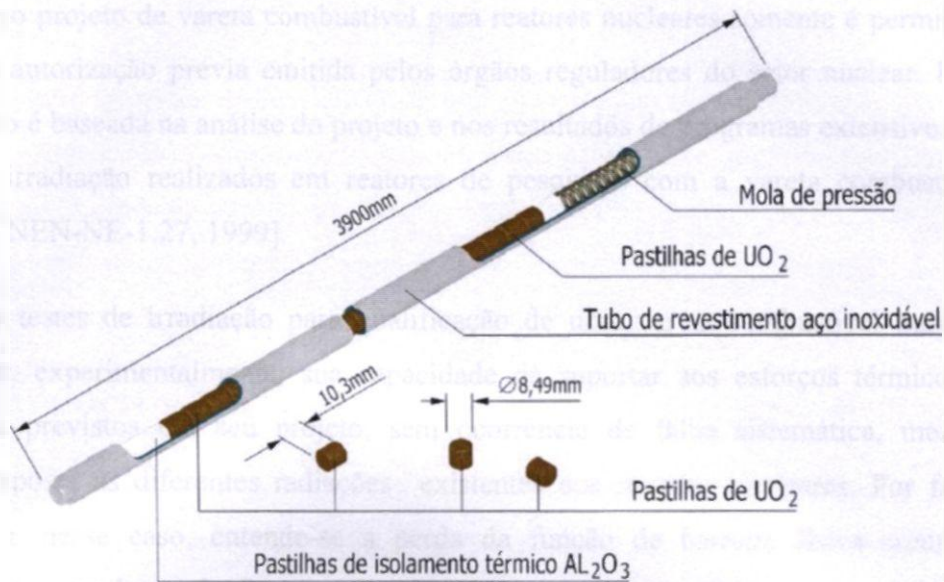


Figura 2.1 Ilustração de uma Vareta Combustível Típica para Reatores a Água Pressurizada

As duas condições operacionais que podem determinar a falha ou o rompimento do revestimento da vareta combustível são a fusão do revestimento, por excesso de temperatura, e uma pressão excessiva sobre a superfície interna do revestimento da vareta. A primeira possibilidade, fusão do revestimento, ocorrerá se sua temperatura se aproximar do ponto de fusão de seu material devido à redução no coeficiente de transferência de calor da superfície do revestimento para a água de refrigeração. Isto é possível apenas se for atingido o fluxo de calor crítico na água em ebulição. A segunda possibilidade, rompimento do revestimento por pressão excessiva no interior da vareta, somente poderá ocorrer devido a um súbito aumento no volume do combustível dentro do revestimento da vareta. Este aumento de pressão será decorrente da fusão do dióxido de urânio, causando a dilatação dessa liga. A falha de uma vareta combustível por ruptura de seu revestimento será impedida de ocorrer caso sejam limitadas a temperatura máxima de operação de seu revestimento e a máxima densidade de potência linear permitida para operação de seu combustível.

Devido à importância das funções das varetas combustíveis para manutenção da segurança em um reator nuclear e às consequências de suas possíveis falhas, a utilização de um novo projeto de vareta combustível para reatores nucleares somente é permitida após uma autorização prévia emitida pelos órgãos reguladores do setor nuclear. Esta autorização é baseada na análise do projeto e nos resultados de programas extensivos de testes de irradiação realizados em reatores de pesquisas com a vareta combustível nuclear [CNEN-NE-1.27, 1999].

Os testes de irradiação para qualificação de uma vareta combustível buscam comprovar, experimentalmente, sua capacidade de suportar aos esforços térmicos e mecânicos previstos em seu projeto, sem ocorrência de falha sistemática, mesmo quando exposta às diferentes radiações existentes nos reatores nucleares. Por falha sistemática, nesse caso, entende-se a perda da função de barreira física contra a liberação dos produtos de fissão radioativos. Estes testes possibilitam demonstrar a eficiência da vareta como fonte do calor produzido pela reação nuclear de fissão e o levantamento de parâmetros de projeto. Estes parâmetros são constantes físicas ou propriedades mecânicas utilizadas na modelagem analítica. A comparação analítica e experimental desses valores tem a finalidade de validar os modelos de cálculos adotados no projeto. Os testes de irradiação constituem o método de investigação mais importante para qualificação de novos projetos de varetas combustíveis nucleares e consistem na irradiação de protótipos da nova vareta em reatores de pesquisas, complementados a seguir com os exames de pós-irradiados.

A realização de testes de irradiação para qualificação de novos projetos de varetas combustíveis dependem da disponibilidade de uma infra-estrutura experimental, constituída por [Costa, Esteves, Lima e Silva, 1998]:

- i. reator de teste de materiais ou de pesquisas utilizado como fonte de nêutrons, pois a vareta combustível em teste não tem a capacidade de atingir o processo de reação nuclear de fissão em cadeia ou auto-sustentado;
- ii. circuito de irradiação utilizado para posicionar a vareta combustível adequadamente do núcleo do reator de pesquisas e para possibilitar a simulação das condições termo-hidráulicas e neutrônicas necessárias para o teste de irradiação;

- iii. laboratório de células quentes utilizado para manuseio remoto da vareta irradiada com a finalidade de executar ensaios destrutivos e não-destrutivos de pós-irradiados.

Durante os testes de irradiação de um novo projeto de vareta combustível os principais parâmetros a serem avaliados são a temperatura na superfície externa do revestimento, a potência térmica gerada por fissão nuclear no combustível, a evolução da pressão no interior da vareta com o decorrer da irradiação e a queima de átomos físséis no final da irradiação.

2.3 Apresentação do Circuito de Irradiação a Água Fervente CAFE-Mod1

O circuito de irradiação deve submeter a vareta combustível durante os testes de irradiação às condições térmicas, hidráulicas, mecânicas e neutrônicas previstas nas suas especificações técnicas e possibilitar medições de todas as variáveis importantes para a avaliação do desempenho da nova vareta no que diz respeito à eficiência e à segurança. O projeto e os processos de fabricação de um circuito de irradiação envolvem soluções complexas e por vezes conflitantes nas áreas de materiais, térmica, hidráulica e neutrônica. O conceito, os critérios e os limites de projeto do circuito de irradiação são estabelecidos a partir de uma análise criteriosa das especificações técnicas da nova vareta combustível a ser submetida a testes de irradiação, do reator de pesquisas a ser utilizado como fonte de nêutrons e do tipo de reator de potência para o qual a vareta está sendo desenvolvida [Costa, Esteves e Dias, 1996].

Em termos de segurança, o circuito de irradiação deve proteger o reator de pesquisas contra possíveis danos mecânicos devido a falhas no revestimento da vareta e contra contaminação radioativa decorrente da liberação dos produtos de fissão no caso de perda da estanqueidade da vareta. ©

A característica mais importante dos circuitos de irradiação a água fervente é a refrigeração da vareta combustível por água pressurizada estática, submetida a mudança de fase no regime de ebulição nucleada sub-resfriada. Este processo possibilita a remoção de grandes quantidades de calor a partir de pequenas variações de temperaturas. A esta característica deve ser acrescentado que o emprego da ebulição confinada com a nova geometria de grades e discos do estabilizador de bolhas eleva o valor do fluxo crítico de calor e permite maior segurança operacional para o circuito de

irradiação. O calor retirado da vareta combustível pelo sistema de água pressurizada é removido para fora da cápsula de irradiação pelo sistema de água de resfriamento utilizando água sob convecção forçada. Neste tipo de instalação destinada à investigação do comportamento de varetas combustíveis outras características conceituais importantes são [Costa, Esteves, Lima e Silva, 1998]:

- a água pressurizada que retira, por mudança de fase, o calor gerado no combustível nuclear da vareta não necessita ser circulada fora da cápsula de irradiação para remoção radial daquele calor;
- a remoção do calor produzido na vareta em teste para fora da cápsula de irradiação é realizada pelo sistema de água de resfriamento a baixa pressão e sob convecção forçada. Este sistema resfria a cápsula de irradiação através da superfície externa do vaso de pressão e elimina a necessidade de isolamento térmico da cápsula de irradiação em relação à água da piscina do reator de pesquisas;
- no caso extremo de rompimento do revestimento da vareta em teste a água de resfriamento não é contaminada, permitindo a manutenção da refrigeração secundária sem dispersar, para fora da cápsula de irradiação, os produtos de fissão radioativos liberados pelo combustível nuclear;
- A utilização da cápsula com refrigeração primária por mudança de fase possibilita prévio conhecimento da temperatura no revestimento da vareta e garante que toda a superfície do revestimento da vareta em teste estará submetida a uma temperatura uniforme;
- As baixas temperaturas esperadas para o vaso de pressão possibilitam o emprego de ligas de alumínio para fabricação do vaso de pressão da cápsula de irradiação. Este material apresenta a importante característica de baixa absorção neutrônica aliada à boa condutividade térmica, à baixa ativação específica e à elevada resistência a danos por radiação até determinado valor de temperatura [ASME, 1992].

2.3.1 Critérios e Limites de Projeto

O circuito de irradiação CAFE-Mod1 é formado pela cápsula de irradiação, contendo a vareta combustível a ser qualificada e instalada no interior do núcleo do

reator de pesquisas IEA-R1, pelos sistemas operacionais instalados no saguão do reator e pela instrumentação de controle e proteção montada na sala de operação do circuito. A cápsula está sendo projetada para irradiação em uma das posições verticais da placa matriz do núcleo do referido reator de pesquisas. Por essa razão, seu tubo mais externo terá um diâmetro máximo de 50 mm. Os sistemas operacionais do circuito de irradiação reproduzem no interior da cápsula, região onde ficará instalada a vareta em teste, as condições térmicas, hidráulicas e neutrônicas esperadas de ocorrerem em um reator de potência a água pressurizada. Um painel denominado de Unidade de Sistemas é montado no saguão do reator de pesquisas contendo bombas, vasos, filtros, válvulas e sensores dos sistemas operacionais. A instrumentação contém os elementos para medição, monitoração, controle, proteção e alarmes de defeitos das diversas variáveis físicas importantes para o teste de irradiação.

Os principais critérios e limites de projeto do circuito de irradiação CAFE-Mod1 considerados para o desenvolvimento do dispositivo experimental e do simulador elétrico são [Costa, Esteves, Lima e Silva, 1998]:

- cápsula de irradiação com sistema de resfriamento próprio utilizando água da piscina do reator de pesquisas sob o regime de convecção forçada;
- medição da potência térmica gerada pela vareta em teste e da evolução de sua pressão interna durante o teste de irradiação;
- interrupção do teste de irradiação automaticamente pelo sistema de proteção nos casos de refrigeração insuficiente da cápsula de irradiação, pressão no sistema de água pressurizada superior ou inferior aos limites de segurança, nível baixo de água no pressurizador e, finalmente, se houver o esvaziamento da piscina do reator de pesquisas;
- teste de irradiação com varetas combustíveis de diâmetros externos variando de 9,8 a 12 mm;
- pressão máxima prevista para o interior da vareta combustível: 100 bar;
- pressão de projeto do vaso de pressão: 133 bar;
- temperatura máxima de projeto na superfície interna do vaso de pressão: 122°C;

- temperatura máxima da água de resfriamento na entrada da cápsula de irradiação: 40°C;
- vazão nominal do sistema de água de resfriamento: 0,39 kg/s;
- sistema de refrigeração com capacidade para remover, com segurança, uma potência linear de pico da vareta combustível de 500 W/cm.

2.3.2 Sistemas e Componentes

Este item apresenta uma descrição da cápsula de irradiação, dos sistemas operacionais e da instrumentação de controle e proteção do circuito de irradiação CAFE-Mod1.

2.3.2.1 Cápsula de Irradiação

A cápsula de irradiação é formada por três tubos metálicos concêntricos, identificados de dentro para fora como vaso de pressão, tubo divisor de fluxo e tubo externo. Na Figura 2.2 são apresentados, esquematicamente, os componentes da cápsula do circuito de irradiação CAFE-Mod1 e o posicionamento da vareta combustível teste.

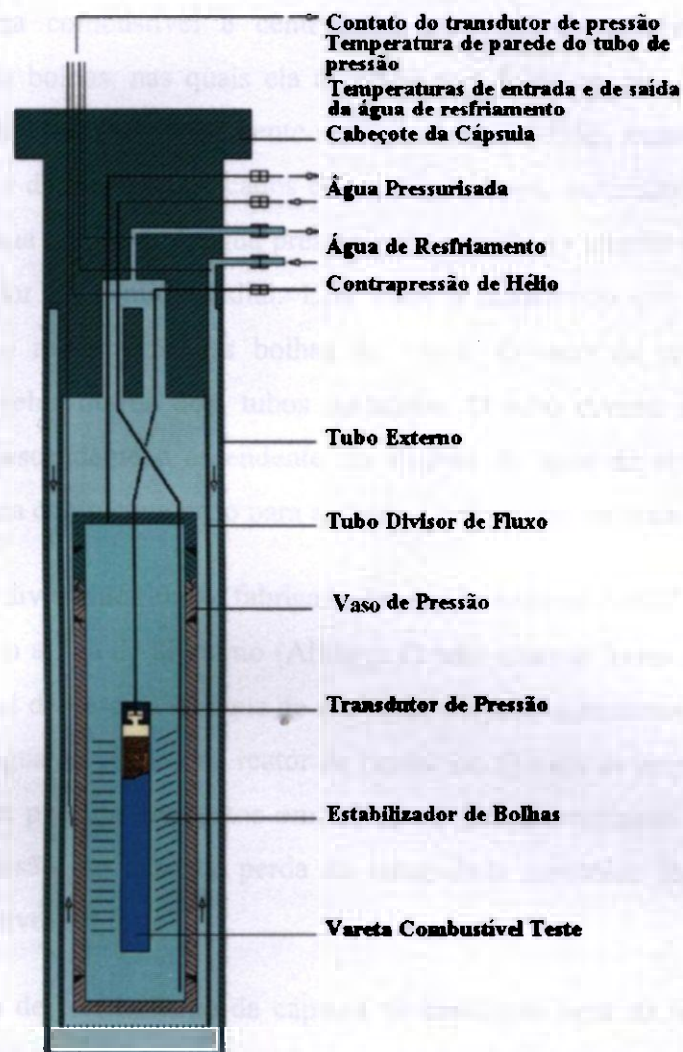


Figura 2.2 Esquema da Cápsula do Circuito de Irradiação [Costa, Esteves e Dias, 1996]

O tubo mais interno denominado de vaso de pressão tem sua parte inferior fabricada com a liga $AlMg_3$ e sua parte superior em aço inoxidável AISI-321, ambas utilizando tubo sem costura na fabricação. Entre os dois materiais dissimilares é intercalado um anel com sua parte superior de aço inoxidável e sua parte inferior de $AlMg_3$, com solda por difusão utilizada entre os dois anéis constituintes. A parte inferior da cápsula de irradiação será posicionada no comprimento útil do núcleo do reator de pesquisas durante os testes de irradiação e a utilização da liga de alumínio é necessária pelas razões apresentadas no item 2.3. É no interior do vaso de pressão que é instalada a vareta combustível a ser qualificada envolvida pelo estabilizador de bolhas de vapor para otimização da refrigeração primária no regime de ebulição nucleada.

A vareta combustível é centralizada no vaso de pressão pelas guias do estabilizador de bolhas, nas quais ela é fixada com folga em um dos extremos. Três hastes longitudinais na forma de pente e fabricadas em AlMg₃ mantêm os discos guias do estabilizador de bolhas, fabricados em aço inoxidável, inclinados em 30° para cima na direção de sua periferia. A água pressurizada contida no interior do vaso de pressão transfere o calor no sentido radial. Este calor é transferido por convecção natural provocada pelo movimento das bolhas de vapor. O vaso de pressão é envolvido externamente pelos outros dois tubos metálicos. O tubo divisor de fluxo separa os escoamentos descendente e ascendente do sistema de água de resfriamento. O tubo externo funciona como contenção para a vareta combustível em teste.

O tubo divisor de fluxo é fabricado em aço inoxidável AISI-321 e o tubo externo é fabricado com a liga de alumínio (AlMg₃). O tubo externo forma com o tubo divisor de fluxo o canal de descida da água de resfriamento para isolamento térmico da cápsula em relação a água da piscina do reator de pesquisas. O vaso de pressão funciona como uma contenção para os elementos emissores de elevada radiação e denominados de produtos de fissão, no caso de perda da integridade mecânica pelo revestimento da vareta combustível em teste.

A água de resfriamento da cápsula de irradiação vem da piscina do reator de pesquisas IEA-R1 e entra por dois furos no cabeçote da cápsula, escoando para baixo no canal tubular formado pela superfície interna do tubo externo e pela superfície externa do tubo divisor de fluxo até a cota mais baixa da cápsula, retornando em fluxo ascendente pelo canal tubular interno formado entre o tubo divisor de fluxo e o vaso de pressão, refrigerando o vaso de pressão no seu trajeto.

2.3.2.2 Sistemas Operacionais

Os sistemas operacionais do circuito de irradiação são montados no saguão do reator de pesquisas IEA-R1 e ficam permanentemente interligados com o interior da cápsula de irradiação por meio de tubulações de aço inoxidável rígidas e flexíveis. Os sistemas operacionais são responsáveis por reproduzir no interior do vaso de pressão, na região da vareta em teste, as condições de pressão e temperatura definidas para o teste de irradiação. Estes sistemas são responsáveis também pela refrigeração da cápsula, pela monitoração da evolução da pressão interna da vareta provocada pela formação dos

produtos de fissão gasosos e pelo armazenamento dos rejeitos radioativos líquidos e gasosos produzidos durante os testes de irradiação.

Os componentes dos sistemas operacionais como válvulas, vasos, bombas, filtros, instrumentos e outros são montados em uma estrutura metálica única, denominada de unidade de sistemas, com objetivos de reduzir o espaço ocupado pelo circuito de irradiação no saguão do reator de pesquisas e facilitar as atividades de ajustes e manutenções executadas pelo operador. A identificação dos sistemas operacionais é feita pela respectiva função, ou seja: sistema de água pressurizada, sistema de água de resfriamento, sistema de pressurização gasosa, sistema de contrapressão gasosa da vareta e sistemas de rejeitos.

a) **Sistema de Água Pressurizada** — Este sistema é formado pela bomba de deslocamento positivo, pressurizador, filtros, amortecedor de pulsação, válvulas e instrumentos. Ele tem como função possibilitar a transferência radial do calor gerado na vareta combustível pelo processo de ebulição nucleada confinada para o sistema de água de resfriamento. Para esta função, a água pressurizada não precisaria escoar, ou seja, poderia ser mantida estática no vaso de pressão. Entretanto, uma pequena vazão de 1 g/s na água desmineralizada deste sistema será mantida com objetivos de sinalização de vazamento de produtos de fissão e para retirada dos produtos de corrosão formados na cápsula. A água desmineralizada pressurizada é circulada por uma bomba de deslocamento positivo através de tubos rígidos e flexíveis de aço inoxidável.

A água pressurizada de refrigeração da vareta em teste é mantida em contato direto e permanente com o interior de um vaso metálico denominado de pressurizador, instalado na unidade de sistemas. O pressurizador tem dois terços de seu volume preenchido com água. O restante é preenchido com gás hélio e mediante a admissão ou liberação desse gás em sua parte superior, controla a pressão na superfície externa do revestimento da vareta em teste. Este vaso tem ainda as funções de acomodação da expansão volumétrica da água pressurizada resultante da formação de bolhas de vapor por ebulição na cápsula e de controlar vazamentos no sistema de água pressurizada.

O sistema de água pressurizada dispõe de instrumentos para proteção da vareta combustível teste contra pressão alta e baixa, proteção contra nível baixo da água no pressurizador e sinalização de perda de estanqueidade do revestimento da vareta combustível. Nas tubulações de entrada e de saída da água pressurizada na cápsula de irradiação existem duas válvulas de esfera que garantem a proteção passiva do circuito contra a despressurização brusca no sistema de água pressurizada. Caso ocorra o rompimento de uma das tubulações deste sistema, estas válvulas de esfera fecharão de modo passivo imediatamente, isolando a cápsula e garantindo a manutenção de uma pressão mínima de segurança contra a formação de filme de vapor no revestimento da vareta combustível teste.

- b) Sistema de Água de Resfriamento** — Este sistema é formado de válvulas, bomba centrífuga, instrumentos e tubulações rígidas e flexíveis de aço inoxidável. Ele tem como função principal a remoção do calor produzido na vareta combustível através da circulação de água desmineralizada na parede externa do vaso de pressão.

O calor produzido por fissões nucleares na vareta combustível teste é transferido radialmente por circulação natural devido à ebulição nucleada para a parede interna do vaso de pressão. Em seguida, este calor é removido da superfície externa do vaso de pressão pela água de resfriamento circulada pela bomba centrífuga com uma vazão de 0,39 kg/s. A água do sistema de resfriamento é succionada da piscina do reator de pesquisas por meio de orifícios existentes no cabeçote de acoplamento da cápsula e após percorrer todo o sistema de resfriamento é retornada para a piscina do reator IEA-R1.

Medidas das temperaturas da água de resfriamento são realizadas à entrada e à saída da cápsula de irradiação e a vazão da água de resfriamento também é medida. A partir destas grandezas é calculada a variação da entalpia da água de resfriamento, o que possibilita a determinação do calor total gerado na vareta em teste. Dois termopares instalados na superfície externa do vaso de pressão e a medição de vazão da água de resfriamento asseguram a proteção do circuito de irradiação contra eventual falta de água de resfriamento na cápsula.

- c) Sistema de Pressurização Gasosa** — esse sistema fornece o gás pressurizado para o sistema de água pressurizada, para o sistema de contrapressão gasosa e para

descarregar os rejeitos líquidos e rejeitos gasosos do circuito nos respectivos tanques dos sistemas de rejeitos. O sistema de pressurização gasosa é constituído de tubulações metálicas rígidas, válvulas, cilindro de gás com pressão de 200 bar, cilindro de pré-pressurização com pressão máxima de 130 bar e instrumentos. O cilindro de gás pode ser substituído com o circuito de irradiação em operação.

- d) **Sistema de Contrapressão Gasosa** — a pressão interna da vareta combustível irradiada aumenta como resultado da liberação de gases de fissão, da variação dimensional do combustível e da alteração do perfil de temperaturas. A vareta combustível tem um transdutor de pressão para permitir ao sistema de contrapressão acompanhar a evolução da pressão interna da mesma. A evolução da pressão é medida de forma automática e contínua durante os períodos de irradiação. Esse sistema possui o limite operacional de 100 bar e é constituído de válvulas, transdutor de pressão e tubulações metálicas rígidas e flexíveis.
- e) **Sistema de Rejeitos Líquido e Gasoso** — o sistema de rejeitos gasosos é formado de tubulações metálicas rígidas, vasos de rejeitos, válvulas e instrumentos. Um dos vasos armazena os rejeitos gasosos gerados durante a operação do circuito em condições normais e o outro vaso será utilizado para armazenar os rejeitos gasosos provenientes de uma eventual ruptura da vareta combustível. O sistema de rejeito líquido é constituído de tubulações metálicas rígidas, vaso de rejeito líquido, válvulas e instrumentos. Ele se destina à coleta da água pressurizada, caso ocorra a perda da estanqueidade da vareta combustível.

2.3.2.3 Instrumentação de Controle e Proteção

O circuito de irradiação CAFE-Mod1 tem um sistema de instrumentação de controle e proteção responsável pelas funções de medição, monitoração e de intertravamento de controle e de segurança da cápsula e da vareta em teste. O sistema de controle e proteção é constituído pelo subsistema de controle, que comanda o circuito sob condições normais de operação e pelo subsistema de proteção, que é responsável pela segurança do circuito, evitando liberação de materiais radioativos para o ambiente do reator. É importante ressaltar que os dois subsistemas têm redundância e realizam medições de variáveis importantes para controle e proteção da vareta, do circuito de irradiação e do reator de pesquisas.

A instrumentação foi projetada para operação do circuito inteiramente automatizada, com a comunicação entre operador e o circuito de irradiação através de vídeo e teclado e somente com o subsistema de controle. Todas as variáveis operacionais importantes são controladas e os experimentos são interrompidos automaticamente através de intertravamentos de segurança, se for detectada a possibilidade de ocorrência de alguma das condições acidentais previstas para o circuito.

De modo a garantir a segurança operacional do circuito de irradiação CAFE-Mod1 instalado no reator de pesquisas IEA-R1 é fundamental a condução de uma análise de segurança preliminar durante o projeto do circuito. A análise de segurança estuda os possíveis mau funcionamentos do circuito como um todo, suas causas e as conseqüências dos mesmos para o circuito, para as instalações do reator e para os operadores. Este estudo serve como base para definição dos valores de atuação do sistema de monitoração e proteção, que dispara sinais de alarmes e contramedidas, ou seja, aciona equipamentos de segurança, quando os limites de segurança estipulados são ultrapassados.

A monitoração contínua da pressão interna e da temperatura da superfície externa do vaso de pressão, do nível da água no pressurizador e da vazão de água de resfriamento, constituem os canais de proteção para segurança do circuito de irradiação. Cada variável de segurança é monitorada por três canais idênticos de instrumentação e numa lógica 2 de 3 o subsistema de proteção do circuito de irradiação atua desligando o reator de pesquisas. Os valores de controle e proteção, base de definição da instrumentação, são estabelecidos a partir do projeto de engenharia, da análise de segurança e dos experimentos de validação do projeto e dos processos de fabricação do circuito de irradiação.

2.3.3 Descrição Funcional do Circuito de Irradiação

O circuito de irradiação CAFE-Mod1 está sendo projetado para operação automática; qualquer intervenção, se for necessária, será realizada através do subsistema de controle. Todas as variáveis físicas que são importantes para o teste da vareta combustível são medidas e registradas na memória do subsistema de controle. A cápsula de irradiação é instalada no núcleo do reator de pesquisas IEA-R1 e todos os

componentes que constituem os sistemas operacionais são montados e operados a partir de um painel metálico denominado de Unidade de Sistemas.

O reator de pesquisas funciona como uma fonte de nêutrons para o combustível a base de urânio da vareta combustível. Os átomos de urânio capturam nêutrons e sofrem reações nucleares de fissão, produzindo energia térmica e novos elementos químicos emissores de radiações, denominados de produtos de fissão. O calor gerado é transferido para o revestimento da vareta e removido por ebulição nucleada da água pressurizada sob convecção natural para a superfície interna do vaso de pressão da cápsula. Por condução térmica o calor alcança a superfície externa do vaso de pressão e é removido para fora da cápsula de irradiação pelo sistema de água de resfriamento do circuito de irradiação. Os parâmetros físicos de temperatura e pressão na superfície externa do revestimento da vareta, pressão no interior da vareta e a queima de combustível nuclear devido ao teste de irradiação, complementados pelos exames de pós-irradiados, possibilitarão uma avaliação rigorosa de um novo projeto de vareta combustível para liberação ou não de sua utilização nos reatores de potência.

2.4 O Processo de Validação do Projeto do Circuito de Irradiação

A importância dos processos de transferência de calor para reatores nucleares é melhor enfatizada pelo fato de que sua taxa de produção de energia térmica é limitada exclusivamente pelas condições térmicas e não pelas condições neutrônicas, ou seja, não há limite para o fluxo de nêutrons possível de ser atingido no núcleo de um reator nuclear, mas é fundamental, para a sua segurança, que todo o calor produzido seja removido pelo seu sistema de refrigeração. Por essa razão, o reator deve sempre ser operado em um nível de potência térmica tal que, utilizando a capacidade de seu sistema de refrigeração para remoção do calor gerado nas varetas combustíveis, as temperaturas em qualquer ponto de suas varetas combustíveis não excedam aos limites de segurança definidos em seu projeto [Tong e Weisman, 1996].

Esta característica da energia nuclear, complementada pela função de segurança das varetas combustíveis nucleares, justifica a grande importância atribuída ao processo de qualificação de novos projetos de varetas combustíveis utilizando circuitos de irradiação e realizados em reatores de pesquisas. A operação de um circuito de irradiação contendo a vareta combustível durante os testes de irradiação é classificada

como experimento nuclear e, como tal, o proprietário do reator de pesquisas deve comprovar teórica e experimentalmente a validação das hipóteses de projeto e dos processos de fabricação adotados para o circuito de irradiação. Os experimentos de validação do circuito de irradiação são realizados antes de sua liberação para realização de testes de irradiação no reator de pesquisas. Servem também para possibilitar a determinação de valores para variáveis operacionais que somente podem ser obtidos por meios experimentais. As principais etapas para validação do projeto e dos processos de fabricação de um circuito de irradiação são:

- realização de experimentos com o circuito de irradiação montado fora do reator de pesquisas, ou seja, antes de ser permitida sua instalação no núcleo de um reator de pesquisas para continuidade da validação das hipóteses adotadas em seu projeto. Os experimentos dessa etapa são denominados de “experimentos preliminares”, pois não há a presença de material combustível nuclear e eles servem para o levantamento dos parâmetros adotados durante a fase de projeto e para validação dos processos de fabricação dos componentes da cápsula de irradiação, a menos dos efeitos da radiação. Parte desta etapa constitui o objeto deste trabalho de tese.
- realização de experimentos com o circuito de irradiação instalado no núcleo do reator de pesquisas, porém sem a presença da vareta combustível a ser qualificada. Esta etapa já é denominada de “Experimento a Quente”, pois existe a presença da radiação do reator, porém é denominado de “Cápsula Nula” devido à ausência do combustível nuclear em teste.
- A última etapa de validação do projeto do circuito de irradiação é denominada de “Comissionamento a Quente”, pois a cápsula do circuito de irradiação é posicionada no núcleo do reator de pesquisas contendo a vareta combustível nuclear a ser qualificada, porém com a cápsula posicionada em uma região do núcleo de menor fluxo neutrônico do que o especificado para os testes de irradiação.

Após esta seqüência de experimentos, finalmente a cápsula de irradiação é transferida para sua posição final e o projeto e os processos de fabricação do circuito de irradiação estão validados. O circuito de irradiação deve funcionar satisfatoriamente imediatamente após a conclusão de todos os experimentos relacionados acima, pois

modificações e reparos em componentes danificados são praticamente impossíveis devido aos custos de utilização de células quentes para manutenção em componentes contaminados ou ativados [McAnemy, 1973].

A realização dos experimentos preliminares citados anteriormente exigiu a construção de uma réplica da cápsula de irradiação e de alguns sistemas operacionais, para que, funcionando nas condições operacionais térmicas e hidráulicas previstas para o circuito de irradiação CAFE-Mod1, sejam medidos os perfis de temperaturas a partir da imposição de outras grandezas como pressão, vazão e potência térmica. Nesta etapa, a cápsula é submetida às suas condições reais de operação, supondo que a vareta combustível nuclear tenha sido substituída por um simulador elétrico de mesmas características técnicas, a menos dos efeitos dos diversos tipos de radiação presentes em um reator nuclear.

2.5 Conclusão

A revisão bibliográfica discutida apresentou informações técnicas atuais sobre o circuito de irradiação CAFE-Mod1, destacando seus sistemas e componentes e suas especificações técnicas que serviram como referência para o desenvolvimento do dispositivo experimental e do simulador elétrico utilizados nos experimentos deste trabalho de tese. O capítulo seguinte descreve o simulador elétrico, o dispositivo experimental e os métodos utilizados na realização dos experimentos sobre ebulição nucleada para levantamento dos parâmetros térmicos de validação do projeto e dos processos de fabricação de componentes do CAFE-Mod1.

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia

A realização do programa experimental proposto neste trabalho foi viabilizada através das seguintes atividades:

- i. Desenvolvimento de conceito, projeto de engenharia, fabricação e montagem de uma cápsula simplificada do circuito de irradiação em escala real e de um simulador elétrico para a vareta combustível nuclear capaz de possibilitar seu funcionamento sobre a faixa de operação definida em suas especificações técnicas.
- ii. Adaptação de um circuito térmico existente no Laboratório de Termo-hidráulica do CDTN-CNEN para reproduzir as mesmas condições de funcionamento previstas para os sistemas operacionais do Circuito de Irradiação a Água Fervente CAFE-Mod1.
- iii. Concepção e montagem de um sistema de instrumentação para controle e aquisição das variáveis físicas medidas na cápsula simplificada durante a execução dos experimentos. O conjunto formado por estes sistemas, componentes e instrumentos descritos é denominado, neste trabalho, de dispositivo experimental.
- iv. Planejamento e execução de um amplo programa experimental para levantamento de perfis de temperaturas radiais e axiais do simulador elétrico e do vaso de pressão nas condições operacionais de potência térmica, pressão e vazão previstas para o Circuito de Irradiação CAFE-Mod1 durante os testes de qualificação de novos projetos de varetas combustíveis nucleares.
- v. Processamento e análise das variáveis físicas medidas experimentalmente para avaliação dos fenômenos físicos que ocorrem e sobre o comportamento térmico da cápsula simplificada.

A realização do programa experimental se inicia pelo estabelecimento das variáveis primárias a serem medidas e prossegue com o desenvolvimento da réplica simplificada da cápsula de irradiação, com a amostragem dos dados representativos das diversas faixas de operação previstas para o circuito de irradiação CAFE-Mod1, com a redução eficiente dos dados, com a análise de incertezas das medições e a avaliação dos

resultados obtidos e as conclusões decorrentes. Esta metodologia essencialmente experimental, possibilita o levantamento dos perfis de temperaturas na região de ebulição nucleada confinada sob diferentes valores de pressões e de potências e a determinação dos coeficientes de transferência de calor no interior da cápsula simplificada.

Para complementar a metodologia experimental adotada foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica na literatura especializada para identificar correlações de transferência de calor que se aplicam à geometria, aos materiais, às dimensões e às condições operacionais da cápsula do circuito de irradiação. Como foram encontradas correlações que se aplicam, com algumas restrições, aos mecanismos de transferência de calor da cápsula de irradiação, as mesmas foram adotadas na fase de realização dos experimentos com a cápsula simplificada, para fornecerem valores de referência, até que correlações definitivas sejam levantadas experimentalmente. Estas correlações com restrições obtidas, juntamente com o estudo sobre ebulição aplicado aos experimentos, são apresentadas no capítulo 4.

Dessa forma, a metodologia adotada para realização dos experimentos envolve uma combinação de trabalho analítico e experimental. São utilizados conhecimentos teóricos dos princípios de engenharia necessários para projetar os experimentos e para especificar as variáveis físicas a serem investigadas e o papel que elas desempenham no trabalho analítico de interpretação dos resultados experimentais. Este conhecimento possibilita uma contínua comparação das medições obtidas durante os experimentos com as estimativas teóricas realizadas previamente.

Um conjunto de transdutores e transmissores é instalado na cápsula simplificada e nos sistemas operacionais para monitoração das variáveis físicas especificadas, com frequência de varredura e incerteza das medições apropriadas para levantamento dos resultados desejados. Os sinais destes transdutores e transmissores são enviados a um conjunto de placas eletrônicas de aquisição de dados instaladas em um microcomputador e processados por um software de interface gráfica de suporte ao operador do dispositivo experimental. Este conjunto de instrumentos permite acompanhamento em tempo real e arquivamento das medições para análise posterior.

Os resultados dos experimentos realizados é um conjunto de medições de variáveis físicas predeterminadas e que possibilitaram, a partir do processamento e da análise dos mesmos, o conhecimento de outras variáveis físicas e as conclusões com as quais se pretende resolver o problema que gerou a necessidade de tais experimentos.

3.2 Dispositivo Experimental e Simulador Elétrico

A realização dos experimentos sobre ebulição apresentados neste trabalho exigiu o desenvolvimento, a fabricação e a montagem de um dispositivo experimental similar ao circuito de irradiação a água fervente e de um simulador elétrico para varetas combustíveis nucleares utilizadas em reatores nucleares a água pressurizada. No dispositivo experimental, montado no CDTN-CNEN, a cápsula de irradiação foi denominada de cápsula simplificada e ela constitui a seção de testes onde foram realizados os experimentos de ebulição confinada propostos. Na Figura 3.1 está representado, esquematicamente, o princípio de funcionamento térmico da cápsula do circuito de irradiação CAFE-Mod1, que é idêntico ao funcionamento da cápsula simplificada do dispositivo experimental.

O esquema mostra os três tubos metálicos concêntricos que formam a cápsula simplificada e que envolvem o tubo de revestimento do simulador elétrico de varetas combustíveis nucleares. A água pressurizada é colocada na região dos discos guias horizontais, contida pelo tubo metálico mais interno denominado de vaso de pressão e não circula externamente à cápsula simplificada. No canal tubular formado fora do vaso de pressão circula a água de resfriamento que é responsável pela remoção, para fora da cápsula, do calor produzido por efeito Joule pelo simulador elétrico. Este calor é dissipado na superfície externa do seu revestimento metálico. A partir de certo valor da potência térmica liberada pelo simulador elétrico, o aquecimento de seu revestimento provoca a produção de bolhas de vapor por ebulição na água pressurizada da cápsula simplificada e os discos metálicos horizontais guiam estas bolhas de vapor em direção à superfície interna do vaso de pressão onde elas colapsam. Esta energia térmica liberada pela condensação das bolhas de vapor é conduzida através da parede do vaso de pressão para a água de resfriamento e então removida para fora da cápsula simplificada.

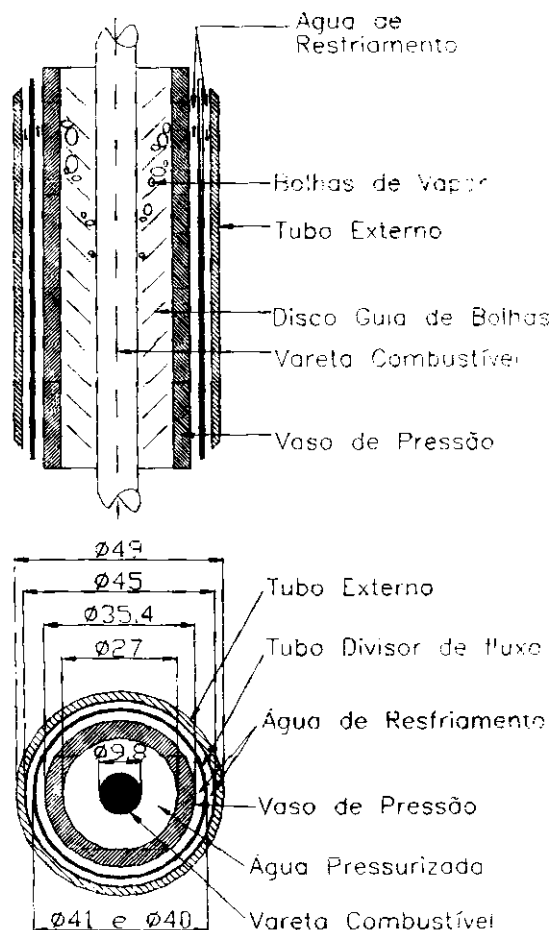


Figura 3.1 Mecanismo de Refrigeração da Cápsula Simplificada

3.3 Simulador Elétrico da Vareta Combustível Nuclear

Uma das características mais importantes do combustível nuclear é a produção de elevadas densidades de potências geradas a partir de reduzidos volumes do combustível. A realização dos experimentos preliminares propostos neste trabalho de tese foi condicionada ao desenvolvimento e à construção de um simulador elétrico para substituição da vareta combustivel nuclear na produção de energia térmica. Estes simuladores são alimentados por corrente elétrica e, através do aquecimento por efeito Joule, devem reproduzir o comportamento térmico e mecânico do revestimento da vareta combustivel nuclear. Os simuladores elétricos instrumentados são utilizados com frequência em experimentos referentes a conceitos variados de reatores e de outros sistemas térmicos e a sua fabricação apresenta problemas técnicos e de materiais de

difícil solução, o que torna importante seu desenvolvimento tecnológico [Chyu e Bergles, 1988].

Vários conceitos de simuladores elétricos foram pesquisados e os fatores que determinaram a escolha do conceito desenvolvido para os experimentos foram:

- simulação da geometria, dimensões e materiais do revestimento da vareta combustível nuclear especificada para os testes de irradiação;
- utilização de isolante elétrico cerâmico para simular o comportamento térmico do material combustível nuclear utilizado nas varetas combustíveis;
- produção de potência térmica linear da ordem de 800 W/cm, suportando temperaturas internas da ordem de 900 °C;
- acabamento externo do revestimento metálico sem irregularidades devido ao processo de fabricação ou de instalação dos termopares, o que poderia modificar o comportamento do regime de ebulição nucleada;
- alimentação elétrica em corrente contínua pelas suas duas extremidades, conforme justificado no item 3.3.4.

3.3.1 O Conceito do Simulador Elétrico Desenvolvido

Foram estudados dois conceitos para simuladores, aquecimento direto e indireto. No primeiro conceito, a própria parede do tubo de revestimento do simulador é utilizada como resistência elétrica para produção de calor por efeito Joule. Nos simuladores aquecidos indiretamente, utiliza-se um elemento resistor central, isolado do revestimento externo, que produz o calor por efeito Joule. Este segundo tipo foi escolhido por simular com maior eficiência o calor armazenado internamente na vareta combustível nuclear.

O simulador é, de dentro para fora, constituído de um núcleo central de material cerâmico, elemento resistivo tubular, núcleo de isolante elétrico e tubo metálico de revestimento. Quatro termopares tipo k com bainha de aço inoxidável e diâmetro de 0,5 mm são posicionados internamente ao revestimento e fixados à parede deste por brasagem.

Na fabricação do simulador elétrico foi empregada a liga de Inconel-600 para o tubo do elemento resistivo, encapsulado em um tubo de aço inoxidável AISI-304 e dele

isolado por nitreto de boro (BN) compactado. As extremidades do elemento resistivo foram prolongadas com terminais de cobre para permitir a sua energização.

Em relação aos processos de fabricação, inicialmente o pó de nitreto de boro é pesado e compactado por vibração até atingir certa densidade. A seguir o tubo de revestimento sofre um forjamento rotativo a frio para redução de seu diâmetro externo, o que determina uma compactação adicional do nitreto de boro de isolamento elétrico a 96% de sua densidade teórica. Os termopares de 0,5 mm, para medições das temperaturas do simulador elétrico, são fixados no tubo de revestimento por brasagem em orifícios de 0,7 mm de diâmetro, a uma profundidade de 0,5 mm.

Na Figura 3.2 está representado, esquematicamente, os materiais e as dimensões (em mm) do simulador elétrico de aquecimento indireto utilizado nos experimentos.

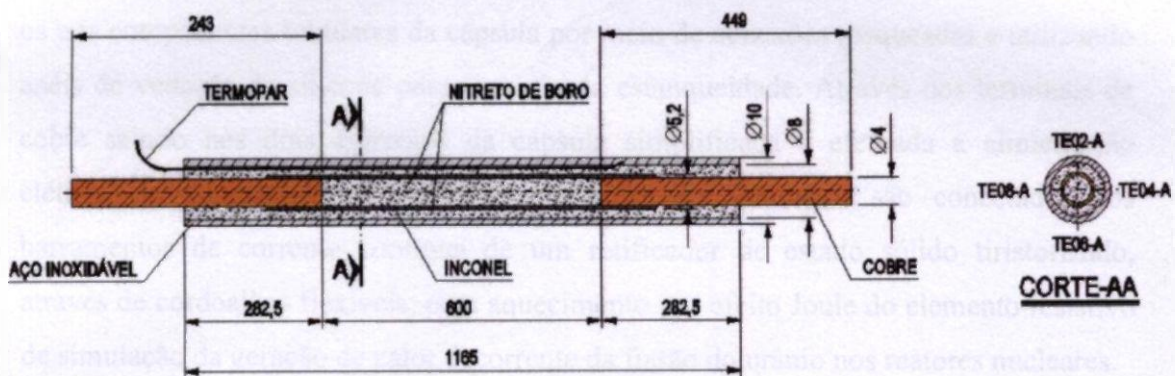


Figura 3.2 Arranjo do Simulador Elétrico por Aquecimento Indireto

As principais especificações do simulador elétrico utilizado nos experimentos são:

- comprimento aquecido 600 mm
- diâmetro externo do revestimento 10 mm
- distribuição de potência linear
- potência térmica máxima 48 kW
- potência linear 800 W/cm

- fluxo de calor médio 255 W/cm^2
- resistência elétrica $0,076 \Omega$

O item 3.4.5. detalha a localização dos termopares na parede do revestimento do simulador elétrico, sendo que as posições representadas coincidem em cotas e ângulos com os termopares instalados na parede do vaso de pressão da cápsula simplificada.

Concluída a fabricação do simulador elétrico, diversos ensaios de controle de qualidade são necessários para confirmar as características de projeto conforme descrição do item 3.3.3. Radiografias mostrando o posicionamento das juntas de medições nas bainhas dos termopares (ver anexo III) e o posicionamento das bainhas na parede de revestimento do simulador foram realizadas para confirmação do processo de fabricação.

No interior da cápsula simplificada, o simulador elétrico tem todo seu comprimento aquecido envolvido pelo estabilizador de bolhas de vapor e ele atravessa os três componentes tubulares da cápsula por meio de conexões rosqueadas e utilizando anéis de vedação de silicone para garantia da estanqueidade. Através dos terminais de cobre saindo nos dois extremos da cápsula simplificada é efetuada a alimentação elétrica do simulador. Os terminais de cobre do simulador são conectados aos barramentos de corrente contínua de um retificador de estado sólido tiristorizado, através de cordoalhas flexíveis, para aquecimento por efeito Joule do elemento resistivo de simulação da geração de calor decorrente da fissão do urânio nos reatores nucleares.

3.3.2 Cálculos para o Simulador Elétrico

Desprezando os efeitos das extremidades, foi considerado que toda a potência térmica produzida pelo simulador elétrico é transferida no sentido radial para a água pressurizada de refrigeração da cápsula simplificada. A determinação teórica das características da alimentação elétrica e do perfil radial de temperatura do simulador elétrico foi importante no seu desenvolvimento.

3.3.2.1 Características Elétricas do Simulador

O revestimento do simulador elétrico é de aço inoxidável, típico material de fabricação do revestimento da vareta combustível nuclear, que fica posicionada na região de refrigeração com formação de bolhas de vapor, de um circuito de irradiação.

O elemento resistivo do simulador foi fabricado em Inconel-600, material que apresenta uma resistividade elétrica praticamente constante com a variação de temperatura, o que pode facilitar a regulagem da potência térmica gerada por efeito Joule.

O elemento resistivo tem comprimento aquecido de 600 mm e diâmetros interno e externo de 4 mm e 5,2 mm, respectivamente. Este componente do simulador deve suportar uma potência de 80% da carga térmica limite prevista para a cápsula simplificada, o que representa aproximadamente 48 kW. O Inconel-600 apresenta, a 25°C, uma resistividade elétrica aproximada de $1,03 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ [Fink e Beatt, 1978]. Para as características acima, o simulador deve possuir uma resistência elétrica de:

$$R = \rho \cdot L / A \quad [3.1]$$

onde R é a resistência elétrica do simulador a 25°C [Ω], ρ é a resistividade elétrica do elemento resistivo [Ωm], L é o comprimento ativo do elemento resistivo [m] e A é a seção transversal do elemento resistivo [m^2].

O resultado do cálculo $R = 71,3 \text{ m}\Omega$ foi comparado com medições efetuadas com um multímetro marca Agilent, modelo 34401A, utilizando o método dos quatro fios, tendo sido encontrado $R = 76 \text{ m}\Omega$. Supondo que a resistência elétrica do simulador não tenha variação com a temperatura, tem-se:

$$V_{MAX} = (P_{MAX} R)^{1/2} \quad [3.2]$$

onde P_{MAX} é a potência máxima prevista para os experimentos [W] e V_{MAX} é a tensão máxima de operação do simulador [V].

O resultado do cálculo $V_{MAX} = 58,5 \text{ V}$ mostra que o simulador elétrico deve atingir a uma corrente elétrica efetiva equivalente a $I_{MAX} = 820 \text{ A}$. Estes cálculos demonstram que as condições operacionais elétricas determinadas para o simulador são atendidas pelo retificador de estado sólido existente no CDTN-CNEN.

3.3.2.2 Cálculo das Temperaturas nos Componentes do Simulador

O simulador elétrico é constituído por dois tubos metálicos coaxiais, tendo os espaços entre os tubos e interior ao tubo central preenchidos com isolamento elétrico de nitreto de boro. Como a fonte de calor está no tubo interno de Inconel-600, pode-se

afirmar que, sob condições de regime permanente, a taxa de geração de calor no interior do simulador é igual à taxa de transferência de calor da superfície externa do revestimento para a água pressurizada, não sendo considerado fluxo de calor no sentido do eixo dos tubos. Por essa razão, a temperatura na camada interna de nitreto de boro é constante e igual à temperatura na parede interna do tubo de Inconel-600 do elemento resistivo, idealizando que o simulador elétrico seja formado por três camadas diferentes, cujas superfícies das interfaces estão nas mesmas temperaturas, resultado do perfeito contato entre elas. Com estas considerações e, supondo condições operacionais estacionárias, a quantidade de calor que passa através das três camadas é a mesma. A Figura 3.3 é um esquema para o cálculo térmico de determinação das temperaturas para cada componente do simulador.

Supondo que a temperatura da parede interna do tubo de Inconel-600 seja T_1 , esta será a temperatura máxima do simulador elétrico correspondente ao raio interno $r_i = 4$ mm. Sendo conhecidas as dimensões e as condutividades térmicas para cada camada, considerando condições de regime permanente e transferência de calor unidimensional na direção radial, e utilizando a analogia com circuitos elétricos da Figura 3.3, tem-se:

$$q = 2\pi k_i L (T_i - T_e) / \ln(r_e / r_i) \quad [3.3]$$

onde q é a taxa de transferência de calor [W], k_i é a condutividade térmica da camada i [W/ms], T_i é a temperatura interna [°C], T_e é a temperatura externa [°C], L é o comprimento aquecido [m], r_e é o raio externo [m] e r_i é o raio interno [m].

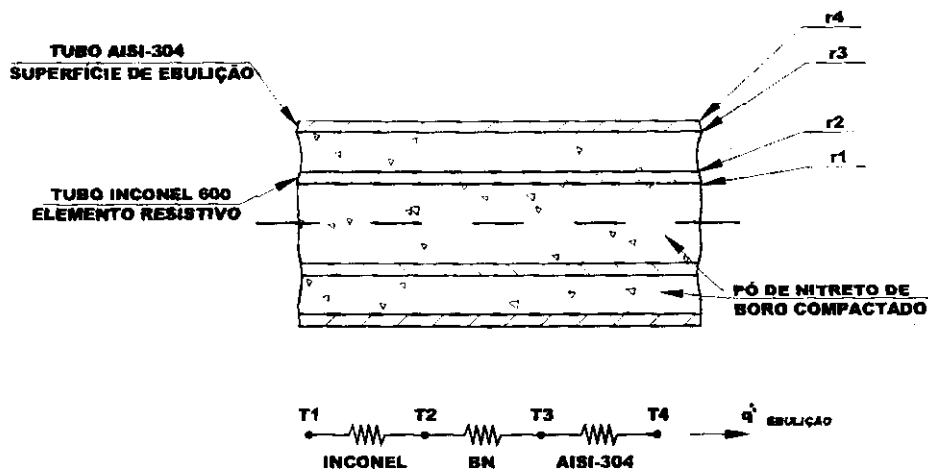


Figura 3.3 Esquema do Simulador Elétrico para Transferência de Calor

Os parâmetros do simulador elétrico para determinação de suas temperaturas T_1 , T_2 , T_3 e T_4 indicadas na Figura 3.3 são:

r_1	raio interno do tubo resistivo de Inconel-600	2 mm
r_2	raio externo do tubo resistivo	2,6 mm
r_3	raio interno do tubo de revestimento de aço inoxidável	4 mm
r_4	raio externo do tubo de revestimento de aço inoxidável	5 mm
L	comprimento aquecido do simulador	600 mm
p	pressão máxima prevista para os experimentos	110 bar
T_{SAT}	temperatura de saturação para 110bar	318,08°C
k_{AI}	condutividade térmica do aço inoxidável AISI-304	20,34 W/m.K
k_{BN}	condutividade térmica do nitreto de boro	21,5 W/m.K
k_{IN}	condutividade térmica do Inconel-600	19,19 W/m.K
P	potência máxima prevista para os experimentos	48 kW

Os valores das condutividades térmicas do aço inoxidável AISI-304 e do Inconel-600 foram obtidos da referência [ASME, 1992] e do nitreto de boro da referência [Catálogo Goodfellow, 1996/97]. O superaquecimento da parede externa do simulador foi obtido com a equação 4.4, conforme indicado a seguir:

$$T_4 = T_{SAT} + 25(q')^{0,25} \exp(-p/62) \quad T_4 = 322,84 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Utilizando-se T_4 e a equação 3.3, tem-se:

$$T_3 = 469,61\text{ }^\circ\text{C} \quad T_2 = 715,72\text{ }^\circ\text{C} \quad T_1 = 878,67\text{ }^\circ\text{C}.$$

Este cálculo demonstra que as temperaturas esperadas para os componentes do simulador elétrico, durante os experimentos, são inferiores aos valores de comprometimento da integridade dos mesmos por aquecimento [ASME, 1992].

3.3.3 Avaliação Preliminar do Simulador Elétrico

Concluída a fabricação do simulador elétrico, diversos testes são necessários para confirmar suas especificações de projeto e seu desempenho. Os testes com o simulador elétrico constam de medições para verificação das bases de projeto e de tensão aplicada ao simulador montado em uma cuba metálica para avaliação de desempenho. As seguintes atividades constam dos testes preliminares:

- verificação dimensional (diâmetros e comprimentos do revestimento e dos terminais de cobre, posicionamento físico dos termopares);
- medições elétricas (resistência elétrica do simulador na temperatura ambiente, isolamento elétrico entre o elemento resistivo e o revestimento do simulador, isolamento elétrico interno dos termopares);
- teste de voltagem elétrica aplicada ao simulador na condição de ebulição de vaso aberto (comprimento aquecido, uniformidade da formação de bolhas, temperaturas indicadas pelos termopares sob ebulição de vaso e fluxo de calor conhecido).

3.3.4 Alimentação Elétrica e Controle de Potência

A execução de experimentos termo-hidráulicos com as varetas combustíveis nucleares substituídas por simuladores elétricos é uma atividade constante e de grande importância para um centro de pesquisas na área nuclear. O domínio da tecnologia de desenvolvimento de dispositivos experimentais e de simuladores elétricos deve obrigatoriamente ser complementado pela disponibilidade de um sistema de retificação de corrente elétrica para utilização como fonte de potência.

A escolha da alimentação elétrica de um simulador de varetas combustíveis entre tensão alternada ou tensão contínua normalmente recai na utilização da segunda modalidade. face às dificuldades técnicas possíveis de ocorrerem com a utilização de tensão alternada. A utilização da tensão contínua reduz os esforços de vibrações nos componentes dos dispositivos experimentais e reduz também as induções eletromagnéticas na instrumentação localizada no campo, devendo, entretanto, tal escolha ser confrontada com o custo extra de um retificador tiristorizado para controle da potência fornecida ao simulador elétrico.

Os valores da potência elétrica fornecida ao simulador são normalmente elevados e exigem outra escolha importante entre o fornecimento de tensão ou corrente elevadas. A opção mais apropriada é a utilização de fontes de corrente contínua elevadas e de baixa tensão, minimizando os riscos de choque elétrico e a necessidade de materiais de isolamento para tensões mais elevadas.

Os experimentos realizados para este trabalho de tese utilizaram um retificador existente no CDTN-CNEN e alimentado por um transformador trifásico com tensão primária de 13,8 kV e tensão secundária contendo *taps* de 64,5 e 100 Vac. Trata-se de um retificador tiristorizado na configuração ponte de Graetz, com capacidade elétrica de 1 MW, tensão de saída até 100 Vcc e corrente na carga de até 10000 Acc. A potência elétrica fornecida pelo retificador é controlada pelo ângulo de disparo de seus tiristores de 0 a 100% da potência nominal através de potenciômetros de 10 voltas localizados na parte frontal do equipamento. O retificador é interligado com o simulador elétrico através de um sistema de barramento de cobre 4"x1/4" montado em isoladores suportes. A medição da corrente de saída do retificador foi realizada com dois resistores *Shunt* de precisão conforme a faixa da corrente elétrica necessária para o experimento, 600 A / 60m V ou 2000 A / 300 mV.

O retificador é um equipamento que converte tensão alternada em tensão contínua, sempre alimentando a carga com uma componente de tensão contínua sobreposta por uma componente de tensão variável. A relação entre estas componentes é denominada de fator de ripple do retificador. Dessa forma, o simulador elétrico recebe uma componente contínua sobreposta por uma componente variável de tensão, devendo a determinação da potência elétrica total aplicada durante os experimentos ser a soma geométrica dessas duas componentes. A potência elétrica aplicada ao simulador é um

parâmetro de grande importância nos resultados experimentais. Para medições de tensão e corrente no simulador somente medidores de valor médio quadrático efetivo ou true-rms podem realizar medições confiáveis, ou seja, medições de valores efetivos de tensão e de corrente para determinação da potência elétrica aplicada aos experimentos. Estes parâmetros foram medidos com multímetros eletrônicos Fluke 189 interligados a um microcomputador por interface serial RS-232, sendo os dados adquiridos automaticamente pelo software Flukeviewform.

A Figura 3.4 representa um diagrama unifilar do sistema de alimentação elétrica do simulador.

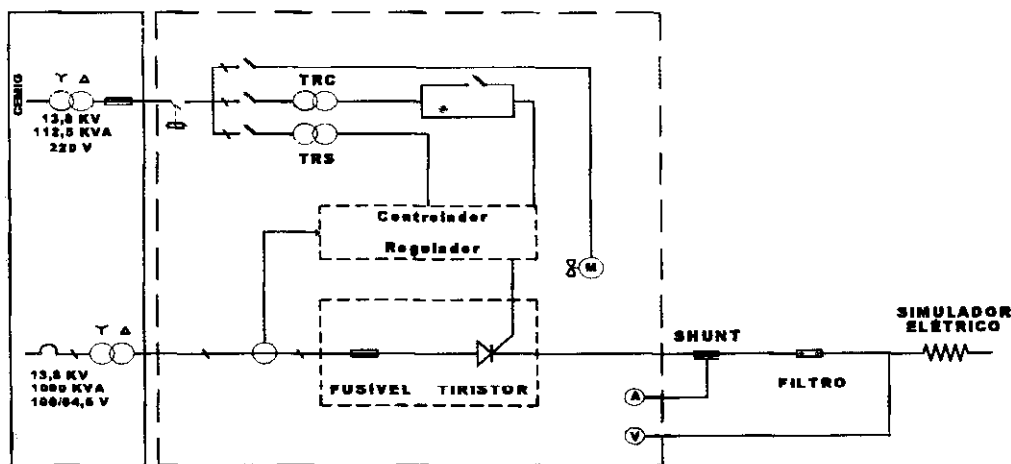


Figura 3.4 Diagrama Unifilar da Alimentação Elétrica do Simulador

Nos experimentos com potência elétrica inferior a 10 kW o retificador descrito anteriormente apresentou um valor de ripple muito elevado, o que certamente poderia comprometer as medidas de tensão e corrente elétrica true-rms. Por essa razão os experimentos na faixa de 1,5 kW a 10 kW foram realizados com o simulador elétrico alimentado por um retificador com potência nominal de 16 kW, o que possibilitou maior credibilidade nos valores de tensão e corrente medidos.

3.4 Apresentação do Dispositivo Experimental

O dispositivo experimental foi montado no Laboratório de Termo-hidráulica do CDTN-CNEN para simular o Circuito de Irradiação CAFE-Mod1 e possibilitar a realização dos experimentos sobre ebulição confinada para este trabalho de tese. Os

componentes do dispositivo experimental têm dimensões, formas geométricas e materiais especificados para a cápsula de irradiação e permitiram simular as condições operacionais térmicas e hidráulicas previstas para o circuito de irradiação.

A seção de testes do dispositivo experimental foi denominada de cápsula simplificada e representa, em escala real, a cápsula do circuito de irradiação modificada para receber o simulador elétrico alimentado pelas suas duas extremidades. O dispositivo experimental simula os sistemas de água pressurizada, água de resfriamento e de pressurização gasosa do circuito de irradiação e possui um sistema de instrumentação e aquisição de dados compatível com as necessidades dos experimentos propostos.

Os experimentos realizados utilizaram um simulador elétrico para aquecimento da seção de testes no lugar da vareta combustível nuclear. Estes experimentos possibilitaram o levantamento de parâmetros térmicos e hidráulicos da cápsula de irradiação, só possíveis de serem obtidos por via experimental e necessários para validação do projeto do circuito de irradiação a água fervente em desenvolvimento.

O projeto e a construção do dispositivo experimental foram iniciados com a definição dos objetivos dos experimentos preliminares e a transformação dos mesmos em especificações técnicas para desenvolvimento do dispositivo experimental. A substituição da vareta combustível nuclear pelo simulador elétrico determinou as principais modificações realizadas no projeto da cápsula simplificada, resguardadas a capacidade do dispositivo experimental em simular o Circuito de Irradiação CAFE-Mod1 e a necessidade de atingir os objetivos dos experimentos propostos.

Este item descreve a cápsula simplificada, os sistemas operacionais e a instrumentação do dispositivo experimental, destacando as principais modificações incorporadas ao projeto do dispositivo experimental em relação ao projeto do circuito de irradiação CAFE-Mod1. Na Figura 3.5 é mostrado o arranjo dos componentes do dispositivo experimental montado para realização dos experimentos sobre ebulição e servirá de referência para as descrições deste capítulo.

3.4.1 Critérios e Limites de Projeto

Os critérios e limites de projeto definidos para o dispositivo experimental foram os mesmos relacionados no item 2.3.1 para o Circuito de Irradiação CAFE-Mod1 e o dimensionamento mecânico de todos os componentes fabricados para o dispositivo experimental foi realizado conforme Código ASME. A cápsula simplificada do dispositivo experimental simula a cápsula do CAFE-Mod1 e foi submetida às mesmas condições operacionais previstas para os testes de qualificação de varetas combustíveis nucleares, a menos dos efeitos das radiações existentes no núcleo do reator de pesquisas, que não foram reproduzidos durante os experimentos realizados. As principais modificações incorporadas ao projeto do dispositivo experimental foram:

- i. redução dos comprimentos do tubo divisor de fluxo e do tubo externo, pois na cápsula simplificada não há necessidade de blindagem contra radiações;
- ii. alimentação elétrica do simulador efetuada pelas duas extremidades da cápsula simplificada, enquanto que no circuito de irradiação a vareta combustível é totalmente contida no interior do vaso de pressão;
- iii. eliminação da bomba de deslocamento positivo do sistema de água pressurizada, pois, no regime de transferência de calor por ebulição nucleada, o fluido de trabalho não necessita de circulação forçada.

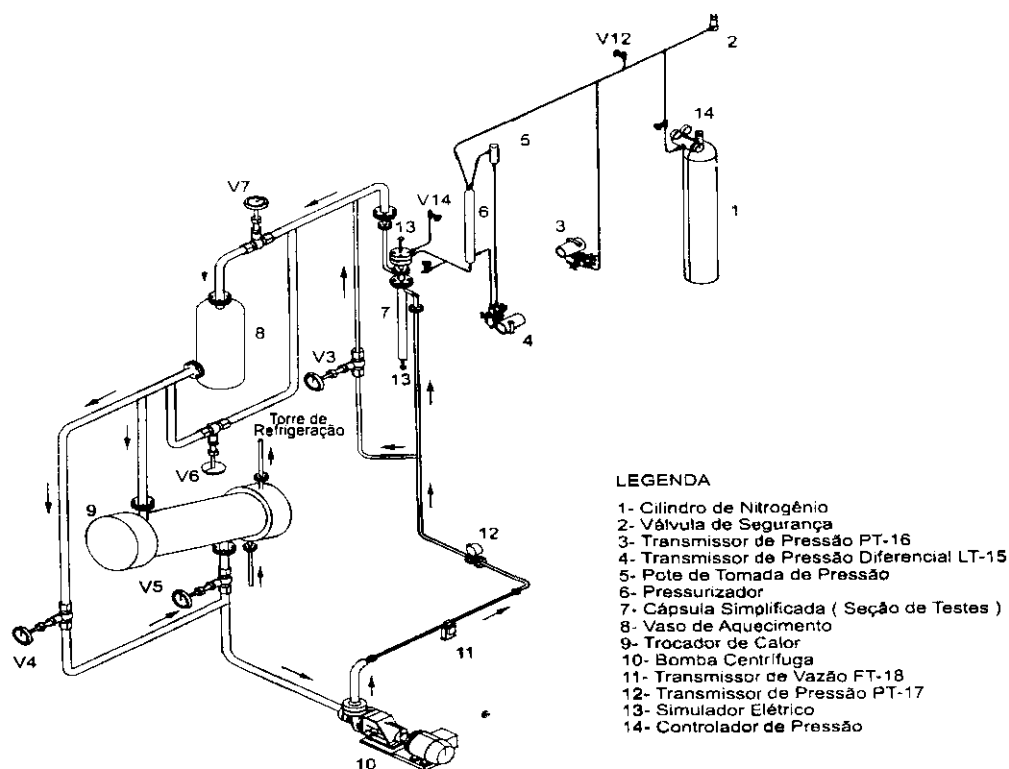


Figura 3.5 Arranjo dos Componentes do Dispositivo

3.4.2 Cápsula Simplificada

O dispositivo experimental deve simular, com a máxima precisão, o circuito de irradiação de modo que os resultados dos experimentos preliminares possam ser incorporados imediatamente aos componentes do circuito de irradiação. Com esta finalidade, a cápsula simplificada do dispositivo experimental representa a cápsula de irradiação no que diz respeito às dimensões, formas geométricas, materiais e arranjos do estabilizador de bolhas de vapor e do simulador elétrico para que, ao ser submetida às condições operacionais térmicas e hidráulicas previstas para os testes de irradiação, possibilite o levantamento dos dados desejados e com confiabilidade.

A alteração mais significativa incorporada ao projeto da cápsula simplificada em relação ao conceito do circuito de irradiação foi em suas extremidades, que no circuito de irradiação são totalmente fechadas por tampos metálicos no vaso de pressão e no tubo externo. Na seção de testes do dispositivo experimental aqueles componentes são vazados em ambos os extremos para passagem do simulador elétrico. Anéis de vedação foram utilizados para manutenção da estanqueidade da cápsula simplificada.

A cápsula simplificada é constituída basicamente por três componentes tubulares montados de forma concêntrica e denominados, de dentro para fora, respectivamente, vaso de pressão, tubo divisor de fluxo e tubo externo. Os três componentes da cápsula simplificada são interligados entre si e aos sistemas operacionais do dispositivo experimental através de conexões flangeadas e anilhadas. A cápsula simplificada foi montada em posição vertical suportada por perfis metálicos.

O vaso de pressão é encamisado pelo tubo divisor de fluxo e este é envolvido pelo tubo externo. É no interior do vaso de pressão que se realiza a refrigeração primária do simulador elétrico no regime de ebulição nucleada sub-resfriada, utilizando água estática pressurizada até 110 bar. Nos dois canais tubulares formados pelos três componentes da cápsula simplificada ocorre a refrigeração secundária no regime de convecção forçada, utilizando água a baixa pressão.

A Figura 3.6 mostra o desenho de conjunto da cápsula simplificada e a Figura 3.7 é uma foto dos componentes da cápsula simplificada na seqüência de montagem dos mesmos de fora para dentro, ou seja, tubo externo, tubo divisor de fluxo, vaso de pressão, estabilizador de bolhas e simulador elétrico. Os componentes da cápsula simplificada foram fabricados em aço inoxidável AISI-304, a menos do vaso de pressão que possui sua parte inferior em liga de alumínio.

O vaso de pressão é um componente tubular que possui sua parte inferior fabricada com liga de alumínio AlMg3 e sua parte superior, inclusive flanges, fabricada com aço inoxidável AISI-304. Entre os dois materiais diferentes é intercalado um anel, cuja parte superior é em aço inoxidável AISI-304 e a parte inferior é em AlMg3, existindo uma interface denominada de junta dissimilar de transição, na qual o anel de alumínio e o anel de aço inoxidável são unidos por difusão entre os dois materiais. A parte superior em aço inoxidável é necessária para receber as tubulações deste mesmo material utilizadas pelo sistema de água pressurizada.

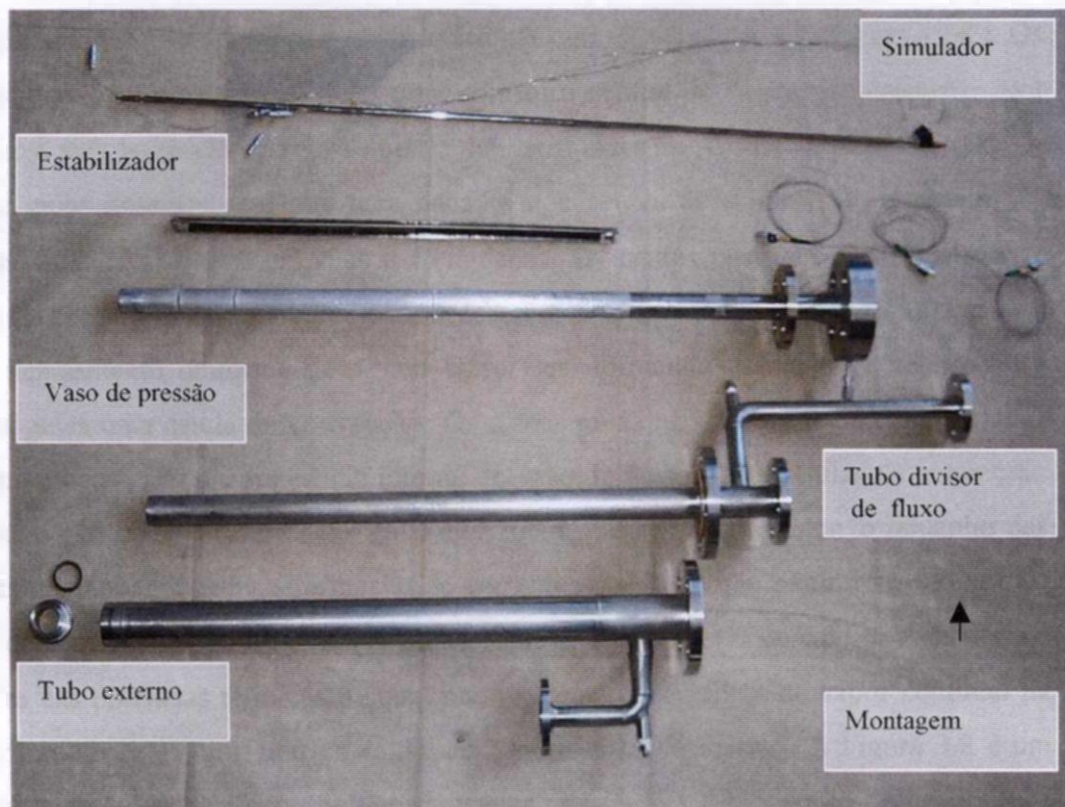


Figura 3.7 Foto dos Componentes da Cápsula Simplificada

O vaso de pressão tem diâmetro externo de 35,4 mm, espessura de parede de 4,2 mm e comprimento total de 1092 mm, sendo 670 mm na liga AlMg₃. No interior do vaso de pressão e concêntricos com o mesmo, foram montados o simulador elétrico e o estabilizador de bolhas de vapor que ocupa o espaço entre a parede externa do simulador e a parede interna do vaso de pressão. O simulador elétrico tem comprimento aquecido de 600 mm e diâmetro externo de 10 mm, e o restante do volume interno do vaso de pressão, região onde fica o estabilizador de bolhas de vapor, é preenchido com água desmineralizada pressurizada. A pressão desta água é ajustada para o valor definido para cada experimento por meio de um vaso de aço inoxidável denominado pressurizador, que é pressurizado com gás nitrogênio recebido de um cilindro de alta pressão. Os experimentos preliminares serviram também para validação da união por difusão entre a liga de alumínio e o aço inoxidável, quando submetida às temperaturas e pressões previstas para o circuito de irradiação.

O estabilizador de bolhas é um conjunto mecânico construído em aço inoxidável e composto por 153 discos guias, três réguas verticais em forma de pente e duas guias

de extremidades, uma superior e outra inferior [Costa, Esteves, Dias e Mattos, 1998]. Os discos guias têm espessura de 0,25 mm, com furo central de 11 mm de diâmetro para receber o simulador elétrico e 26 mm de diâmetro externo. A cada ângulo de 120°, os discos guias possuem ranhuras para encaixe nos pentes de suportaço, além de três dobras de 30° para cima em suas extremidades. Os pentes possuem encaixes para as guias de extremidades e ranhuras para receberem os discos guias de modo a mantê-los com espaçamento uniforme de 4 mm entre eles, formando assim entre cada par de discos guias uma célula de convecção. Os discos guias não devem tocar no simulador elétrico e nem tocar na superfície interna do vaso de pressão. As células de convecção formadas por cada par de discos guias horizontais servem para limitar o tamanho das bolhas de vapor, impedir a formação de correntes de convecção natural no interior do vaso de pressão, assegurar condições uniformes de transferência de calor e aumentar os valores das potências térmicas na qual ocorre formação do filme de vapor contínuo na superfície do simulador elétrico causando a destruição do mesmo. A Figura 3.8 é um desenho de detalhamento do estabilizador de bolhas de vapor utilizado nos experimentos sobre ebulição.

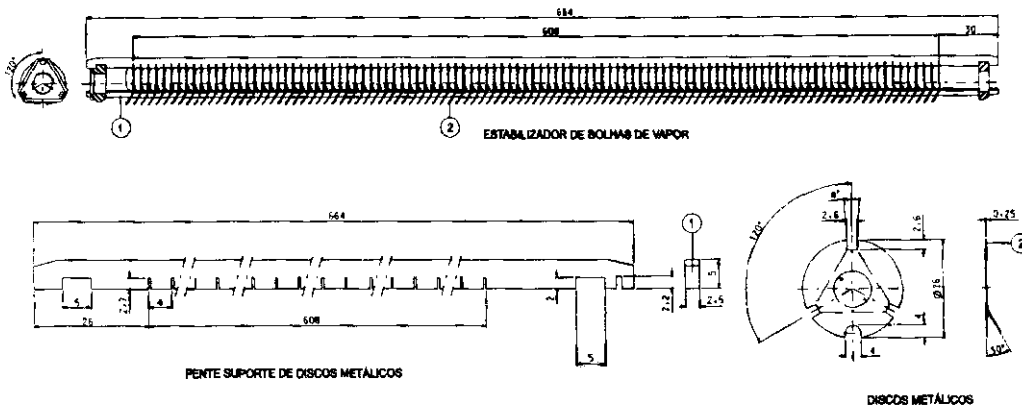


Figura 3.8 Estabilizador de Bolhas de Vapor da Cápsula Simplificada

O simulador elétrico é refrigerado com água pressurizada estática no regime de ebulição nucleada sub-resfriada e a presença do estabilizador de bolhas torna possível controlar com segurança potências de até 800 W/cm. A melhoria do processo de

transferência de calor com mudança de fase no interior do vaso de pressão é atribuída a dois fatores simultâneos:

- i. o fluido de trabalho recebe calor devido à mudança de fase:
- ii. a sucção exercida pelas bolhas de vapor ao condensarem favorece a formação de novas bolhas de vapor, fenômeno este acentuado por tratar-se de ebulição confinada.

A Tabela 3.1 apresenta os materiais, as dimensões e as condições de projeto dos principais componentes da cápsula simplificada e dos sistemas operacionais. O vaso de pressão foi projetado para pressão de 133 bar e temperatura de superfície interna de 122 °C, por ser esta a temperatura que inicia o processo de instabilidade metalúrgica para a têmpera da liga de alumínio (AlMg₃) sob radiação [Costa, Esteves e Dias, 1996].

Tabela 3.1 Dimensões e Materiais dos Componentes do Dispositivo Experimental

<i>COMPONENTE</i>	<i>MATERIAL</i>	<i>DIÂMETROS externo/interno (mm)</i>	<i>TEMPERATURA DE PROJETO (°C)</i>	<i>PRESSÃO DE PROJETO (bar)</i>
Revestimento do simulador	Aço inoxidável	10 / 8	500	133
Vaso de pressão	Aço inoxidável e Liga alumínio	35,4 / 27	122	133
Tubo divisor fluxo	Aço inoxidável	42,2 / 38,9	122	10
Tubo externo	Aço inoxidável	60,3 / 57	50	10
Discos guias	Aço inoxidável	26 / 11	122	133
Pressurizador	Aço inoxidável	60,3 / 49,22	50	133
Pote de tomada de pressão	Aço inoxidável	60,3 / 49,22	50	133
Tubulação do circuito primário	Aço inoxidável	6 / 4	50	133
Tubulação do circuito secundário	Aço inoxidável	54 / 50	190	10

Externamente, o vaso de pressão é envolvido por outros dois tubos, inicialmente pelo tubo divisor de fluxo que separa os escoamentos descendente e ascendente da água de resfriamento e finalmente pelo tubo externo que funciona como contenção para a cápsula simplificada.

3.4.3 Sistemas Operacionais

Os sistemas operacionais do dispositivo experimental são responsáveis por simular no interior da cápsula simplificada as condições de pressão, vazão e temperatura definidas para os experimentos preliminares. Os sistemas operacionais simulados pelo dispositivo experimental são o sistema de água pressurizada, o sistema de água de resfriamento e o sistema de pressurização gasosa. Os dois primeiros sistemas são responsáveis pela remoção da energia térmica produzida por efeito Joule no simulador elétrico para fora da cápsula simplificada. Eles utilizam água desmineralizada como fluido de trabalho para evitar oxidação no simulador elétrico e deposição de materiais sobre superfícies aquecidas.

3.4.3.1 Sistema de Água Pressurizada

Este sistema é constituído pelo vaso de pressão, pressurizador, pote de tomada de pressão, válvulas manuais, válvula de segurança, transmissores de temperatura, pressão e pressão diferencial e tubulações de aço inoxidável com diâmetro externo de 6 mm e espessura de parede de 1 mm. A função deste sistema é manter no interior do vaso de pressão o valor especificado da pressão para cada experimento, garantindo dessa maneira o estabelecimento da transferência radial do calor gerado pelo simulador elétrico por mudança de fase, ou seja, na região de ebulição nucleada sub-resfriada.

O interior do vaso de pressão é mantido em permanente contato com o pressurizador. Isto possibilita o ajuste da pressão no sistema de água pressurizada e a acomodação automática de qualquer expansão ou contração volumétrica da água pressurizada resultante da formação de bolhas de vapor ou condensação das mesmas no interior do vaso de pressão. Em condições normais de operação, 2/3 do volume livre do pressurizador é mantido com água desmineralizada e o restante com gás nitrogênio. O controle da pressão da água pressurizada no interior do vaso de pressão é realizado mediante a admissão de gás nitrogênio no plenum superior do pressurizador por meio de um controlador de pressão localizado no cilindro de gás nitrogênio.

Um pequeno vaso metálico identificado como pote de tomada de pressão é conectado ao pressurizador para possibilitar a medição da variação do nível da água desmineralizada no interior do pressurizador. Através de um bocal localizado no tampo inferior do pote e de um bocal localizado próximo ao tampo inferior do pressurizador, ambos os vasos são conectados a um transmissor de pressão diferencial. Tubulações de aço inoxidável com diâmetro externo de 6 mm e espessura de parede de 1 mm são empregadas para a comunicação destes dois vasos com o transmissor de pressão, sendo a linha do pote mantida completamente preenchida com água desmineralizada e a linha do pressurizador variando de pressão conforme seu nível. Dessa forma, quando a formação de bolhas por ebulição acarretar uma variação no nível do pressurizador, o transmissor de pressão indicará imediatamente este fato ao sistema de aquisição de dados. A pressão absoluta existente no interior do vaso de pressão e no pressurizador também é medida permanentemente por um transmissor de pressão absoluta.

Caso ocorra uma despressurização rápida no vaso de pressão por falha do próprio vaso, ou do pressurizador, ou do pote de tomada de pressão ou de tubulação do sistema de água pressurizada, fica comprometida a refrigeração do simulador elétrico podendo ocorrer a ruptura ou fusão dos materiais do mesmo. Portanto, uma constante observação do nível do pressurizador permite a identificação deste tipo de falha.

A Figura 3.9 é um fluxograma do dispositivo experimental no qual são identificados os sistemas e componentes citados neste capítulo para descrição da cápsula simplificada, sistemas operacionais e instrumentação.

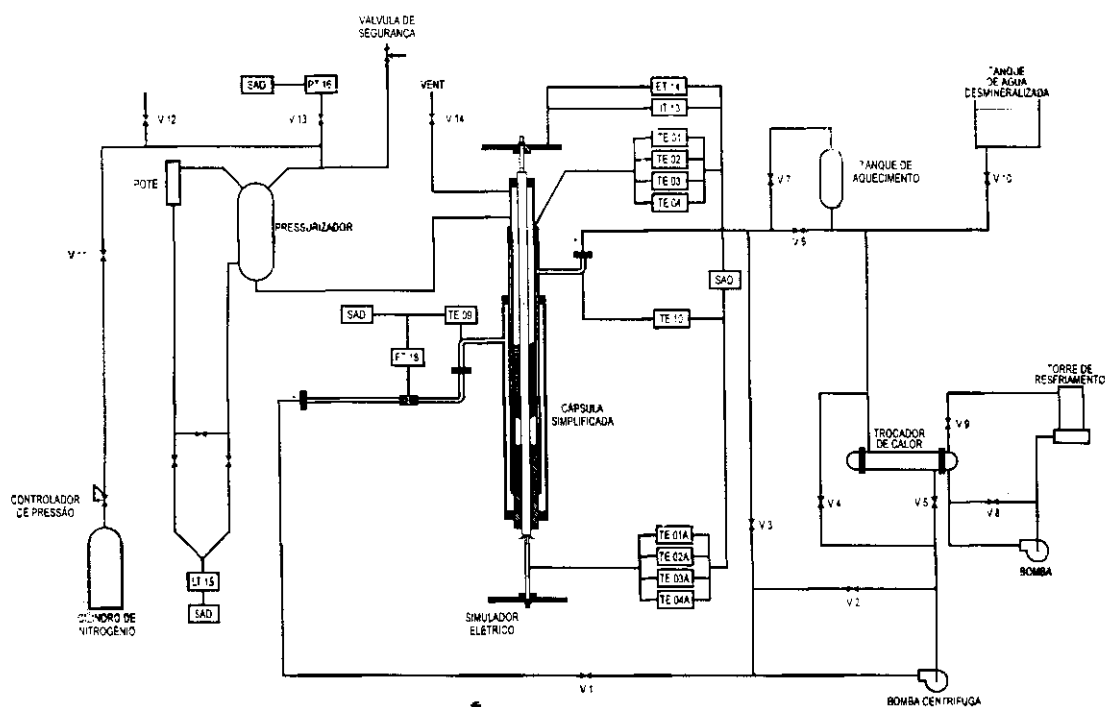


Figura 3.9 Fluxograma do Dispositivo Experimental Desenvolvido

3.4.3.2 Sistema de Água de Resfriamento

Este sistema é constituído pela bomba centrífuga, canais tubulares de refrigeração secundária da cápsula simplificada, tanque de aquecimento, trocador de calor, válvulas manuais, medidores de vazão e pressão e tubulações metálicas rígidas. Grande parte deste sistema foi adaptação de um circuito térmico já existente no Laboratório de Termo-hidráulica do CDTN. O sistema de água de resfriamento tem a função de remover para fora da cápsula simplificada o calor produzido por efeito Joule no simulador elétrico e transferido em regime de ebulição para o sistema de água pressurizada. A bomba centrífuga promove a circulação forçada da água de resfriamento na superfície externa do vaso de pressão e transfere o calor removido da cápsula para a água da torre de refrigeração.

O sistema de água de resfriamento utiliza tubulações de aço inoxidável com diâmetro externo de 54 mm e espessura de parede de 2 mm. A circulação é fechada, operando na pressão de 2,5 bar e tubulação com isolamento térmico revestido de chapas de alumínio liso. O sistema de água de resfriamento utiliza como fluido de trabalho água desmineralizada. A seguir estão descritos seus principais componentes:

- bomba centrífuga fabricada em aço inoxidável, potência nominal de 10 hp, altura manométrica de 70 m.c.a. e vazão nominal de 5 l/s;
- medidor de vazão tipo Coriolis para medir a vazão da água de resfriamento na cápsula simplificada;
- canais tubulares da cápsula simplificada utilizados para remoção do calor transferido pelo simulador elétrico para a parede externa do vaso de pressão;
- tanque de aquecimento em aço inoxidável, com duas resistências elétricas de 4 kW cada, para ajuste da temperatura da água de resfriamento na entrada da cápsula simplificada;
- trocador de calor tipo tubo e casco em aço inoxidável, pressão de trabalho no casco de 15 kg/cm² e nos tubos de 3 kg/cm². O fluido do secundário do trocador de calor é conectado a uma torre de refrigeração.

A água de resfriamento a baixa pressão entra na cápsula simplificada por um bocal no tubo externo e escoar para baixo pelo canal tubular formado pela superfície interna do tubo externo e a superfície externa do tubo divisor de fluxo. Ao atingir a parte inferior da cápsula, a água de resfriamento muda de sentido, escoando para cima pelo canal tubular formado pela superfície interna do tubo divisor de fluxo e a superfície externa do vaso de pressão. Durante o escoamento para cima a água de resfriamento remove, para fora da cápsula, a energia térmica produzida pelo simulador elétrico e transferida para a parede do vaso de pressão, saindo da cápsula pelo bocal existente no tubo divisor de fluxo. Esta dupla circulação da água tem a função de isolamento térmico, pois o escoamento para baixo da água de resfriamento reduz as perdas de calor para fora da cápsula simplificada.

Ao sair da bomba centrífuga, a água de resfriamento passa pela cápsula simplificada remove o calor produzido pelo simulador elétrico e vai ao trocador de calor. Entre a cápsula simplificada e o trocador de calor, está posicionado o tanque de aquecimento, equipado com duas resistências elétricas de 4 kW cada uma e que permitem ajustar a temperatura da água de resfriamento na entrada da cápsula

simplificada. Todos os componentes do sistema de água de resfriamento são de aço inoxidável AISI 316 e projetados para 15 kg/cm².

Nos bocais de entrada e de saída da água de resfriamento da cápsula simplificada foram instalados termopares para medidas de temperaturas. São realizadas medidas das temperaturas da água de resfriamento para serem utilizadas, juntamente com a medição de vazão, na determinação da potência térmica gerada no simulador elétrico.

O controle da vazão da água de resfriamento na cápsula simplificada é efetuado por atuação manual no volante da válvula V3 conforme pode ser visto na Figura 3.9. Esta figura mostra também as válvulas manuais V4 e V5 que permitem controlar a vazão da água de resfriamento que passa no trocador de calor, ajustando desse modo a temperatura da água de resfriamento na entrada da cápsula simplificada.

3.4.3.3 Sistema de Pressurização Gasosa

Este sistema é constituído por um cilindro de nitrogênio de 200 bar, um controlador manual de pressão, uma válvula manual e uma tubulação em aço inoxidável com diâmetro externo de 6 mm e espessura de parede de 1 mm. O sistema de pressurização gasosa fornece gás nitrogênio ao pressurizador para controle da pressão no interior do vaso de pressão.

3.4.4 Mecanismo de Refrigeração da Cápsula Simplificada

A característica mais importante do Circuito de Irradiação CAFE-Mod1 é o fato de sua refrigeração primária utilizar água estática pressurizada e a transferência do calor gerado no interior da vareta combustível para a água de refrigeração se realizar com mudança de fase. Isto quer dizer que a temperatura na parede externa da vareta combustível supera em poucos graus a temperatura de saturação da água para a pressão de operação do sistema de água pressurizada. Essa diferença de temperatura depende do fluxo de calor produzido pelo combustível nuclear. Com este comportamento é possível ter pleno controle da temperatura na qual a vareta combustível foi qualificada pela pressão ajustada, sem a necessidade de controle externo da temperatura.

Esta característica do circuito de irradiação foi preservada no dispositivo experimental durante os experimentos preliminares, com a diferença na forma da geração do calor: o calor é gerado por efeito Joule provocado pela passagem da corrente elétrica no elemento resistivo do simulador elétrico, em substituição à geração de calor decorrente da fissão nuclear do urânio na vareta combustível.

A energia térmica gerada no elemento resistivo é transferida por condução através dos componentes internos do simulador elétrico até a parede externa de seu tubo de revestimento. O mecanismo de refrigeração com mudança de fase da água pressurizada da cápsula simplificada tem início quando o calor do revestimento do simulador elétrico é transferido para o sistema de água pressurizada por ebulição nucleada. A água desmineralizada estática e pressurizada no valor definido para o experimento se aquece até que ocorre a formação de bolhas de vapor na interface entre a superfície externa do revestimento do simulador e a água líquida do primário. As bolhas de vapor são formadas nos pontos de nucleação existentes sobre a superfície aquecida do simulador, crescem na água superaquecida e são succionadas para dentro das células de convecção formadas entre dois discos metálicos do estabilizador de bolhas. Ao se desprenderem do revestimento do simulador, estas bolhas são guiadas no sentido radial da cápsula simplificada pelas células de convecção e, ao alcançarem a região de água sub-resfriada da parede interna do vaso de pressão, as bolhas de vapor subitamente colapsam e transferem sua energia térmica para a superfície metálica do vaso de pressão.

Este processo é de grande eficiência na transferência de calor, sendo as principais causas o fato de trabalhar com calor latente de mudança de fase e, principalmente, devido à sucção exercida pelas bolhas de vapor ao colapsarem, o que favorece significativamente a formação de novas bolhas de vapor. Deve ser acrescentado também que a ebulição ocorrendo numa região confinada amplifica o empuxo decorrente da condensação das bolhas, o que melhora ainda mais a eficiência do processo de transferência de calor por ebulição nucleada [Tantolin, 1994].

Em função das formas geométricas, dimensões e materiais da cápsula simplificada e da pressão e potência especificadas para o experimento, pode ocorrer a formação de um filme contínuo de vapor sobre a superfície do revestimento do simulador elétrico. Tem sido observado experimentalmente [Olekhovitch, Teysedou e

Tye, 1999] que nesse regime de transferência de calor, o líquido primário e estático de refrigeração não consegue molhar permanentemente a superfície aquecida do simulador elétrico, acarretando redução considerável no coeficiente de transferência de calor e em substancial elevação da temperatura na parede do revestimento do simulador elétrico, podendo mesmo acarretar sua destruição. O ponto da curva de ebulição onde inicia este regime de transferência de calor é conhecido como fluxo de calor crítico e seu levantamento experimental é de grande importância para a segurança operacional dos circuitos de irradiação. A determinação experimental destes limites superiores para cada pressão de operação é muito difícil na prática, principalmente pela natureza súbita de ocorrência do fenômeno. Assim, para cada pressão de operação os experimentos foram realizados com a potência térmica máxima limitada a 80% da potência de fluxo de calor crítico, determinada com a equação 4.14 de Reichardt e Neumann, que resultou em valores inferiores para o fluxo de calor crítico.

3.4.5 Instrumentação e Aquisição de Dados

O dispositivo experimental utiliza um conjunto de transdutores e transmissores elétricos instalados na cápsula simplificada e nos sistemas operacionais para medições das variáveis físicas a serem investigadas pelos experimentos. Os sinais elétricos dos transdutores e transmissores são enviados a um conjunto de placas eletrônicas de aquisição de dados instaladas em um microcomputador e processadas por um software de interface gráfica de suporte ao operador do dispositivo experimental. O conjunto de placas eletrônicas e o microcomputador constituem o sistema de aquisição de dados informatizado (SAD) do dispositivo experimental que possibilita o acompanhamento em tempo real e o arquivamento das medições realizadas pela instrumentação para posterior processamento e análise dos resultados das variáveis medidas. A instrumentação incorporada ao dispositivo experimental teve como objetivos o levantamento de:

- temperaturas de ebulição próximas à parede externa do revestimento do simulador elétrico em função das cargas térmicas do mesmo e das pressões ajustadas no sistema de água pressurizada da cápsula simplificada. Este levantamento foi realizado com a vazão e a temperatura de entrada na cápsula da água de resfriamento em seus valores nominais de operação previstos para o circuito de irradiação;

- temperaturas na parede externa do vaso de pressão em função das cargas térmicas no simulador e das pressões no sistema de água pressurizada da cápsula simplificada. Este levantamento foi realizado com a vazão e a temperatura de entrada na cápsula da água de resfriamento em seus valores nominais de operação previstos para o circuito de irradiação.

A partir dos resultados experimentais poderá ser obtida uma correlação para o coeficiente de transferência de calor global em regime de ebulição para a região do estabilizador de bolhas de vapor da cápsula simplificada.

A instrumentação do dispositivo experimental possibilitou medições das seguintes variáveis físicas durante os experimentos preliminares: temperaturas axiais e radiais na parede do revestimento do simulador elétrico, temperaturas na parede externa do vaso de pressão, pressão absoluta no interior do vaso de pressão, temperaturas da água de resfriamento na entrada e na saída da cápsula simplificada, vazão da água de resfriamento e potência térmica de alimentação do simulador elétrico.

O seguir são apresentadas as principais características técnicas dos transdutores e dos transmissores localizados no dispositivo experimental.

a) Medições de Temperaturas no Revestimento do Simulador Elétrico (TE02A, TE04A, TE06A, TE08A)

Estas temperaturas foram medidas com quatro termopares tipo k, junta de medição isolada, bainha em aço inoxidável de diâmetro 0,5 mm e isolamento mineral. Os termopares foram fixados por brasagem na parede do revestimento do simulador elétrico em orifícios com ângulo de 33° em relação à horizontal, de modo que a junta de medição de cada termopar ficou faceando a meia espessura do revestimento do simulador elétrico. Os quatro termopares foram distribuídos em cotas axiais ao longo do comprimento aquecido de 600 mm do simulador elétrico, mais concentrados na parte superior do elemento aquecedor onde é mais provável a ocorrência do fluxo de calor crítico. Os termopares do simulador elétrico foram distribuídos em quatro cotas axiais e posicionados no sentido radial defasados de 90° entre cada cota axial.

Na Figura 3.10 são mostradas as cotas axiais utilizadas para fixação dos termopares no comprimento aquecido do simulador com as bainhas dos quatro

termopares montadas internamente no espaço tubular entre o elemento resistivo e o revestimento e saindo pela parte de baixo do simulador.

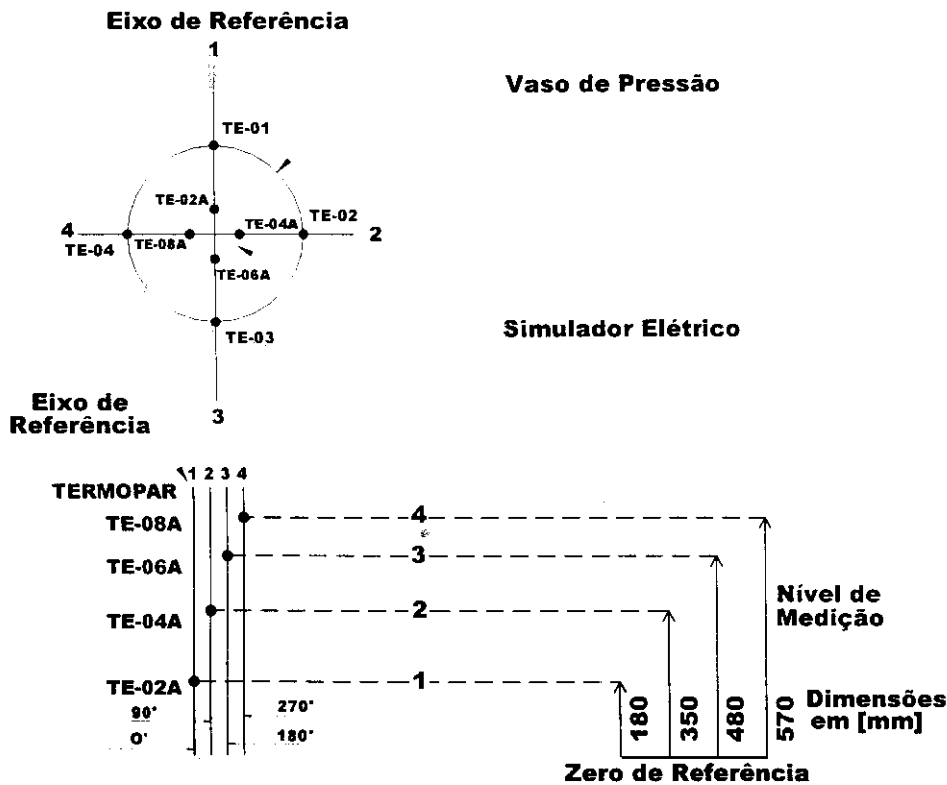


Figura 3.10 Localização dos Termopares no Simulador Elétrico

Os termopares do simulador elétrico foram utilizados para protegê-lo contra danos por fluxo térmico crítico durante os experimentos, sendo esta proteção realizada pela atuação de um relé de estado sólido que desliga o sistema de suprimento de potência para o simulador elétrico.

b) Medições de Temperaturas na Parede do Vaso de Pressão (TE01, TE02, TE03, TE04)

Estas temperaturas foram medidas com quatro termopares tipo k, junta de medição isolada, bainha em aço inoxidável de diâmetro 0,5 mm e isolamento mineral. As juntas de medição dos termopares com bainha de aço inoxidável foram fixadas por interferência mecânica na parede externa do vaso de pressão em AlMg₃. Os termopares

do vaso de pressão foram distribuídos em quatro cotas axiais e posicionados no sentido radial defasados de 90° entre cada cota axial.

As medições efetuadas no revestimento do simulador elétrico e no vaso de pressão permitiram o levantamento dos coeficientes de transferência de calor por ebulição nucleada para confirmar ou não as hipóteses adotadas no projeto da cápsula simplificada.

c) Medições de Temperaturas da Água de Resfriamento na Entrada e na Saída da Cápsula Simplificada (TE09, TE10)

Estas temperaturas foram medidas com dois termopares tipo k, junta de medição isolada, bainha em aço inoxidável de diâmetro 1,0 mm e isolamento mineral, instalados na tubulação do canal de entrada e na tubulação do canal de saída da água de resfriamento na cápsula simplificada. A temperatura da água de resfriamento na entrada foi ajustada para cada experimento nos valores de 30°C ou de 40°C, conforme o sub-resfriamento definido para o experimento. O acréscimo de temperatura na água de resfriamento durante sua passagem pelos canais tubulares de entrada e de saída da cápsula simplificada foi utilizado, juntamente com a medida de vazão mássica dessa água de resfriamento, para o cálculo da potência térmica produzida pelo simulador elétrico. O item 3.6 e o Anexo II tratam das incertezas associadas com as medições efetuadas com termopares, sendo que todos foram calibrados com o banho térmico tipo seco.

d) Medição de Vazão no Sistema de Água de Resfriamento (FT18)

A medição da vazão do sistema de água de resfriamento foi realizada com um medidor de fluxo por efeito Coriolis, marca Metroval, modelo F32000S, faixa de calibração de 0 a 0,41 kg/s, incerteza de $\pm 0,2\%$ do valor medido e sinal elétrico de saída de 4 a 20 mA para o sistema de aquisição de dados. Foram realizados experimentos com vazão de 0,39 kg/s, correspondente à vazão nominal do circuito de irradiação e com vazão de 0,30 kg/s, correspondente à mínima vazão operacional aceita para os testes de irradiação [Costa, Esteves, Lima e Silva, 1998]. Essas medições de vazão foram utilizadas, juntamente com o acréscimo de temperatura na água de resfriamento, para cálculo da potência térmica gerada por efeito Joule pelo simulador elétrico e entregue a água de resfriamento.

e) Medição de Nível do Pressurizador (LT15)

A medição do nível da água no pressurizador foi realizada com um transmissor de pressão diferencial marca Rosemount, modelo 1151 Smart, tipo capacitivo, faixa de calibração a 110 mbar, incerteza de $\pm 0,25\%$ da faixa de calibração e sinal de saída 4 a 20 mA. Para esta medição foram utilizados dois componentes do dispositivo experimental, o pote de tomada de pressão e o pressurizador. Estes dois componentes se comunicam pela tubulação de nitrogênio conectada a seus bocais existentes nos respectivos tampos superiores e o pote se comunica através de um bocal existente na parte de baixo de seu tampo inferior à entrada de pressão alta do transmissor de pressão diferencial. O pressurizador se comunica através de um bocal localizado na parte de baixo de seu tampo inferior à entrada de pressão baixa do transmissor de pressão diferencial. A tomada de pressão nos dois componentes mecânicos é realizada com tubos de aço inoxidável de diâmetro externo de 6 mm e parede de 1 mm. O nível de água no pote é mantido sempre em seu valor máximo e é comparado com o nível da água no pressurizador. Dessa forma, o transmissor mede a diferença de nível da água nestes dois vasos, independentemente da pressão regulada pelo gás nitrogênio na parte superior do pote e do pressurizador.

f) Medição da Pressão do Pressurizador (PT16)

A medição da pressão absoluta ajustada no sistema de água pressurizada foi realizada com um transmissor de pressão marca Rosemount, modelo 2088 Smart, tipo capacitivo, faixa de calibração 0 a 120 bar, incerteza de $\pm 0,25\%$ da faixa de calibração e sinal elétrico de saída de 4 a 20 mA. Este transmissor comunica com o pressurizador através de uma tubulação sem costura de aço inoxidável de diâmetro externo 6 mm e parede de 1 mm, conectada a um bocal localizado no tampo superior do pressurizador.

A Tabela 3.2 apresenta as características dos termopares, dos transmissores utilizados e os respectivos canais de acesso ao sistema de aquisição de dados.

Tabela 3.2 Instrumentação e Aquisição de Dados do Dispositivo Experimental

Código	Instrumento/posição	Faixa de operação	Sinal de saída	Placa-canal
TE02A	Termopar K /simulador	30 a 500°C	1,2 a 25 mV	PCLD789/1-11
TE04A	Termopar K / simulador	30 a 300°C	1,2 a 25 mV	PCLD789/1-12
TE06A	Termopar K / simulador	30 a 500°C	1,2 a 25 mV	PCLD789/1-13
TE08A	Termopar K / simulador	30 a 500°C	1,2 a 25 mV	PCLD789/1-14
TE01	Termopar K/vaso pressão	30 a 200°C	1,2 a 9 mV	PCLD789/1-1
TE02	Termopar K/vaso pressão	30 a 200°C	1,2 a 9 mV	PCLD789/1-2
TE03	Termopar K/vaso pressão	30 a 200°C	1,2 a 9 mV	PCLD789/1-3
TE04	Termopar K/vaso pressão	30 a 200°C	1,2 a 9 mV	PCLD789/1-4
TE09	Termopar K/água de resf.	30 a 100°C	1,2 a 4 mV	PCLD789/1-9
TE10	Termopar K/água de resf.	30 a 100°C	1,2 a 4 mV	PCLD789/1-10
FT18	Transmissor/água de resf.	0 a 0,41kg/s	4 a 20 mA	PCLD789/2-4
LT15	Transmissor/pressurizador	0 a 110 cm	4 a 20 mA	PCLD789/2-4
PT16	Transmissor/pressurizador	0 a 120 bar	4 a 20 mA	PCLD789/2-4
PT17	Transmissor/água de resf.	0 a 10 bar	4 a 20 mA	PCLD789/2-4
IT13	Multímetro/simulador	0 a 100V	digital	RS232
ET14	Multímetro/simulador	0 a 100V	digital	RS232

g) Medições de Tensão e Corrente Elétrica no Simulador

A potência elétrica dissipada no simulador elétrico foi calculada através das medidas da queda de tensão e da corrente elétrica no simulador elétrico. Estas medições foram realizadas com dois multímetros true-rms, marca Fluke, modelo 189, incerteza de $\pm 0,4\%$ da faixa de medição, sendo que um deles mediu diretamente a queda de tensão sobre o simulador elétrico e o outro mediu a queda de tensão sobre um resistor shunt de precisão determinada pela corrente elétrica que passa no simulador elétrico. O shunt utilizado tem relação de conversão de 2000 A/300 mV e os multímetros comunicam, em tempo real, com o sistema de aquisição de dados do dispositivo experimental através de interface serial RS232.

Sistema de Aquisição de Dados

Este sistema utiliza placas eletrônicas de processamento de sinais elétricos e um microcomputador para adquirir e processar os sinais de termopares e transmissores associados. São 16 canais de entrada de dados representando temperaturas, pressões absoluta e diferencial, vazão, tensão e corrente elétrica. Cada canal adquire e registra 2 a 3 sinais elétricos por segundo das respectivas variáveis físicas medidas no dispositivo experimental. O programa de interface gráfica transforma estes sinais elétricos em unidades físicas, o que possibilita ao operador dos experimentos tomar decisões em tempo real, arquivando essas medições para posterior processamento e análise. O sistema de aquisição de dados é constituído por:

- placas condicionadoras de sinais, marca Advantech, modelo PCLD-789;
- placa conversora analógico digital, marca Advantech, modelo PCL-818;
- placa de saída de relés, marca Advantech, modelo PCLD-885;
- microcomputador com processador MMX 220 MHz e seus periféricos normais;
- aplicativo VisiDaq, marca Advantech, para aquisição e processamento dos sinais das medições.

Na Figura 3.11 é mostrado que o sistema de aquisição de dados possui duas placas condicionadoras de sinais conectadas com uma placa conversora analógico digital, instalada no gabinete do microcomputador, e uma placa de saída de relés. Os sinais analógicos de termopares na faixa 1,2 a 100 mV são recebidos diretamente pela primeira placa condicionadora e ajustados com ganho de amplificação igual a 50. Esta placa possui um termistor que mede continuamente a temperatura ambiente, possibilitando o ajuste do valor medido pelos termopares conforme a compensação de “junta fria” real. A segunda placa condicionadora recebe os sinais de corrente na faixa de 4 a 20 mA vindos dos transmissores de pressão, vazão e nível e os converte, através de resistores de precisão de 1 Ω colocados em cada canal de entrada, em sinais de mV com ganho de amplificação igual a 50. As placas condicionadoras também filtram ruídos eletrônicos e realizam a multiplexação dos 16 canais analógicos de entrada para

uma só saída analógica, com uma incerteza associada de $\pm 0.0244\%$ da faixa de medida ± 1 LSB. Os sinais analógicos de saída das placas condicionadoras são transmitidos aos canais de entrada da placa conversora e convertidos em sinais digitais com resolução de 12 bits, taxa de coleta máxima de até 100 kHz e incerteza de $\pm 0.01\%$ da faixa de medida ± 1 LSB. A placa conversora gera também um sinal de saída digital para a placa de relés determinando o acionamento dos relés de proteção do simulador elétrico no caso de temperaturas próximas aos valores de segurança e de gradientes elevados de aumento dessas temperaturas naquele componente.

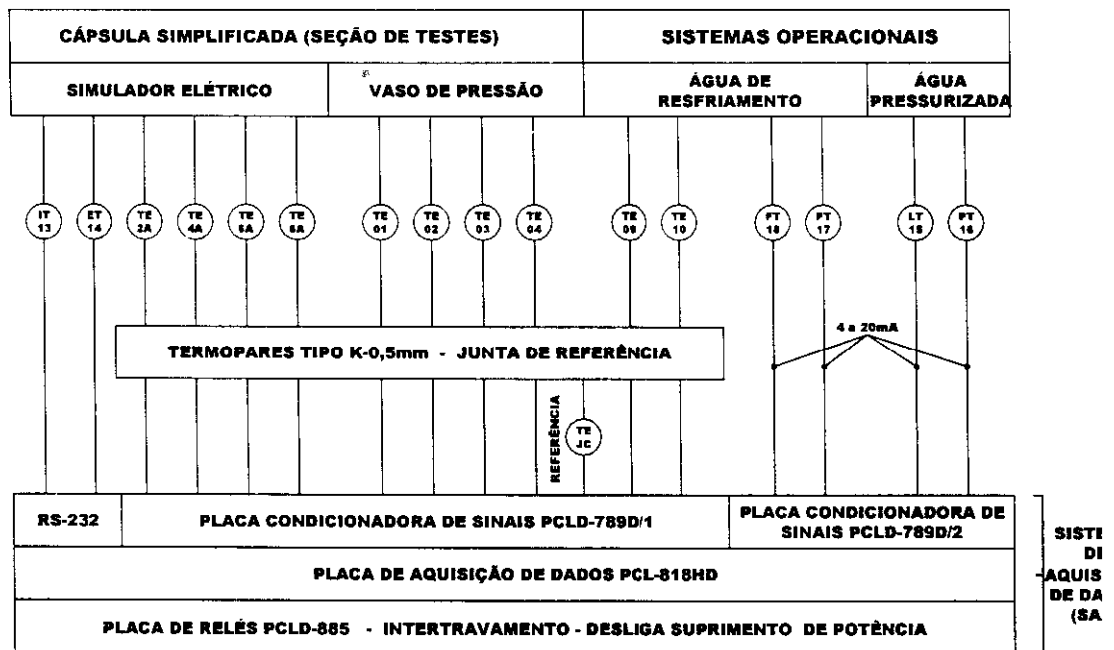


Figura 3.11 Diagrama da Instrumentação do Dispositivo

As variáveis corrente elétrica e diferença de potencial fornecidas ao simulador elétrico pelo retificador de corrente tiristorizado durante os experimentos são medidas por multímetros Fluke e transmitidos em tempo real para a interface serial RS-232 do microcomputador do sistema de aquisição de dados para registro e cálculo da potência elétrica fornecida ao simulador.

O programa supervisorio Cápsula.gni, baseado no software de interface gráfica VisiDAQ versão 3.1, da Advantech Corporation [Advantech, 1998], foi desenvolvido para processar, registrar e apresentar os resultados das medições no monitor de vídeo do microcomputador, através de gráficos e indicadores de valores digitais, de todas as variáveis medidas, bem como determinados resultados de cálculos obtidos a partir desses valores. O intervalo de tempo entre varreduras para aquisição e gravação dos sinais dos medidores foi ajustado para 400 ms e os valores apresentados na tela do programa de aquisição de dados representam valores médios e seus respectivos desvios padrões dos últimos 20 sinais.

O processamento das medições das variáveis físicas registradas pelo sistema de aquisição de dados exigiu a realização de cálculos através de planilhas eletrônicas para determinação de valores médios e seus respectivos desvios padrões, correções devidas às curvas de calibrações e correções de temperaturas devidas ao posicionamento dos termopares de medições.

A fabricação do simulador elétrico é um processo complexo e de custo significativo, devendo ser evitada a sua destruição durante os experimentos preliminares. Com esta finalidade, foram incluídos dois intertravamentos de proteção para simulador, o primeiro através das medidas de suas temperaturas e o segundo através do gradiente de aumento dessas temperaturas. Os sinais de temperaturas dos quatro termopares localizados na parede do revestimento do simulador são processados através da placa conversora que aciona a placa de relés, desligando automaticamente o sistema de suprimento de potência do simulador, caso as taxas de temperaturas ultrapassem 30 °C/s ou as temperaturas medidas naqueles termopares ultrapassem a valores pré-determinados para cada pressão ajustada na cápsula simplificada.

As calibrações de termopares, transmissores e canais de aquisição de dados foram realizadas com calibradores disponíveis no Laboratório de Termo-hidráulica do CDTN-CNEN e foram empregadas para determinação das incertezas associadas aos resultados das medições e dos cálculos obtidos a partir dessas medições.

Os componentes elétricos do dispositivo experimental são comandados remotamente desde uma mesa de comando por meio de botoeiras liga/desliga com lâmpadas sinalizadoras e tendo os seguintes intertravamentos de segurança:

- a partida da bomba centrífuga de água de resfriamento é permitida somente se a bomba centrífuga da torre de refrigeração estiver funcionando;
- a bomba centrífuga da água de resfriamento e o retificador dispõem de intertravamentos de modo que um desligamento casual ou proposital da bomba desliga o retificador;
- o sistema de aquisição de dados dispõe de uma placa de relés que desliga o retificador automaticamente no caso das temperaturas na cápsula simplificada ultrapassassem aos valores previamente ajustados no sistema de aquisição de dados;
- o retificador é protegido contra possíveis problemas de sua alimentação elétrica.

3.4.6 Descrição Funcional do Dispositivo Experimental

A operação do dispositivo experimental é iniciada com a partida do programa supervisorio de monitoração e aquisição de dados instalado no microcomputador do sistema de aquisição de dados. A descrição considera que o dispositivo experimental já tenha sido preenchido com água desmineralizada e que o primeiro passo é ajustar a pressão do sistema de água pressurizada para o valor estipulado para o experimento. A seguir é dada a partida, em uma seqüência fixa, do ventilador e bomba centrífuga da torre de resfriamento e da bomba centrífuga do sistema de água de resfriamento. O passo a seguir é o ajuste da vazão do secundário e a ligação das resistências do tanque de aquecimento. Atuando na válvula manual V3 é ajustada a vazão de 0,39 kg/s no secundário e atuando na válvula manual V4 é efetuado o ajuste da vazão no trocador de calor de modo a conseguir que a temperatura da água de resfriamento na entrada da cápsula simplificada atinja 30°C. Em seguida, é ligado o retificador de corrente para alimentação do simulador elétrico e ao atingir a potência do experimento novamente são ajustados a vazão e temperatura da água de resfriamento na entrada cápsula simplificada. O início de cada experimento consiste em deixar o dispositivo operando por 30 minutos a 1 bar e na potência de ebulição, para promover a retirada do dispositivo e posteriormente abrir válvulas para liberar o ar ou gases, pois na presença

de ar dissolvido na água é possível que ocorra ebulição em uma temperatura inferior à temperatura de saturação para a pressão do experimento.

A vazão do sistema secundário é controlada manualmente por meio da válvula V3 acionada por volante metálico. A válvula V4 permite ainda controlar a vazão da água de resfriamento no trocador de calor. O ramo de recalque da bomba é provido com a válvula V1 para controle de vazão e de pressão da água de resfriamento na cápsula simplificada. Este sistema dispõe também de válvulas de isolamento localizadas nos pontos de menor cota do circuito para drenagem de toda a água do secundário e nos pontos onde há possibilidade de retenção de ar, encontram-se válvulas destinadas a purgar o ar.

3.5 Procedimentos para Realização dos Experimentos

Este item apresenta a matriz de experimentos e os procedimentos experimentais seguidos pelo operador do dispositivo com o objetivo de adquirir valores para as variáveis físicas investigadas.

a) Matriz de Experimentos

Ao iniciar um novo experimento, os sistemas operacionais do dispositivo experimental devem ser ajustados para as condições termo-hidráulicas previstas para a pressão de 1 bar. Durante um período médio de 30 minutos o simulador elétrico deve ser alimentado com potência suficiente para a cápsula simplificada operar no regime de ebulição para degaseificação do dispositivo experimental. Esta etapa de preparação do dispositivo para os experimentos é imprescindível, pois a presença de ar no sistema de água pressurizada altera as condições de ebulição, podendo este fenômeno de transferência de calor ocorrer em temperaturas inferiores aos valores normais.

Os experimentos devem ser realizados, prioritariamente, nas condições de operação previstas para o circuito de irradiação durante os testes com a vareta combustível nuclear. Por essa razão a vazão da água de resfriamento deve ser ajustada em 0,39 kg/s e a temperatura da água de resfriamento na entrada da cápsula ajustada em 30°C. Com estas variáveis fixadas, o operador deve ajustar a pressão do sistema de água pressurizada em seu valor determinado para cada experimento e variar os valores da potência elétrica fornecida ao simulador elétrico pelo retificador de corrente

tiristorizado. Alcançada as condições termo-hidráulicas definidas para o experimento, o dispositivo experimental deve ser mantido em operação de regime por 15 minutos e, se constatada a estabilização, deve ser efetuado o registro das variáveis medidas pelo sistema de aquisição de dados por um período médio de 2 minutos. A Tabela 3.3 apresenta a matriz para realização dos experimentos.

Tabela 3.3 Matriz para Realização dos Experimentos

<i>Água Pressurizada Pressão [bar]</i>	<i>Água Resfriamento Vazão [kg/s]</i>	<i>Água Resfriamento Temperatura [°C]</i>
1	0,39	30
1	0,39	40
1	0,30	30
5	0,39	30
5	0,39	40
10	0,39	30
10	0,39	40
40	0,39	30
70	0,39	30
110	0,39	30

Adicionalmente, foram realizados alguns experimentos com vazões de 0,30 kg/s e temperatura de entrada da água de resfriamento de 40°C para avaliação do comportamento da ebulição e da influência destes novos valores de vazão e temperatura sobre as variáveis investigadas. A vazão de 0,30 kg/s é o valor mínimo para esta variável que é permitido ao circuito de irradiação operar em condições normais e a temperatura de entrada da água de resfriamento de 40°C é o valor máximo previsto para esta variável.

b) Procedimentos para Realização de Experimentos

O arranjo da Figura 3.5 e o fluxograma da Figura 3.9 identificam os componentes do dispositivo experimental que devem ser atuados para ajuste das variáveis termo-hidráulicas especificadas para realização dos experimentos. O operador controla as condições operacionais do dispositivo experimental através da tela no vídeo do microcomputador do sistema de aquisição de dados, reproduzida na Figura 3.12.

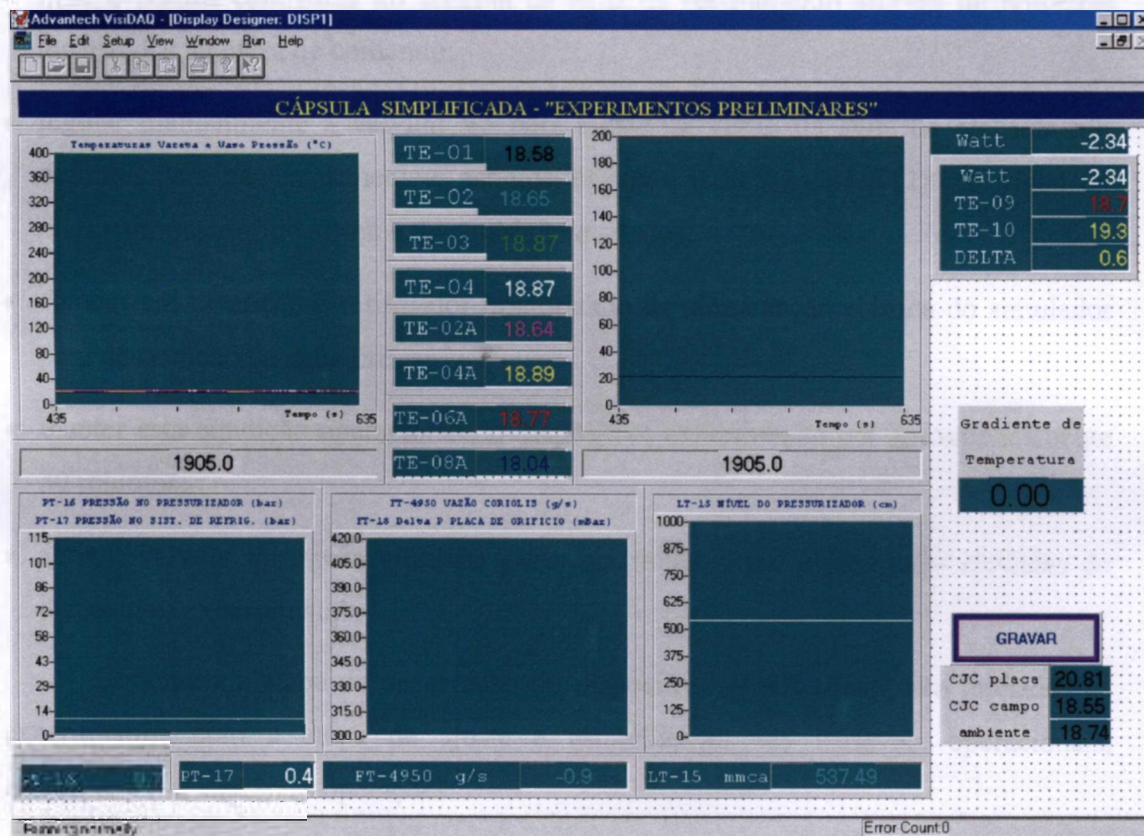


Figura 3.12 Visualização da Tela do Sistema de Aquisição de Dados SAD

Os procedimentos operacionais para realização dos experimentos determinam as etapas ordenadas de ajustes dos parâmetros definidos na Tabela 3.3, das variáveis registradas e dos limites de operação do dispositivo para realização dos experimentos.

A operação do dispositivo experimental pode ser dividida em etapas de desaeração, de ajuste e estabilização dos parâmetros operacionais, e de registro de variáveis experimentais. Considerando que tenha sido realizado o enchimento do

dispositivo experimental e concluído o comissionamento do mesmo, a etapa de desaeração é iniciada com as seguintes operações:

- colocar em operação a instrumentação e o sistema de aquisição de dados SAD;
- ligar o ventilador e a bomba de água da torre de refrigeração através de botoeiras localizadas na mesa de comando;
- ligar a bomba centrífuga do sistema de água de resfriamento através de botoeiras localizadas na mesa de comando;
- regular manualmente a válvula V3 para ajuste da vazão da água de resfriamento definida para os experimentos, acompanhando a indicação de FT18 no vídeo do microcomputador do sistema de aquisição de dados;
- colocar em operação o retificador tiristorizado de alimentação elétrica do simulador para desaeração da água pressurizada;
- manter esta condição operacional do dispositivo experimental por aproximadamente 30 minutos;
- abrir a válvula V14 para eliminar gases acumulados nas partes mais elevadas do dispositivo experimental.

Concluída a etapa de desaeração do dispositivo experimental, são iniciados os experimentos com a etapa de ajuste e estabilização das variáveis operacionais, constituída das seguintes operações:

- fechar válvulas V12 e V14 e ajustar a pressão do sistema de água pressurizada, atuando no controlador de pressão manual do sistema de pressurização gasosa e acompanhando a indicação de PT16 no vídeo do microcomputador do sistema de aquisição de dados;
- abrir a válvula V7 e fechar a válvula V6, ligar as resistências elétricas do tanque de aquecimento e atuar nas válvulas manuais V4 ou V5 para ajuste da temperatura da água de resfriamento na entrada na cápsula simplificada. Esta operação deve ser efetuada acompanhando a indicação do termopar TE09 no vídeo do microcomputador do sistema de aquisição de dados e, após este ajuste, torna-se necessário um reajuste na vazão da água de resfriamento efetuada na etapa de desaeração;

- ajustar a potência elétrica aplicada ao simulador elétrico no valor definido para o experimento. Após este ajuste, poderão ser necessários ajustes finos da temperatura da água de resfriamento na entrada da cápsula simplificada;
- Para cada valor de potência aplicada ao simulador a condição operacional do dispositivo experimental deve ser mantida por aproximadamente 15 minutos.

Concluída esta segunda etapa do experimento, com a estabilização das temperaturas no simulador elétrico e no vaso de pressão, é iniciada a etapa de registro de dados com a gravação dos valores ajustados de vazão e pressão, e dos valores médios das temperaturas de entrada e saída da água de resfriamento, das temperaturas do revestimento do simulador elétrico, das temperaturas da parede externa do vaso de pressão e das tensões e correntes no simulador elétrico. A etapa de registro consta das seguintes operações:

- registrar, por aproximadamente 2 a 3 minutos, todas as grandezas medidas pelo sistema de aquisição de dados a uma taxa de amostragem de 0,4 segundos;
- regular o novo valor de pressão ou de potência elétrica entregue ao simulador, iniciando nova etapa de estabilização. Se for final de experimento, proceder ao desligamento de todos os componentes do dispositivo experimental, iniciando pelo retificador e pelas resistências do tanque de aquecimento. Manter o sistema de água pressurizada com uma pressão mínima de 1,1 bar, para evitar entrada de ar no dispositivo.

Durante os experimentos, o programa de aquisição de dados apresenta o comportamento das variáveis medidas, permitindo ao operador verificar qualquer anormalidade nestas medidas e proceder correções, se necessárias.

3.6 Calibrações de Instrumentos e Análise de Incertezas

A metodologia para calibração dos instrumentos utilizados foi o uso de calibradores próprios, rastreados com os fabricantes dos mesmos, e sempre considerando toda a cadeia de medição, desde o transdutor até o sistema de aquisição de dados. Este modo de calibração consolida a incerteza global da cadeia de medição devido ao sensor, placas condicionadoras e conversora analógico digital e equações para

transformação dos sinais elétricos de entrada em parâmetros expressos em unidades de física.

Para cada cadeia de medição, identificada pelo termopar ou transmissor de pressão absoluta ou diferencial localizado no campo, foi determinada uma curva ajustada de calibração expressa como:

$$y = ax + b \quad [3.4]$$

onde: y é o valor da variável física corrigido pela curva de calibração para erros sistemáticos de toda a cadeia de medição; x é o valor medido da variável física pela cadeia de instrumentos e a e b são os coeficientes da curva de calibração ajustada pelo método dos mínimos quadrados.

A esta curva de calibração ajustada foi associada uma incerteza própria, para cada termopar e transmissor de sinal.

A incerteza global da medição é composta pela incerteza do padrão de calibração utilizado na cadeia de medição, pela incerteza da curva de calibração ajustada e pela incerteza estatística associada à média da própria medição efetuada em um período aproximado de 2 minutos pelo sistema de aquisição de dados. O Anexo I apresenta todas as curvas de calibrações levantadas conforme a metodologia descrita.

Na Figura 3.13 são mostradas as diversas cadeias de medição, devendo ser acrescentado que para a operação de calibração as juntas de medições dos termopares são colocadas em um banho padrão com temperaturas controladas. Os transmissores para a operação de calibração têm seus bocais de entrada de fluido conectados a uma bomba de pressurização e, simultaneamente, esta bomba de pressurização é conectada a um calibrador de pressão.

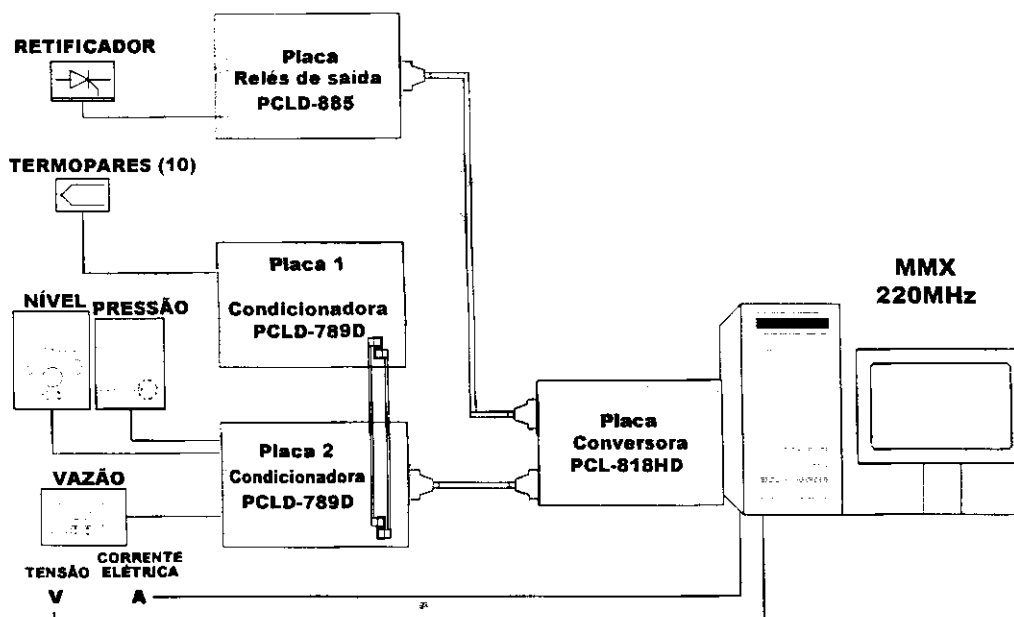


Figura 3.13 Cadeias de Medições para Calibrações

Os instrumentos e os equipamentos utilizados no processo de calibração das cadeias de medição foram:

- multicalibrador marca Presys, modelo Isocal MC-10, que recebe e gera sinais de mV, mA, termopares e RTD com diferentes incertezas associadas;
- calibrador de pressão marca Presys, modelo PC-507, equipado com três cápsulas de tomada de pressão nas faixas de 1 bar, 35 bar e 200 bar, com incertezas de tomada de pressão de 0,05% do valor lido;
- bomba hidráulica portátil, marca Presys, modelo BY-8112/3000, de operação manual para calibração de pressão;
- banho térmico tipo seco, marca Presys, modelo T-650P, com termômetro padrão para controle da temperatura do banho e calibrador para termopares, RTD, mA e mV. Gera de temperatura ambiente até 650°C com incerteza de 0,1% do valor de temperatura ajustado, estabilidade de 0,05°C e resolução de 0,01°C.

A consolidação da incerteza associada a cada cadeia de medição foi realizada utilizando a expressão abaixo:

$$SM = [SP^2 + SC^2 + SE^2]^{0.5} \quad [3.5]$$

onde SP é a incerteza associada ao padrão de calibração utilizado para a variável física. SC é a incerteza associada à curva de calibração ajustada e SE é a incerteza associada à variação estatística das medições da variável física considerada.

Os coeficientes a e b da curva de calibração obtida pela equação [3.4] e a incerteza SC da estimativa do valor da variável física utilizando a curva de calibração ajustada pelo método dos mínimos quadrados para n pontos, foram obtidos pelas expressões [3.6] a [3.8] a seguir. Estas expressões utilizam também os valores de x indicados no vídeo do microcomputador do sistema de aquisição de dados e os valores de y ajustados nos padrões de calibração [Holman, 2001].

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad [3.6]$$

$$b = \frac{(\sum y_i)(\sum x_i^2) - (\sum x_i y_i)(\sum x_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad [3.7]$$

$$SC = \left[\frac{\sum (y_i - ax_i - b)^2}{(n-2)} \right]^{1/2} \quad [3.8]$$

Determinadas as incertezas globais das cadeias de medições para cada variável física investigada, seus valores medidos e as respectivas incertezas possibilitaram a determinação de parâmetros experimentais como a carga térmica fornecida pelo simulador elétrico e os coeficientes de transferência de calor por ebulição, na região do estabilizador de bolhas de vapor. A partir das incertezas das variáveis físicas primárias medidas como temperatura, pressão e vazão, e das incertezas das propriedades da água obtidas da literatura [Wagner e Kruse, 1998], a especificação da propagação da incerteza no cálculo de um parâmetro particular foi baseada na proposta de Kline e McClintock através da expressão abaixo [Kline e McClintock, 1953]:

$$w_R = \left[\left(\sum \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} w_i \right) \right)^2 \right]^{1/2} \quad [3.9]$$

onde R é função de i variáveis independentes x_i , w_R é a incerteza absoluta associada à função R determinada pelas variáveis x_i e w_i são as incertezas associadas a estas variáveis independentes x_i .

O Anexo II apresenta as expressões deduzidas para determinação da propagação de incertezas nos valores calculados, a partir de parâmetros medidos durante os experimentos, da potência térmica gerada e da condutância térmica na região do estabilizador de bolhas.

3.7 Processamento dos Parâmetros Medidos

Os sinais dos sensores e transmissores do dispositivo experimental são enviados ao sistema de aquisição e transformados em valores medidos das variáveis experimentais. Cada valor medido representa a média aritmética de 20 amostragens realizadas a cada 0,4 s. Esta sistemática se repete por um intervalo de 2 a 3 minutos após a estabilização das condições de pressão, vazão, potência e temperaturas do experimento. A seguir cada valor medido é corrigido pelas curva de calibração do respectivo sensor ou transmissor, passando a representar um resultado experimental.

Os quatro termopares do simulador elétrico foram fixados por brasagem a uma distância média de 0,5 mm da superfície externa do revestimento do simulador elétrico. A equação [4.8] para condução térmica radial, possibilita calcular a queda de temperatura que subtraída do valor medido por cada termopar fornece a temperatura na superfície externa do simulador. A condutividade térmica do aço inoxidável AISI-304 do revestimento do simulador em função da sua temperatura média foi obtida da curva ajustada [ASME, 1992], apresentada a seguir:

$$k_{aço} = 14,5 + 1,81 \times 10^{-2} T - 6,67 \times 10^{-6} T^2 + 3,18 \times 10^{-9} T^3 \quad [3.10]$$

válida para a faixa de temperatura T de 20 a 820°C, com um erro padrão de 0,14 W/mK.

Os quatro termopares do vaso de pressão são fixados por brasagem na superfície externa do mesmo. A equação de condução térmica radial [4.8] possibilita calcular a queda de temperatura que somada ao valor medido por cada termopar fornece a temperatura na superfície de interna do vaso de pressão na posição da liga de alumínio. A condutividade térmica da liga AlMg₃ do vaso de pressão em função da sua temperatura média foi obtida da curva ajustada [ASME, 1992], apresentada a seguir:

$$k_{al} = 131,3 + 0,14T - 1,94 \times 10^{-4} T^2 \quad [3.11]$$

válida para a faixa de temperatura T de 20 a 205°C, com um erro padrão de 0,71 W/mK.

Após as correções acima foram determinadas as médias globais das temperaturas medidas que foram utilizadas para determinação dos coeficientes de transferência de calor na região de ebulição nucleada.

3.8 Conclusão

Este capítulo apresentou, em detalhes, todos os equipamentos, instrumentos e métodos utilizados durante os experimentos de ebulição nucleada para levantamento dos parâmetros térmicos necessários para o circuito de irradiação CAFE-Mod1. O capítulo seguinte fornecerá a base teórica sobre o regime de ebulição necessária para realização dos experimentos e para interpretação dos resultados obtidos durante este trabalho.

CAPÍTULO 4 ESTUDO SOBRE EBULIÇÃO APLICADO AOS EXPERIMENTOS

4.1 Introdução

A transferência de calor por ebulição é associada com uma mudança de fase de líquido para vapor. O regime de ebulição nucleada constitui-se em um dos mais eficientes mecanismos de transferência de calor. A eficiência deste regime vem, indubitavelmente, dos fenômenos de formação, crescimento, partida e deslocamento das bolhas de vapor produzidas pela ebulição. A característica mais importante deste processo são as elevadas taxas de transferência de calor associadas a diferenças de temperaturas relativamente pequenas. Esta característica torna o processo de transferência de calor por ebulição particularmente atrativo onde um espaço reduzido é disponível para conseguir uma transferência de calor relativamente grande. Dessa forma, existe grande interesse no estudo dos fenômenos da transferência de calor por ebulição e um grande número de pesquisas são publicadas [Özisik, 1990], [Carey, 1992], [Collier e Thome, 1994], [Mikheyev, 1994], [Tong e Tang, 1997], [Incropera e Witt, 1998].

Os complexos fenômenos envolvidos na transferência de calor por ebulição, ainda hoje, não estão adequadamente descritos [Chai, Peng e Wang, 2000]. Essa é a razão pela qual não existe um modelo físico realístico capaz de prever, com precisão, fenômenos como o fluxo de calor crítico, por exemplo. Sem a existência de uma base teórica adequada, o único caminho para se realizar estimativas de parâmetros em sistemas de ebulição é através dos estudos experimentais. O conhecimento disponível foi obtido através da análise detalhada dos padrões de comportamento do sistema e de correlações representativas do comportamento de dados experimentais.

O projeto do sistema de refrigeração da cápsula do Circuito de Irradiação CAFE-Mod1 prevê que a retirada do calor gerado na vareta combustível nuclear em teste de irradiação seja efetuada no regime de transferência de calor por ebulição nucleada. Os experimentos realizados por este trabalho priorizaram o levantamento de dados com a cápsula simplificada operando no regime de ebulição nucleada para refrigeração do simulador elétrico.

Este capítulo apresenta um estudo sobre os fenômenos e os regimes de transferência de calor por ebulição, com ênfase nos sistemas de ebulição em vaso aberto por representarem melhor a cápsula simplificada. Uma análise dos processos de transferência de calor na cápsula simplificada e as correlações da literatura utilizadas na determinação de valores de referência para os experimentos, também são apresentados.

4.2 Princípios de Transferência de Calor

Os três mecanismos gerais por meio dos quais calor é transferido de um ponto de um sistema para outro são: (1) condução, (2) convecção e (3) radiação. Na transferência de calor por radiação, a energia térmica é transferida por radiação eletromagnética que se propaga como resultado de uma diferença de temperatura [Glasstone, 1994].

O termo condução refere à transferência de calor pela interação molecular e eletrônica, sem qualquer deslocamento macroscópico de matéria associado. O fluxo de calor por condução é governado pela relação conhecida como equação de Fourier expressa por:

$$q = -kA \frac{dt}{dx} \quad [4.1]$$

onde q é a taxa na qual calor é conduzido na direção x através da área A , normal a esta direção, em um ponto onde o gradiente de temperatura é dt/dx e k é a condutividade térmica do meio.

A transferência de calor por convecção é, usualmente, relacionada com a energia térmica transferida através de uma interface sólido-líquido e envolve deslocamento de fluido. Na convecção natural, o movimento é uma consequência das forças de empuxo geradas no fluido e das diferenças de temperaturas no interior do mesmo. Na convecção forçada, de outro modo, o fluido é movimentado por meios mecânicos, como uma bomba centrífuga, por exemplo. Em um sistema de refrigeração para remoção de calor dois aspectos da transmissão de calor por convecção devem ser considerados: inicialmente, ocorre a transferência de calor do material que está sendo refrigerado para o fluido de refrigeração e, posteriormente, o transporte deste calor pelo fluido para outro ponto do sistema. A equação fundamental para convecção natural ou forçada de um fluido é chamada de lei de Newton da refrigeração expressa por [Glasstone, 1994]:

$$q = hA_h \Delta T \quad [4.2]$$

onde q é a taxa de transferência de calor por convecção para ou desde uma superfície de área A_h , quando a diferença de temperatura é ΔT e h é o coeficiente de transferência de calor.

A equação 4.2 pode ser aplicada para fluxo de calor em ambas as direções, do sólido para o fluido ou do fluido para o sólido, sendo que a direção real do fluxo de calor depende do sinal de ΔT . O valor de h depende das propriedades físicas do fluido, da forma e dimensões da interface, e da natureza, direção e velocidade do escoamento do fluido. Dessa forma, o coeficiente de transferência de calor é uma propriedade do sistema particular em estudo. Outro fator que determina h é a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido. A temperatura da superfície do sólido é bem definida e a temperatura do fluido é tomada usualmente como sua temperatura de estabilização [El-Wakil, 1971].

Os processos de refrigeração por convecção natural ou forçada, ao atingirem a região de mudança de fase do fluido como consequência da elevação da temperatura da superfície ou do fluido, mudam sua denominação para transferência de calor por ebulição em vaso e ebulição convectiva, respectivamente.

4.3 O Processo de Transferência de Calor por Ebulição

A vaporização, transição da fase líquida para vapor, pode ocorrer através de evaporação ou através de ebulição. A ebulição é caracterizada pela formação de bolhas de vapor no interior da massa do líquido, enquanto que a evaporação ocorre na superfície livre do líquido. Na ebulição o processo de vaporização associado à formação de bolhas ocorre na interface entre a superfície de aquecimento e o líquido. Existem dois tipos básicos de transferência de calor por ebulição, a ebulição em vaso e a ebulição convectiva. Ebulição em vaso é a ebulição sobre uma superfície de aquecimento submersa em um vaso aberto contendo um líquido, inicialmente em repouso. Ebulição convectiva é a ebulição com o fluido submetido a circulação forçada podendo a superfície de aquecimento ser a parede do canal de contenção do fluido. Neste segundo tipo, o fluido é composto de uma mistura de líquido e vapor [Tong e Tang, 1997].

A temperatura de referência para ebulição é a temperatura de saturação, T_{SAT} , correspondente à pressão do líquido de refrigeração. A diferença entre a temperatura da superfície de aquecimento, T_S , e a temperatura de saturação do líquido é denominada ΔT_{SAT} . A ebulição acontece se existe um superaquecimento do fluido na superfície, assim pode ser dito que ΔT_{SAT} é positivo. Dois métodos de controle da geração de calor na superfície de aquecimento podem ser utilizados para provocar ebulição: o método de controle do fluxo de calor por aquecimento elétrico e o método de controle da temperatura, no caso da parede da superfície de aquecimento ser mantida a uma temperatura constante por outro fluido.

Entre os dois tipos básicos de ebulição, existem diferentes regimes de transferência de calor. Estas diferenças somente podem ser justificadas pela influência dos tipos de escoamentos. O efeito de empuxo é significativo em um sistema de ebulição em vaso, enquanto que o efeito de circulação forçada, devida ao escoamento, é significativo na ebulição dentro de um canal. Os vários regimes de ebulição em vaso com água a 1 bar estão representados na Figura 4.1, na qual o fluxo de calor e o superaquecimento da parede estão em escalas logarítmicas. Estes regimes de ebulição foram observados por diversos pesquisadores como Leidenfrost (1756), Lang (1888), McAdams (1941), Nukiyama (1934) e Faber e Scoriah (1948) [Tong e Tang, 1997].

Em 1934, um professor Japonês, Shiro Nukiyama, estudou a quantidade de calor que poderia ser transferida de uma superfície metálica para a água em ebulição [Tong e Tang, 1997]. Naquela época, a limitada evidência experimental disponível indicava que o fluxo de calor deveria aumentar com a diferença de temperatura, sem atingir qualquer limite máximo. Realizando experimentos com fios de diferentes materiais e diâmetros, aquecidos eletricamente e imersos em um vaso com água estagnada, Drew e Mueller em 1937 determinaram a curva característica de ebulição mostrada na Figura 4.1. Esta curva representa a variação correspondente no fluxo de calor, q/A , através da superfície aquecida, quando a diferença de temperatura, $T_S - T_{SAT}$, entre a superfície aquecida e o líquido, é aumentada progressivamente. Embora os dados apresentados nesta figura sejam representativos de ebulição por convecção natural de uma superfície aquecida em um vaso com água na pressão atmosférica e na temperatura do líquido de 100°C, algumas das características se aplicam à ebulição convectiva e a outras

condições de pressão e temperatura.

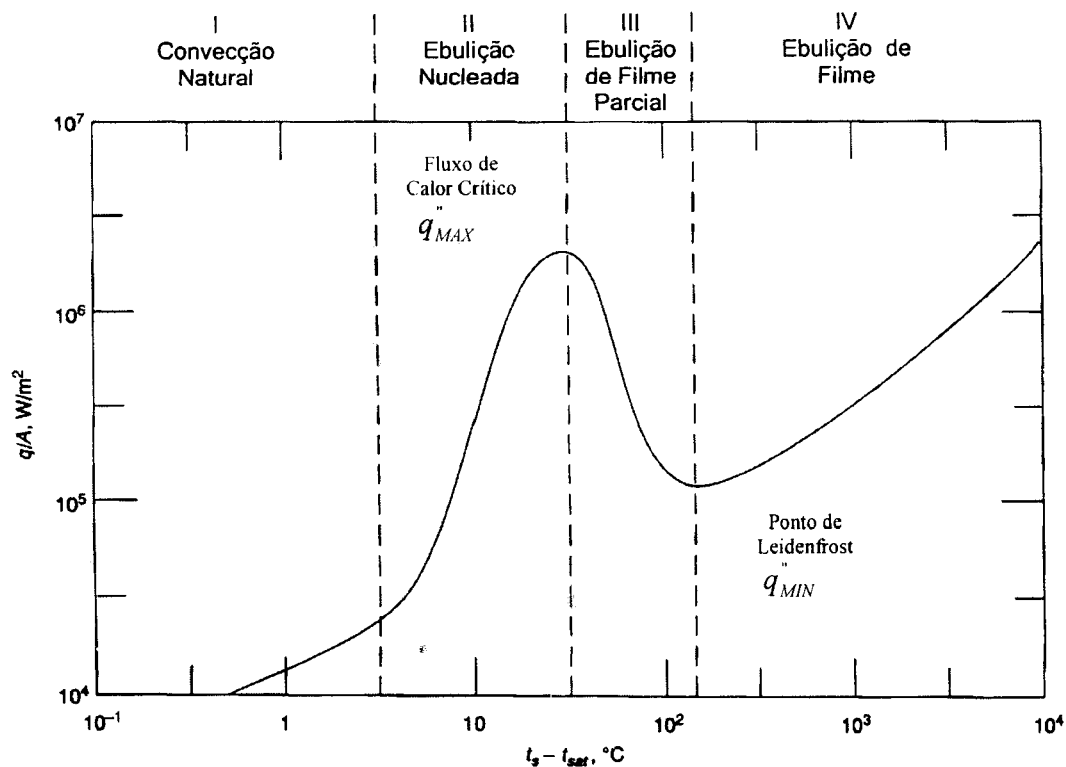


Figura 4.1 Ebulição em Vaso Aberto da Água na Pressão Atmosférica

A curva de ebulição em vaso pode ser dividida em quatro regimes com mecanismos de transferência de calor diferentes. Até a temperatura da superfície exceder a temperatura de saturação por uma pequena quantidade, o calor é transferido por convecção natural. Isto ocorre no regime I da Figura 4.1. O sistema é aquecido pelo líquido levemente superaquecido que sobe por convecção natural monofásica. No regime II, o líquido próximo à superfície está superaquecido e tende a evaporar formando bolhas onde existem pontos de nucleação sobre a superfície aquecida. Este é o regime de ebulição nucleada, no qual a formação de bolhas sobre a superfície aquecida ocorre a partir de centros de nucleação. Estes centros de nucleação são pequenas cavidades como minúsculos poros, defeitos ou arranhões na superfície, contendo gás ou vapor. À medida que o excesso de temperatura aumenta, as bolhas são formadas mais rapidamente, elevando-se até a superfície livre do líquido, onde se dissipam.

A acentuada inclinação da curva de fluxo de calor no regime II é o resultado da mistura do líquido causada pelo movimento das bolhas de vapor. Um valor de fluxo

máximo é atingido quando as bolhas tornam-se tão densas que elas aglutinam e formam um filme de vapor sobre a superfície aquecida. O calor deve então passar através do filme de vapor por um mecanismo combinado de condução e radiação, nenhum dos quais sendo efetivo para transferência de calor, nesta faixa de temperatura. Conseqüentemente, ultrapassando o valor máximo o fluxo de calor transferido decresce apreciavelmente, não obstante um aumento na temperatura. O fluxo máximo referido como fluxo de calor crítico constitui uma limitação de projeto. No regime III o filme de vapor é instável e se espalha sobre uma parte da superfície, a formação de bolhas é tão rápida que elas colapsam antes de se desprenderem. Sob estas condições, algumas áreas da superfície aquecida exibem ebulição nucleada violenta, enquanto que ebulição de filme de vapor ocorre em outras áreas devido à transferência de calor. Para valores suficientemente elevados de $T_S - T_{SAT}$, conforme no regime IV, o filme de vapor torna-se estável e toda a superfície aquecida é coberta por uma fina camada de vapor. A ebulição é então exclusivamente do tipo filme de vapor.

Caso sejam realizadas tentativas de atingir elevados fluxos de calor com ebulição de filme parcial, com valores tão elevados quanto aqueles possíveis na região de ebulição nucleada, por exemplo, a temperatura da superfície aquecida pode tornar-se tão alta quanto o valor que resulta em danos ao material sendo aquecido. Este fato é chamado de *burnout* e, certamente, deve ser evitado. Deve ser também observado, na Figura 4.1, que, se um sistema no regime de ebulição nucleada opera nas condições próximas ao máximo da curva de ebulição, um pequeno aumento no fluxo de calor causará uma súbita mudança para ebulição de filme, o que poderia resultar em *burnout* daquela superfície [Tong e Tang, 1997].

No regime de ebulição nucleada podem-se observar, inicialmente, bolhas isoladas que se comportam independentemente e, posteriormente, bolhas na forma de colunas, as quais deixam a superfície aquecida como jatos que formam grandes colunas. Ainda neste regime, podem-se diferenciar dois sub-regimes. O primeiro sub-regime, denominado de ebulição nucleada local ou sub-resfriada, ocorre quando a temperatura do líquido está abaixo da temperatura de saturação, porém a temperatura da superfície aquecida está acima da temperatura de saturação do líquido. As bolhas de vapor se formam na superfície aquecida, mas condensam no líquido sub-resfriado. Fluxos de calor elevados podem ser obtidos sob estas condições. O segundo sub-regime é a

ebulição nucleada saturada, quando a temperatura do líquido alcança o seu ponto de saturação e, neste caso, as bolhas já não condensam no líquido.

Os regimes de ebulição mencionados também existem na ebulição convectiva. Os mecanismos são mais complicados e, como exemplo de um desses mecanismos, o cisalhamento do fluido escoando pode arrancar as bolhas da superfície de aquecimento, de modo que o tamanho médio das bolhas seja reduzido e a frequência aumentada. Como na ebulição em vaso, a faixa da curva de ebulição de interesse para a maioria das aplicações práticas é aquela da ebulição nucleada, onde fluxos de calor elevados podem ser atingidos em temperaturas relativamente baixas. Quando a temperatura na superfície de aquecimento excede por uns poucos graus a temperatura de saturação do líquido que está em contato com a mesma, o líquido adjacente à superfície torna-se superaquecido e tende a evaporar, formando bolhas de vapor.

As bolhas de vapor se formam sobre a superfície de aquecimento em localizações preferenciais, denominadas de centros de nucleação, onde existem condições favoráveis à nucleação. Os centros de nucleação estão ativos quando bolhas de vapor se desprendem regularmente da superfície aquecida. O número de centros de nucleação ativos cresce regularmente com o superaquecimento da superfície. O crescimento de uma bolha é causado pelo fato da pressão de vapor da bolha ser mais elevada do que a pressão do líquido. Uma fina camada de água superaquecida permanece entre a superfície de aquecimento e a bolha, sendo que a entrada de calor para a bolha ocorre principalmente por condução através deste filme superaquecido de água, que gradualmente vaporiza. Conforme a bolha cresce, o aumento de volume causa um decréscimo na pressão da bolha. Se a saída de calor ou a taxa de condensação exceder a entrada de calor, a bolha colapsa. Se o calor de entrada exceder o calor de saída, a bolha crescerá em tamanho até escapar da superfície, dependendo da diferença relativa entre a tensão superficial e as forças de empuxo. O crescimento das bolhas em líquido superaquecido acontece de um modo violento e explosivo, causando uma turbulência elevada no líquido. Quando a bolha deixa a superfície aquecida, parte da camada de água superaquecida é rompida para ser substituída por água mais fria. A ação de bombeamento, ou crescimento e escape da bolha, origina elevada turbulência que é, em parte, responsável pela alta eficiência da troca de calor obtida com o processo de ebulição. A Tabela 4.1 apresenta os valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção [Incropera e Witt, 1998].

Tabela 4.1 Valores Típicos do Coeficiente de Transferência Convectiva de Calor

PROCESSO	h [W/m ² K]
Convecção Livre	
Gases	2 - 25
Líquidos	50 - 1.000
Convecção Forçada	
Gases	25 - 250
Líquidos	50 - 20.000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição e condensação	2.500 - 100.000

4.4 Equações de Transferência de Calor para a Cápsula Simplificada

A transferência de calor é um processo complexo na refrigeração de um circuito de irradiação a água fervente. A realização de experimentos originais e efetivos para solução dos problemas de troca de calor da cápsula de irradiação constitui o fechamento necessário entre a teoria e a prática. Como um trabalho experimental envolve uma combinação de esforço analítico e prático, a utilização de modelos teóricos para previsão e entendimento dos resultados experimentais é fundamental para a realização de experimentos bem sucedidos.

A refrigeração da cápsula simplificada emprega, simultaneamente, diversos processos de transferência de calor e em diferentes condições operacionais. No interior do vaso de pressão, a refrigeração primária utiliza água pressurizada para remover o calor gerado no simulador elétrico por ebulição nucleada. A seguir, o calor é transmitido por convecção natural bifásica e condensação na célula de convecção. Daí, o calor é transferido por convecção natural monofásica para a parede interna do vaso de pressão e, por condução térmica, alcança a parede externa daquele vaso.

Da parede externa do vaso de pressão, a energia térmica gerada no simulador elétrico é transferida por convecção forçada para o fluido a baixa pressão do sistema de

água de resfriamento, a seguir é transportada para fora da cápsula simplificada e, finalmente, é transferida por convecção forçada para o fluido do secundário de um trocador de calor.

Este item descreve as correlações utilizadas na fase de planejamento dos experimentos para os cálculos de transferência de calor e de fluxo de calor crítico na cápsula simplificada. Os resultados dos cálculos serviram como referência para a realização dos experimentos. As correlações utilizadas estão disponíveis na literatura especializada e se aplicam, com restrições, à geometria e às condições operacionais da cápsula simplificada.

4.4.1 Ebulição Nucleada na Parede Externa do Simulador Elétrico

O simulador elétrico em condições normais é refrigerado com água pressurizada no regime de ebulição nucleada, sub-resfriada confinada. Em relação ao sistema tradicional de ebulição em vaso aberto, tem-se o confinamento do processo de transferência de calor e a presença do estabilizador de bolhas de vapor nas células de convecção. O sub-resfriamento existente nas células de convecção é determinado pela vazão e temperatura de entrada da água de resfriamento na cápsula simplificada.

A transferência de calor por ebulição é considerada confinada quando a ebulição se desenvolve entre duas superfícies separadas por uma distância da mesma ordem de grandeza que o diâmetro das bolhas de vapor. Neste caso, a bolha é deformada e o fenômeno de ebulição é diferente da ebulição em vaso, até mesmo a curva de ebulição é modificada. Os primeiros estudos relacionados a este mecanismo de troca foram realizados por Katto e Ishibashi [Tantolin, 1994]. Estes pesquisadores realizaram um estudo do caso de uma geometria de canal anular confinada com água, e os autores observaram um aumento do coeficiente de troca de calor.

Para a geometria da cápsula simplificada e para a vazão da água de resfriamento definidas para o dispositivo experimental, a temperatura na parede interna do vaso de pressão é mais alta do que a temperatura de entrada na cápsula da água de resfriamento por uma diferença determinada quase que exclusivamente pela condutividade térmica da parede do vaso de pressão e pela retirada de calor da cápsula desde sua saída do simulador elétrico [Reichardt e Neumann, 1968].

Os experimentos realizados por Whitehouse sobre ebulição [Whitehouse, 1976], com a visibilidade do fenômeno sendo um dos objetivos, utilizou uma seção de testes de vidro e o Freon-113 como fluido primário. Foi utilizado um estabilizador de bolhas para modificar a transferência de calor por ebulição e o refrigerante secundário foi água. O autor conclui que o sistema de ebulição orientado tem a habilidade de organizar os fenômenos da ebulição, gerando um potencial de transferência de calor significativo a partir das seguintes observações:

- cinco regimes de ebulição foram constatados na região das células de convecção. Dois destes regimes só ocorreram com a ebulição modificada pelo estabilizador de bolhas de vapor e foram denominados de ebulição inicial (early boiling) e ebulição oscilatória (strobe boiling);
- três alturas de células de convecção foram avaliadas: 2,7 mm, 3,3 mm e 3,9 mm. A distância entre discos de 3,9 mm resultou no menor superaquecimento da parede do simulador nas pressões mais elevadas dos experimentos;
- as oscilações de ebulição são, normalmente, consideradas como instabilidades. O sistema de ebulição orientada é o único capaz de permitir ebulição oscilatória estável;
- o fluxo de calor crítico depende somente das propriedades do material do vaso de pressão e da temperatura e vazão da água de resfriamento.

Estas informações mostram a influência do estabilizador de bolhas de vapor no fenômeno de ebulição, não podendo ser desconsideradas as diferenças entre o experimento descrito e este trabalho de tese.

O cálculo das temperaturas na parede externa do simulador elétrico, no regime de transferência de calor de ebulição nucleada da água pressurizada, foi realizado com as seguintes expressões [Collier e Thome, 1994].

$$T = T_{SAT} + \Delta T_{SAT} \quad [4.3]$$

$$\Delta T_{SAT} = 25(q'')^{0.25} \exp(-p/62) \quad [4.4]$$

onde T_{SAT} é a temperatura de saturação da água na pressão do experimento [°C], ΔT_{SAT} é o superaquecimento da parede do simulador [°C], p é a pressão do experimento [bar]

e q'' é o fluxo de calor gerado no simulador elétrico [MW/m²].

A correlação 4.4 foi desenvolvida por Jens & Lottes (1951) através de experimentos de ebulição sub-resfriada com circulação forçada de água ascendente em um tubo vertical de aço inoxidável, aquecido eletricamente. Esta correlação foi empregada na faixa de ebulição com bolhas entre o início da ebulição nucleada e o fluxo de calor crítico correspondente ao começo da ebulição de filme parcial [Reichardt e Neumann, 1968]. A correlação considera que a temperatura na parede do simulador elétrico é maior do que a temperatura de ebulição T_{SAT} por um acréscimo ΔT_{SAT} que cresce com o fluxo de calor e decresce com a pressão na água pressurizada.

A correlação de Thom et al. também foi avaliada neste trabalho em razão de os autores relatarem que os valores de ΔT_{SAT} estimados com a correlação 4.4 eram consistentemente baixos sob ampla faixa de seus experimentos [Collier e Thome, 1994]. Eles apresentaram uma equação modificada obtida nas mesmas condições da correlação 4.4 e válida somente para água:

$$\Delta T_{SAT} = 22,65(q'')^{0,5} \exp(-p/87) \quad [4.5]$$

onde T_{SAT} é a temperatura de saturação da água na pressão do experimento [°C], ΔT_{SAT} é o superaquecimento da parede do simulador [°C], p é a pressão do experimento [bar] e q'' é o fluxo de calor gerado no simulador elétrico [MW/m²].

Uma terceira correlação, desenvolvida por Rohsenow [Holman, 1987] para o regime de ebulição nucleada em vaso aberto e propriedades do fluido avaliadas nas condições de saturação do mesmo, também foi utilizada para determinação do superaquecimento na parede externa do simulador elétrico:

$$\Delta T_{SAT} = 0,0132 \frac{h_{fg}}{c_{pf}} \left[\frac{q''}{\mu_f h_{fg}} \left(\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right)^{1/2} \right]^{0,33} \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)_f \quad [4.6]$$

onde ρ_f é a densidade do líquido [kg/m³], ρ_g é a densidade do vapor [kg/m³], h_{fg} é a entalpia de vaporização [J/kg], σ é a tensão superficial da interface líquido-vapor [N/m], k é a condutividade térmica [W/mK], g é a aceleração da gravidade [m/s²], c_{pf}

é o calor específico a pressão constante do líquido saturado [J/kg°C], μ é a viscosidade dinâmica [kg/ms] e q'' é o fluxo de calor [W/m²].

A quarta correlação escolhida foi obtida por Foster e Zuber [Carey, 1992] sendo expressa por:

$$\Delta T_{SAT} = \left(\frac{q''}{0,00122 [T_w - T_{SAT}(p_l)]^{0,24} \Delta p_{SAT}^{0,75}} \right) \left(\frac{\sigma^{0,5} \mu^{0,29} h_{fg}^{0,24} \rho_g^{0,24}}{k_f^{0,79} c_{pf}^{0,45} \rho_f^{0,49}} \right) \quad [4.7]$$

onde Δp_{SAT} é a diferença entre a pressão de saturação na temperatura da superfície aquecida e a pressão de saturação na temperatura de saturação do líquido [Pa], ρ_f é a densidade do líquido [kg/m³], ρ_g é a densidade do vapor [kg/m³], h_{fg} é a entalpia de vaporização [kJ/kg], σ é a tensão superficial da interface líquido-vapor [N/m], k_f é a condutividade térmica [kW/mK], c_{pf} é o calor específico a pressão constante do líquido saturado [J/kg°C], μ é a viscosidade dinâmica [kg/ms], T_w é a temperatura da superfície [°C], T_{SAT} é a temperatura de saturação do líquido [°C] e q'' é o fluxo de calor [kW/m²].

4.4.2 Condução Térmica Radial na Parede do Vaso de Pressão

A determinação da transferência de calor na parede de vaso de pressão para o canal tubular da água de resfriamento da cápsula simplificada foi efetuada com a equação da condução térmica estacionária na direção radial, expressa por [Holman, 1987]:

$$q = 2\pi k L (T_i - T_e) / \ln(r_e / r_i) \quad [4.8]$$

onde q é a taxa de transferência de calor [W], k é a condutividade térmica do material [W/mK], T_i é a temperatura interna [°C], T_e é a temperatura externa [°C], L é o comprimento aquecido [m], r_e é o raio externo [m] e r_i é o raio interno [m].

4.4.3 Convecção Forçada na Parede Externa do Vaso de Pressão

Este item apresenta as equações e as condições operacionais utilizadas na determinação teórica das temperaturas da parede externa do vaso de pressão da cápsula simplificada, tomadas como referência para os experimentos sobre ebulição.

A refrigeração do vaso de pressão é realizada pelo fluxo da água de resfriamento a baixa pressão. A água de resfriamento, ao entrar na cápsula simplificada por circulação forçada, escoava inicialmente para baixo no canal tubular delimitado pela parede externa do tubo divisor de fluxo e pela parede interna do tubo externo. Ao atingir a região inferior da cápsula simplificada, a água de resfriamento retorna em fluxo ascendente pelo canal tubular formado entre o vaso de pressão e a parede interna do tubo divisor de fluxo, removendo assim o calor gerado no simulador e transferido ao vaso de pressão pela água pressurizada.

As temperaturas na parede do vaso de pressão foram determinadas com as equações de transferência de calor descritas neste item, considerando que:

- toda potência térmica gerada no simulador elétrico é transferida radialmente para a água de resfriamento;
- o tubo externo comporta-se como sendo isolado termicamente. Qualquer perda de calor pelo tubo divisor de fluxo será recuperado pela água de resfriamento escoando para baixo no canal tubular de entrada na cápsula simplificada;
- as propriedades termodinâmicas e de transporte da água dependem da pressão e da temperatura do meio;
- a transferência de calor entre a parede externa do vaso de pressão e a água de resfriamento ocorre por convecção forçada monofásica.

As equações a seguir foram empregadas na planilha de cálculo das temperaturas da parede externa do vaso de pressão, considerando regime de transferência de calor por convecção forçada da água de resfriamento, escoamento turbulento e propriedades do fluido calculadas com a temperatura de mistura. A correlação utilizada foi desenvolvida por Dittus-Boelter para escoamentos turbulentos [Holman, 1987],

$$Nu = 0,036(Re)^{0,8} (Pr)^{0,4} \quad [4.9]$$

$$Nu = hD_h / k \quad \text{Número de Nusselt} \quad [4.10]$$

$$Re = \rho u D_h / \mu \quad \text{Número de Reynolds} \quad [4.11]$$

$$Pr = C_p \mu / k \quad \text{Número de Prandt} \quad [4.12]$$

onde D_h é o diâmetro hidráulico do canal de água de resfriamento [m], L é o comprimento aquecido do simulador [m], h é o coeficiente de transferência de calor [W/°C m²], k é a condutividade térmica da água de resfriamento [W/m°C], ρ é a densidade da água de resfriamento [kg/m³], u é a velocidade da água de resfriamento no canal [m/s], μ é a viscosidade dinâmica da água de resfriamento [kg/ms] e C_p é o calor específico isobárico [kJ/kgK].

4.4.4 Fluxo de Calor Crítico para a Cápsula Simplificada

O fluxo de calor crítico é um parâmetro importante quando se considera os limites de segurança de reatores nucleares, circuitos de irradiação, geradores de vapor e outras unidades térmicas. Se uma superfície aquecida é refrigerada por um fluido em regime de ebulição nucleada, o coeficiente de transferência de calor será relativamente alto e uma grande quantidade de energia térmica poderá ser removida da superfície com pequenas diferenças de temperaturas. Entretanto, essa excelente característica de transferência de calor não é ilimitada, isto é, o fluxo de calor não pode ser aumentado indefinidamente. Para um determinado valor de fluxo de calor, denominado crítico, o vapor produzido sobre a superfície pode formar uma camada contínua de vapor sobre a mesma e causar a deterioração do mecanismo de transferência de calor. A consequência pode ser a destruição do aquecedor em função de um grande aumento na sua temperatura superficial [Cheng et al, 1997].

A condição de fluxo de calor crítico é caracterizada por uma redução acentuada do coeficiente de transferência de calor para ebulição local em função da substituição do líquido por vapor na região adjacente à superfície de transferência de calor. Nos sistemas com fornecimento de energia constante o fluxo de calor crítico resulta normalmente na destruição da superfície de aquecimento, como consequência das

temperaturas excessivamente elevadas. É imperativo, portanto, prever e impedir a sua ocorrência em tais sistemas. Neste item são apresentadas duas correlações da literatura especializada para cálculo de fluxo de calor crítico: a correlação de Zuber [Holman, 1987] e a correlação de Reichardt e Neumann [Reichardt e Neumann, 1968].

A correlação de Zuber para cálculo do fluxo de calor crítico de ebulição em vaso aberto é independente do material da superfície e depende muito pouco da geometria, sendo expressa por:

$$q_{crit} = \frac{\pi}{24} \rho_f h_{fg} [\sigma g (\rho_f - \rho_g) / \rho_g^2]^{1/4} (1 - \rho_g / \rho_f) \quad [4.13]$$

onde ρ_f é a densidade do líquido [kg/m^3], ρ_g é a densidade do vapor [kg/m^3], h_{fg} é a entalpia de vaporização [J/kg], σ é a tensão superficial da interface líquido-vapor [N/m], g é a aceleração da gravidade [m/s^2] e q_{crit} é o fluxo de calor crítico [W/m^2].

Na correlação de Reichardt e Neumann, os autores concluíram, a partir de experimentos, que a carga térmica limite na qual súbita elevação de temperatura ocorre, depende somente da diferença de temperatura entre a superfície externa do simulador e a superfície interna do vaso de pressão. Esta correlação é expressa por:

$$q_{crit} = 360(T_{SAT} - T_{IN} - 13) \quad [4.14]$$

onde q_{crit} é a potência linear crítica para o simulador elétrico [W/m], T_{SAT} é a temperatura de saturação da água na pressão do experimento [$^{\circ}\text{C}$] e T_{IN} é a temperatura da água de resfriamento na entrada da cápsula simplificada [$^{\circ}\text{C}$].

4.5 Valores de Referência para os Experimentos

Os valores de referência para realização dos experimentos foram calculados a partir das correlações descritas no item 4.4. As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os valores calculados e os valores medidos para as temperaturas nas paredes externas do vaso de pressão e do simulador elétrico. A partir de valores da diferença de temperatura entre a entrada e a saída da água de resfriamento na cápsula e da potência fornecida ao simulador elétrico, foram calculadas temperaturas para o simulador elétrico e o vaso de pressão. Estas temperaturas foram calculadas para a cota vertical de 0,57 m

correspondente à localização dos termopares TE04 e TE08A no vaso de pressão e no simulador elétrico, respectivamente. Foi considerado ainda, que toda energia térmica gerada no simulador elétrico é transferida para a água de resfriamento no canal tubular interno de fluxo ascendente da refrigeração do vaso de pressão.

Os valores de referência foram obtidos com uma planilha de cálculo desenvolvida no Microsoft Excel. As propriedades físicas da água foram obtidas na referência [Wagner e Kruse, 1998] e os seguintes parâmetros do dispositivo experimental foram utilizados (ver item 3.4):

Comprimento aquecido do simulador elétrico	0,6 m
Potência linear máxima prevista para o simulador	800 W/cm
Diâmetro interno do vaso de pressão	27 mm
Diâmetro externo do vaso de pressão	35,4 mm
Diâmetro interno do tubo divisor de fluxo	38,9 mm
Temperatura de entrada da água de resfriamento	30 °C
Vazão mássica da água de resfriamento	0,39 kg/s

Tabela 4.2 Temperaturas na Parede Externa do Vaso de Pressão

PRESSÃO [Bar]	POTÊNCIA [kW]	DIFERENÇA DE TEMPERATURA [°C]	NÚMERO DE REYNOLDS	TEMPERATURA CALCULADA [°C]	TEMPERATURA MEDIDA [°C]
110	30,1	17,2	10521	84,1	82,1
70	25,6	14,5	10095	75,2	73,5
40	19,9	11,2	9779	65,1	63,8
10	17,0	10,0	10815	58,9	54,5
5	12,5	5,5	10498	46,9	48,8
1	8,3	4,5	9330	44,1	46,1

Tabela 4.3 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico

PRESSÃO [Bar]	TEMPERATURA SATURAÇÃO [°C]	CORRELAÇÃO ROHSENOW [°C]	CORRELAÇÃO JENS-LOTJES [°C]	CORRELAÇÃO THOM [°C]	TEMPERATURA MEDIDA [°C]
110	318,1	325,1	322,9	326,2	323,8
70	285,8	293,8	294,6	297,6	296,1
40	250,4	259,1	263,7	265,1	262,6
10	179,9	190,9	200,6	199,1	197,3
5	151,8	163,5	172,7	169,3	176,47
1	99,6	114,6	119,7	114,5	118,4

A Tabela 4.4 apresenta os valores calculados para o fluxo de calor crítico estimado na cápsula simplificada utilizando as correlações descritas no item 4.4.4. A potência máxima proposta para aproximação do fluxo de calor crítico durante os experimentos foi de 80% da carga térmica limite estimada neste item para cada pressão. Esta limitação percentual do fluxo de calor crítico teórico para os experimentos foi adotada por ser o máximo valor de potência permitido para o circuito de irradiação [Reichardt e Neumann, 1968].

Tabela 4.4 Fluxo de Calor Crítico Estimado para a Cápsula Simplificada

PRESSÃO [Bar]	TEMPERATURA SATURAÇÃO [°C]	CORRELAÇÃO ZUBER [W/cm ²]	CORRELAÇÃO ZUBER [kW]	CORRELAÇÃO NEUMANN [W/cm ²]	CORRELAÇÃO NEUMANN [kW]
110	318,1	381,3	71,9	315,2	59,4
70	285,8	405,4	76,4	278,3	52,5
40	250,4	399,8	75,4	237,6	44,8
10	179,9	262,1	49,4	156,9	29,6
5	151,8	205,9	38,8	124,7	23,5
1	99,6	110,2	20,8	64,9	12,2

4.6 Conclusão

Este capítulo apresentou a base teórica sobre transferência de calor para os experimentos de ebulição nucleada. As equações descritas foram utilizadas na determinação dos valores de referência a serem observados pelo operador do dispositivo experimental, no processamento dos resultados experimentais e na comparação desses resultados com os valores obtidos a partir das correlações obtidas na literatura especializada. O capítulo seguinte apresenta os resultados experimentais e as conclusões obtidas a partir dos mesmos para o circuito de irradiação CAFE-Mod1.

CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta os valores das variáveis medidas durante os experimentos e os resultados dos cálculos efetuados a partir daquelas variáveis medidas. Os valores obtidos possibilitaram o conhecimento das condições reais de operação da cápsula simplificada e do simulador elétrico. É apresentada também uma comparação dos valores medidos com valores obtidos a partir de correlações tradicionais da área de ebulição nucleada. O capítulo é concluído com uma avaliação das faixas de incertezas associadas aos resultados experimentais e com as interpretações dos resultados experimentais obtidos.

5.2 Apresentação dos Resultados Experimentais

Os experimentos foram realizados conforme a matriz na Tabela 3.3 e seus resultados serão apresentados para valores de pressão da água pressurizada p [bar], de vazão v [kg/s] e de temperatura de entrada T_m [°C] da água de resfriamento, fixados no dispositivo experimental. Os resultados das grandezas medidas para cada ponto dos experimentos são apresentados em tabelas e gráficos contendo valores da potência térmica fornecida ao simulador elétrico P_{SIM} [kW], valores do fluxo de calor \dot{q}_{SIM} [kW/cm²] e da temperatura média T_{SIM} [°C] na parede externa do simulador elétrico e valores do fluxo de calor \dot{q}_{VASO} [kW/cm²] e da temperatura média T_{VASO} [°C] na parede interna do vaso de pressão. As apresentações e comparações dos resultados experimentais utilizarão potências lineares em [W/cm] e fluxos de calor em [W/cm²] para facilitar as indicações nos gráficos.

5.2.1 Experimentos com valores fixados de $p=1$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_m=30^\circ\text{C}$

Ajustadas a pressão de 1 bar na água pressurizada e as condições de vazão de 0,39 kg/s e de temperatura de entrada de 30°C da água de resfriamento, os valores obtidos de potência térmica, fluxo de calor e as respectivas temperaturas no simulador elétrico e no vaso de pressão são apresentados na Tabela 5.1 e nas Figuras 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 Resultados dos Experimentos a 1 bar, 0,39 kg/s e 30°C

Pontos	q [kW]	q'' _{sim} [W/cm ²]	T _{sim} [°C]	q'' _{vaso} [W/cm ²]	T _{vaso} [°C]
1	1,4	7,5	113,5	2,8	33,3
2	1,8	9,6	113,6	3,6	33,5
3	2,0	10,4	113,3	3,9	34,1
4	2,0	10,7	114,0	4,0	34,3
5	2,9	15,5	115,6	5,7	36,5
6	4,6	24,6	116,3	9,1	42,7
7	4,8	25,7	116,1	9,5	40,4
8	4,9	26,1	116,0	9,7	41,2
9	5,3	28,3	120,1	10,5	41,6
10	6,3	33,3	118,6	12,3	44,1
11	8,2	43,4	121,7	16,1	47,5
12	8,4	44,5	123,4	16,5	49,8
13	9,9	52,7	123,2	19,5	53,6

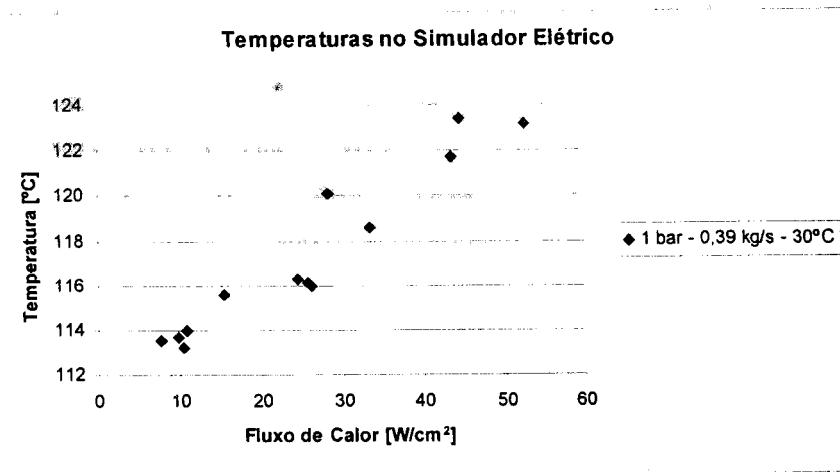


Figura 5.1 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 1 bar

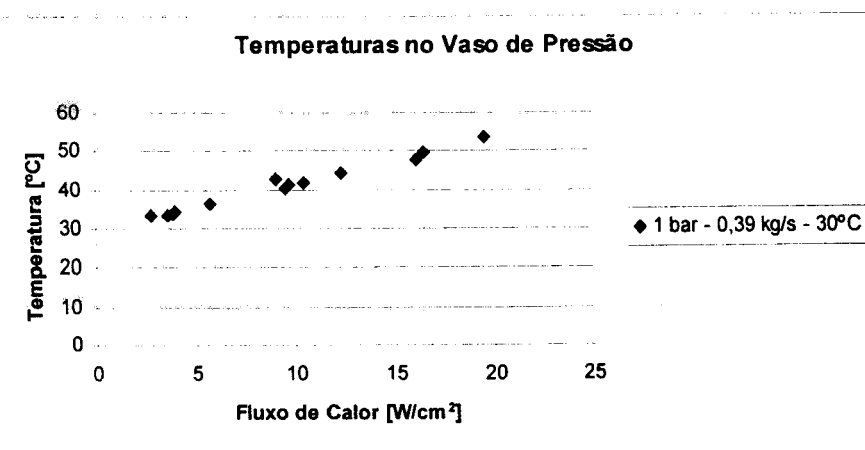


Figura 5.2 Temperaturas na Parede Interna do Vaso de Pressão a 1 bar

5.2.2 Experimentos com valores fixados de $p=5$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$

Ajustadas a pressão de 5 bar na água pressurizada e as condições de vazão de 0.39 kg/s e de temperatura de entrada de 30°C da água de resfriamento, os valores obtidos de potência térmica, fluxo de calor e as respectivas temperaturas no simulador elétrico e no vaso de pressão são apresentados na Tabela 5.2 e nas Figuras 5.3 e 5.4.

Tabela 5.2 Resultados dos Experimentos a 5 bar, 0,39 kg/s e 30°C

Pontos	q [kW]	q''_{sim} [W/cm ²]	T_{sim} [$^{\circ}\text{C}$]	q''_{vaso} [W/cm ²]	T_{vaso} [$^{\circ}\text{C}$]
1	2,5	13,4	160,9	5,0	35,9
2	3,2	16,8	163,8	6,2	37,0
3	3,7	19,6	161,9	7,3	37,3
4	3,9	20,6	165,3	7,6	38,1
5	5,0	26,4	166,5	9,8	40,7
6	5,8	31,0	166,4	11,5	42,7
7	6,5	34,2	167,1	12,7	44,1
8	6,6	35,0	169,2	13,0	43,5
9	6,6	35,1	168,5	13,0	43,8
10	8,0	42,3	168,1	15,7	47,2
11	8,2	43,7	169,9	16,2	47,6
12	8,5	44,9	169,6	16,6	47,7
13	8,7	46,1	171,8	17,1	48,9
14	9,8	52,1	170,8	19,3	51,5
15	10,1	53,5	169,4	19,8	52,1
16	11,5	61,0	173,9	22,6	54,5
17	11,8	62,4	177,5	23,1	55,2
18	12,1	64,0	174,5	23,7	57,6
19	12,2	64,7	175,8	24,0	56,6
20	12,8	67,9	178,8	25,1	57,7
21	13,7	72,9	179,0	27,0	58,7
22	14,3	75,7	179,1	28,0	60,0
23	14,7	78,0	178,0	28,9	62,8
24	15,6	82,8	178,0	30,7	61,6
25	16,4	87,2	178,4	32,3	67,3

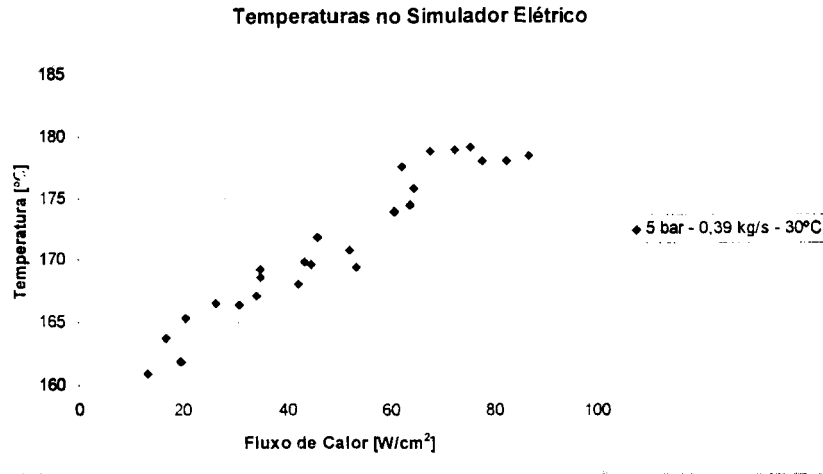


Figura 5.3 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 5 bar

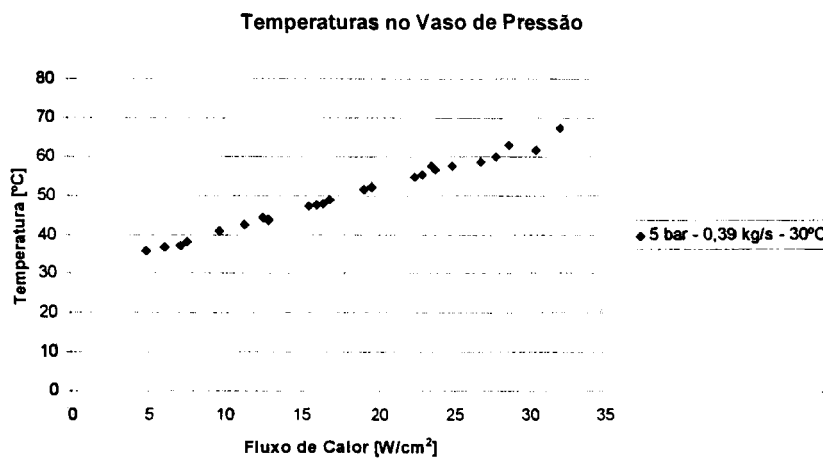


Figura 5.4 Temperaturas na Parede Interna do Vaso de Pressão a 5 bar

5.2.3 Experimentos com valores fixados de $p=10$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$

Ajustadas a pressão de 10 bar na água pressurizada e as condições de vazão de 0,39 kg/s e de temperatura de entrada de 30°C da água de resfriamento, os valores obtidos de potência térmica, fluxo de calor e as respectivas temperaturas no simulador elétrico e no vaso de pressão são apresentados na Tabela 5.3 e nas Figuras 5.5 e 5.6.

Tabela 5.3 Resultados dos Experimentos a 10 bar, 0,39 kg/s e 30°C

Pontos	q [kW]	q'' _{sim} [W/cm ²]	T _{sim} [°C]	q'' _{vaso} [W/cm ²]	T _{vaso} [°C]
1	4,2	22,2	190,1	8,2	39,3
2	4,6	24,6	190,9	9,1	39,6
3	4,7	24,7	187,5	9,1	39,8
4	5,2	27,4	189,9	10,1	41,1
5	5,5	29,4	194,9	10,9	42,0
6	5,6	29,4	191,0	10,9	42,2
7	7,0	37,3	191,1	13,8	44,7
8	7,2	38,3	192,3	14,2	45,2
9	7,5	39,7	191,9	14,7	45,4
10	8,1	43,0	194,8	15,9	46,4
11	8,5	45,0	194,3	16,7	48,2
12	10,3	54,8	196,0	20,3	51,6
13	10,4	54,9	198,9	20,3	51,9
14	10,5	55,6	196,6	20,6	51,8
15	12,0	63,4	199,4	23,5	56,0
16	12,1	64,1	198,9	23,7	55,5
17	12,3	65,5	197,2	24,3	53,5
18	14,4	76,5	198,7	28,3	59,1
19	14,9	78,8	199,6	29,2	60,5
20	15,3	81,3	202,5	30,1	60,5
21	16,5	87,6	200,9	32,5	65,7
22	17,1	90,9	201,0	33,7	66,5
23	20,3	107,5	202,3	39,8	74,2

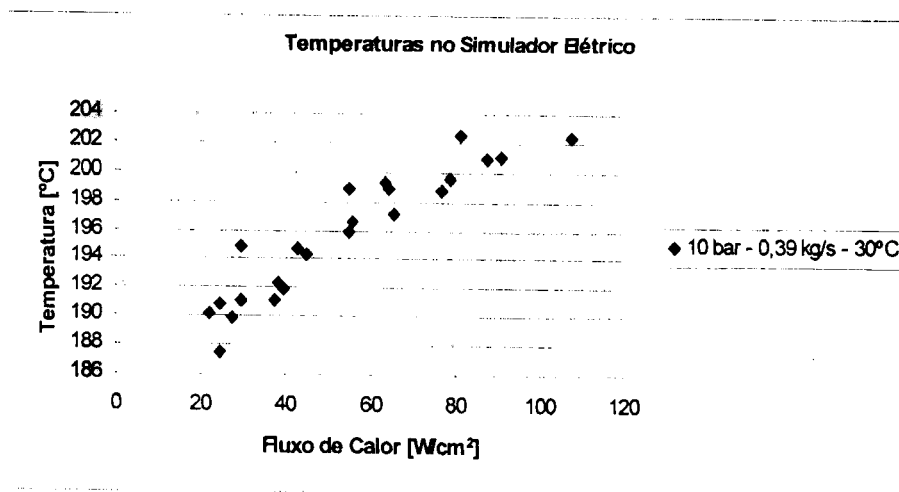


Figura 5.5 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 10 bar

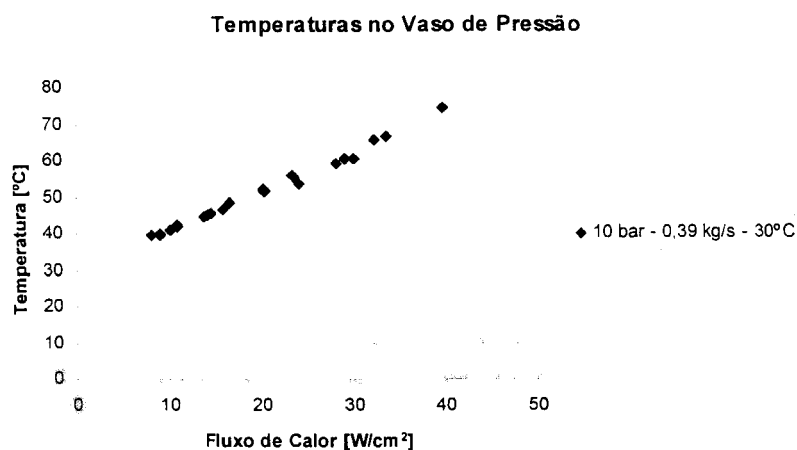


Figura 5.6 Temperaturas na Parede Interna do Vaso de Pressão a 10 bar

5.2.4 Experimentos com valores fixados de $p=40$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$

Ajustadas a pressão de 40 bar na água pressurizada e as condições de vazão de 0,39 kg/s e de temperatura de entrada de 30°C da água de resfriamento, os valores obtidos de potência térmica, fluxo de calor e as respectivas temperaturas no simulador elétrico e no vaso de pressão são apresentados na Tabela 5.4 e nas Figuras 5.7 e 5.8.

Tabela 5.4 Resultados dos Experimentos a 40 bar, 0,39 kg/s e 30°C

Pontos	q [kW]	q''_{sim} [W/cm ²]	T_{sim} [°C]	q''_{vaso} [W/cm ²]	T_{vaso} [°C]
1	8,5	45,2	261,0	16,7	47,5
2	9,2	48,9	260,7	18,1	50,0
3	9,6	50,7	261,2	18,8	50,2
4	10,1	53,3	261,2	19,8	51,4
5	11,7	62,2	262,6	23,0	55,4
6	12,1	64,1	263,2	23,8	58,1
7	12,3	65,1	263,5	24,1	56,7
8	14,2	75,4	263,5	27,9	60,6
9	16,7	88,7	262,0	32,9	65,0
10	19,9	105,4	265,0	39,0	77,1
11	20,1	106,5	264,8	39,4	76,5
12	25,0	132,5	266,2	49,1	87,4

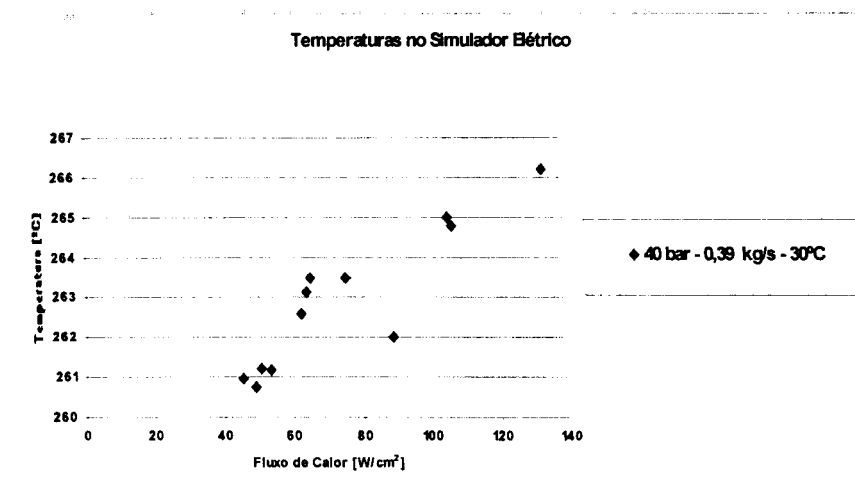


Figura 5.7 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 40 bar

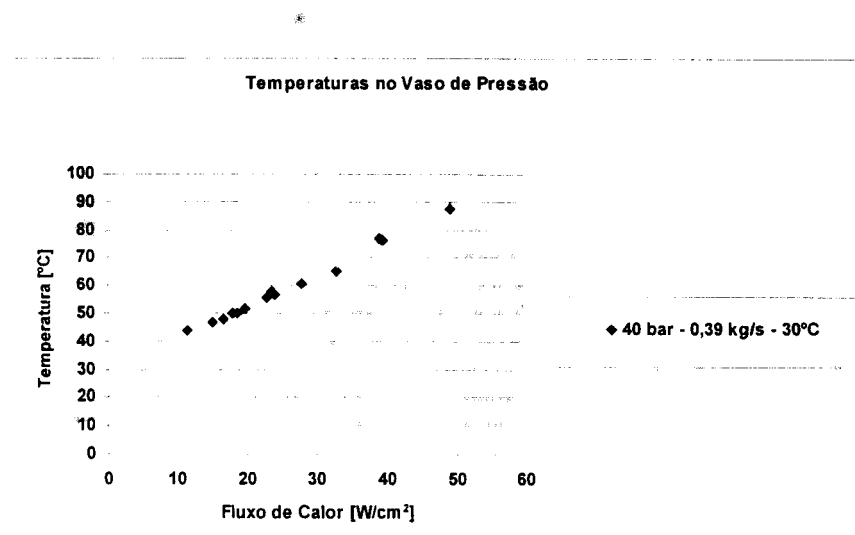


Figura 5.8 Temperaturas na Parede Interna do Vaso de Pressão a 40 bar

5.2.5 Experimentos com valores fixados de $p=70$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$

Ajustadas a pressão de 70 bar na água pressurizada e as condições de vazão de 0,39 kg/s e de temperatura de entrada de 30°C da água de resfriamento, os valores obtidos de potência térmica, fluxo de calor e as respectivas temperaturas no simulador elétrico e no vaso de pressão são apresentados na Tabela 5.5 e nas Figuras 5.9 e 5.10.

Tabela 5.5 Resultados dos Experimentos a 70 bar, 0,39 kg/s e 30°C

Pontos	q [kW]	q'' _{sim} [W/cm ²]	T _{sim} [°C]	q'' _{vaso} [W/cm ²]	T _{vaso} [°C]
1	8,6	54,8	297,2	16,9	49,0
2	10,3	45,5	295,0	20,3	52,6
3	11,1	59,0	296,4	21,9	54,2
4	13,0	69,2	298,3	25,6	58,6
5	14,5	76,9	297,9	28,5	61,8
6	14,6	77,3	298,4	28,6	64,1
7	19,8	105,1	299,4	38,9	77,9
8	25,7	136,4	298,0	50,5	89,7
9	30,7	163,1	299,4	60,4	99,8

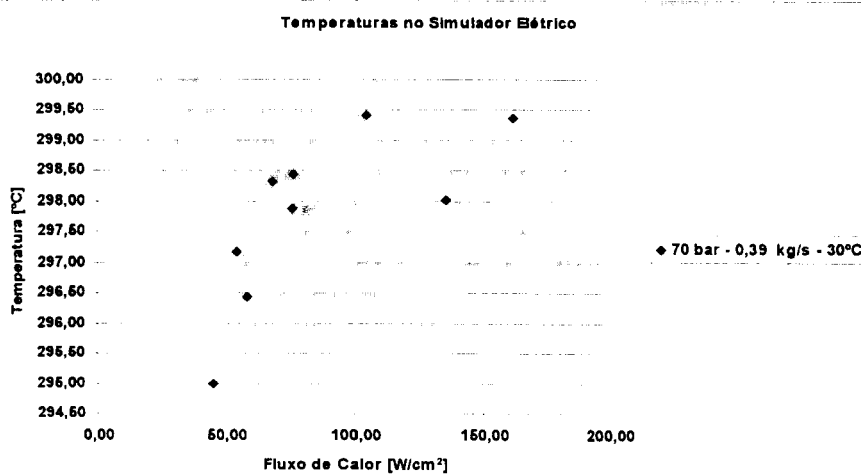


Figura 5.9 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 70 bar

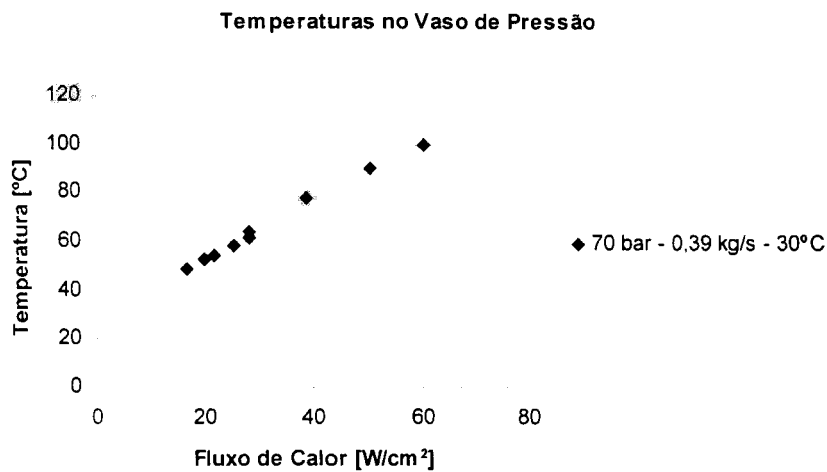


Figura 5.10 Temperaturas na Parede Interna do Vaso de Pressão a 70 bar

5.2.6 Experimentos com valores fixados de $p=110$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$

Ajustadas a pressão de 110 bar na água pressurizada e as condições de vazão de 0,39 kg/s e de temperatura de entrada de 30°C da água de resfriamento, os valores obtidos de potência térmica, fluxo de calor e as respectivas temperaturas no simulador elétrico e no vaso de pressão são apresentados na Tabela 5.6 e nas Figuras 5.11 e 5.12.

Tabela 5.6 Resultados dos Experimentos a 110 bar, 0,39 kg/s e 30°C

Pontos	q [kW]	q''_{sim} [W/cm ²]	T_{sim} [°C]	q''_{vaso} [W/cm ²]	T_{vaso} [°C]
1	11,7	62,1	322,2	23,0	54,4
2	11,7	62,3	322,9	23,1	55,6
3	13,9	73,9	325,5	27,4	61,8
4	15,6	82,9	325,3	30,7	65,6
5	19,8	104,9	323,1	38,8	74,4
6	24,3	129,0	323,1	47,8	86,8
7	30,3	160,7	323,6	59,5	102,4

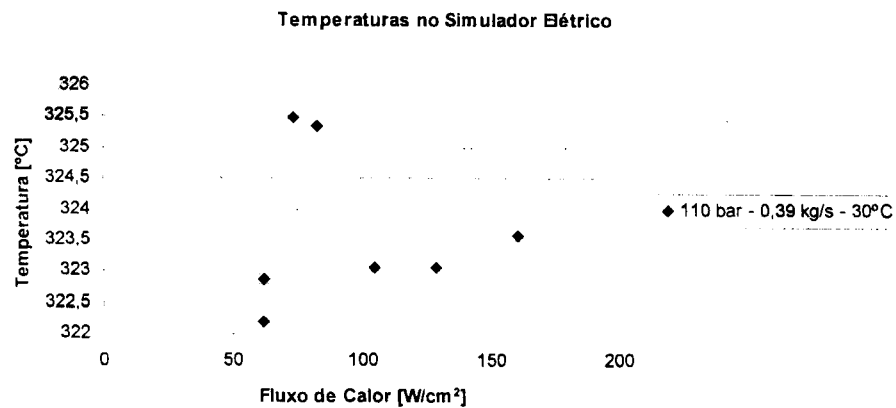


Figura 5.11 Temperaturas na Parede Externa do Simulador Elétrico a 110 bar

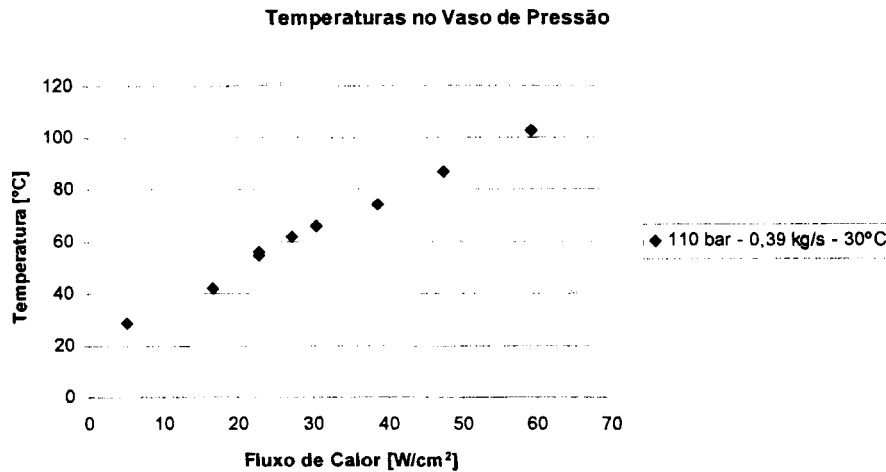


Figura 5.12 Temperaturas na Parede Interna do vaso de Pressão 110bar

5.3 Comparação entre Valores Experimentais e das Correlações Aplicáveis

Este item apresenta tabelas e gráficos para comparação entre os resultados de ebulição obtidos experimentalmente para temperaturas da parede externa do simulador elétrico e os valores para estas mesmas temperaturas calculados com quatro correlações de ebulição nucleada, descritas no capítulo 4.

A comparação foi realizada para cada uma das seis condições operacionais do circuito de irradiação estudadas com o dispositivo experimental. Foram estudadas as condições operacionais com vazão de 0,39 kg/s e temperatura de entrada de 30°C para a água de resfriamento, nas pressões de 1, 5, 10, 40, 70 e 110 bar. Com as condições operacionais fixadas foram calculados valores do superaquecimento da parede externa do simulador elétrico (ΔT_{SAT}) em função das potências térmicas fornecidas ao mesmo durante os experimentos, utilizando as quatro correlações obtidas da literatura especializada. O superaquecimento (ΔT_{SAT}) é a diferença entre a temperatura da parede externa do simulador medida (T_{SIM}) e a temperatura de saturação para a respectiva pressão do experimento (T_{SAT}).

A Tabela 5.7 a seguir relaciona as propriedades da água obtidas na referência [Wagner e Kruse, 1998] e utilizadas para determinação dos valores de ΔT_{SAT} na superfície do simulador elétrico com as correlações escolhidas para comparação com os valores experimentais.

Tabela 5.7 Propriedades da Água para Determinação de ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico

p	T_{sat}	ρ_l	ρ_g	h_{fg}	C_{p_f}	σ	$\mu \times 10^6$	$k \times 10^3$
[bar]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kJ/kg]	[kJ/kg-°C]	[N/m]	[kg/m-s]	[W/m-K]
1	99,610	958,77	0,59	2257,51	4,2161	0,0590	282,92	678,97
5	151,840	914,91	2,67	2107,92	4,3151	0,0484	180,09	681,72
10	179,890	887,31	5,15	2014,44	4,4051	0,0422	150,24	673,38
40	250,360	798,08	20,08	1713,47	4,8688	0,0260	105,95	620,78
70	285,830	739,64	36,50	1505,13	5,4004	0,0176	91,25	571,88
110	318,080	671,59	62,50	1256,11	6,4427	0,0103	79,13	513,02

As correlações para transferência de calor por ebulição utilizadas para os cálculos estão descritas no item 4.4.1. A seguir são apresentadas as tabelas e os gráficos para cada condição experimental estudada, contendo valores experimentais e valores calculados com as quatro correlações escolhidas.

Experimentos com valores fixados de $p=1$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^\circ\text{C}$

Tabela 5.8 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico para $p = 1$ bar

Pontos	Fluxo de Calor [W/cm ²]	Resultados Δt_{sat} [°C]	Foster-Zuber Δt_{sat} [°C]	Jens-Lottes Δt_{sat} [°C]	Thom Δt_{sat} [°C]	Rosehnow Δt_{sat} [°C]
1	7,5	13,9	9,6	12,9	6,2	8,3
2	9,6	14,0	10,7	13,7	6,9	9,0
3	10,4	13,6	11,1	14,0	7,2	9,3
4	10,7	14,4	11,3	14,1	7,3	9,4
5	15,5	16,0	13,4	15,4	8,8	10,6
6	24,6	16,7	16,6	17,3	11,1	12,3
7	25,7	16,5	17,0	17,5	11,4	12,5
8	26,1	16,4	17,1	17,6	11,4	12,6
9	28,3	20,5	17,7	17,9	11,9	12,9
10	33,3	18,9	19,1	18,7	12,9	13,6
11	43,4	22,1	21,5	20,0	14,8	14,9
12	44,5	23,8	21,7	20,1	14,9	15,0
13	52,7	23,6	24,7	21,0	16,3	15,8

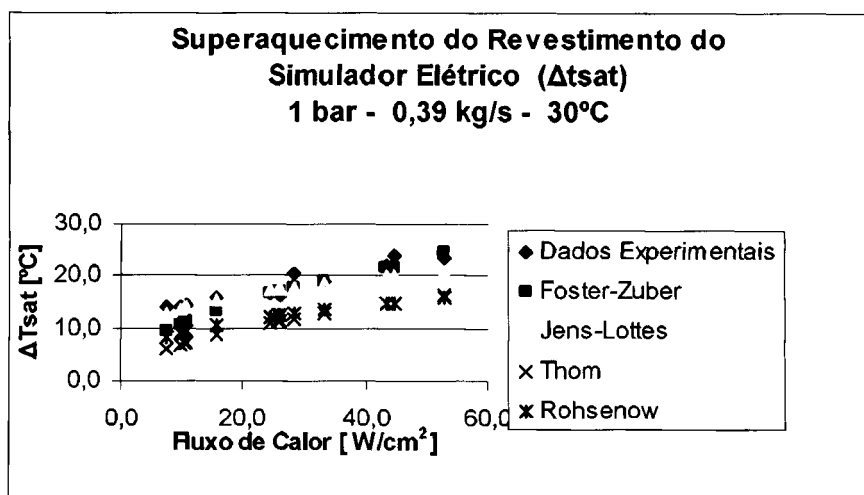


Figura 5.13 Comparação entre os Valores de ΔT_{SAT} da Tabela 5.8 na Pressão de 1 bar

Experimentos com valores fixados de $p=5$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^\circ C$

Tabela 5.9 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Eléctrico para $p = 5$ bar

Pontos	Fluxo de Calor [W/cm^2]	Resultados Δt_{sat} [°C]	Foster-Zuber Δt_{sat} [°C]	Jens-Lottes Δt_{sat} [°C]	Thom Δt_{sat} [°C]	Rosehnow Δt_{sat} [°C]
1	13,4	9,1	8,4	14,0	7,8	6,9
2	16,8	11,9	9,4	14,8	8,8	7,4
3	19,6	10,0	10,1	15,4	9,5	7,8
4	20,6	13,4	10,4	15,5	9,7	7,9
5	26,4	14,7	11,7	16,5	11,0	8,6
6	31,0	14,5	12,6	17,2	11,9	9,0
7	34,2	15,3	13,2	17,6	12,5	9,3
8	35,0	17,4	13,4	17,7	12,7	9,4
9	35,1	16,7	13,4	17,8	12,7	9,4
10	42,3	16,2	14,6	18,6	13,9	10,0
11	43,7	18,0	14,8	18,7	14,1	10,1
12	44,9	17,8	15,0	18,9	14,3	10,2
13	46,1	20,0	15,2	19,0	14,5	10,3
14	52,1	18,9	16,1	19,6	15,4	10,7
15	53,5	17,6	16,3	19,7	15,6	10,8
16	61,0	22,0	17,3	20,4	16,7	11,3
17	62,4	24,7	17,5	20,5	16,9	11,4
18	64,0	22,6	17,7	20,6	17,1	11,5
19	64,7	24,0	17,8	20,7	17,2	11,5
20	67,9	25,9	18,2	20,9	17,6	11,7
21	72,9	27,1	18,8	21,3	18,3	12,0
22	75,7	27,3	19,2	21,5	18,6	12,1
23	78,0	26,2	19,5	21,7	18,9	12,3
24	82,8	26,1	20,0	22,0	19,5	12,5
25	87,2	26,5	20,5	22,3	20,0	12,7

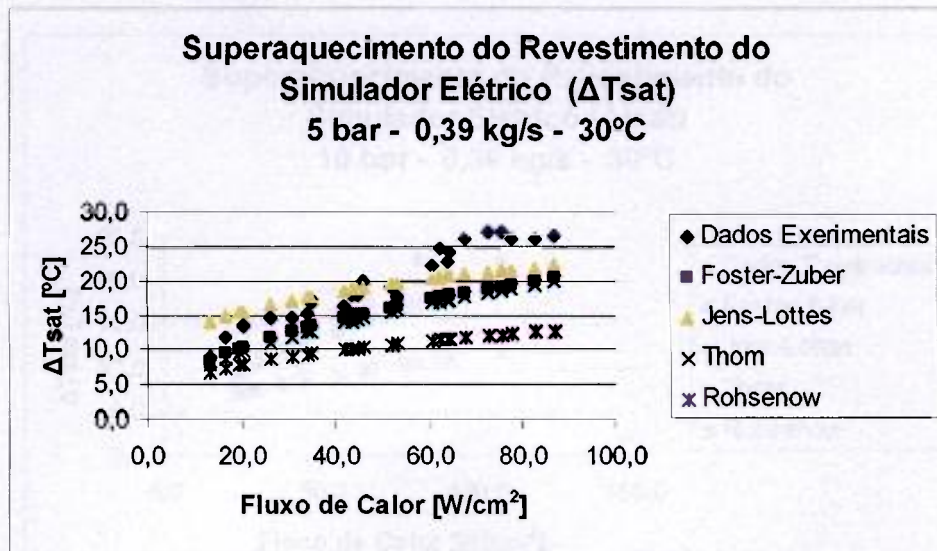


Figura 5.14 Comparação entre os Valores de ΔT_{SAT} da Tabela 5.9 na Pressão de 5 Experimentos com valores fixados de $p=10$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^\circ C$

Tabela 5.10 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico para $p=10$ bar

Pontos	Fluxo de Calor [W/cm^2]	Resultados Δt_{sat} [$^\circ C$]	Foster-Zuber Δt_{sat} [$^\circ C$]	Jens-Lottes Δt_{sat} [$^\circ C$]	Thom Δt_{sat} [$^\circ C$]	Rosehnow Δt_{sat} [$^\circ C$]
1	22,2	10,2	9,0	14,6	9,5	6,9
2	24,6	11,0	9,5	15,0	10,0	7,2
3	24,7	7,6	9,5	15,0	10,0	7,2
4	27,4	10,0	10,0	15,4	10,6	7,4
5	29,4	15,0	10,4	15,7	11,0	7,6
6	29,4	11,2	10,4	15,7	11,0	7,6
7	37,3	11,2	11,6	16,6	12,3	8,2
8	38,3	12,4	11,8	16,7	12,5	8,3
9	39,7	12,0	12,0	16,9	12,7	8,4
10	43,0	14,9	12,5	17,2	13,2	8,6
11	45,0	14,4	12,7	17,4	13,5	8,7
12	54,8	16,1	14,0	18,3	15,0	9,3
13	54,9	19,0	14,0	18,3	15,0	9,3
14	55,6	16,7	14,1	18,4	15,1	9,4
15	63,4	19,5	15,0	19,0	16,1	9,8
16	64,1	19,0	15,1	19,0	16,2	9,8
17	65,5	17,3	15,2	19,1	16,3	9,9
18	76,5	18,8	16,4	19,9	17,7	10,4
19	78,8	19,7	16,6	20,1	17,9	10,5
20	81,3	22,6	16,9	20,2	18,2	10,6
21	87,6	21,0	17,5	20,6	18,9	10,9
22	90,9	21,1	17,8	20,8	19,3	11,0
23	107,5	22,4	19,3	21,7	20,9	11,6

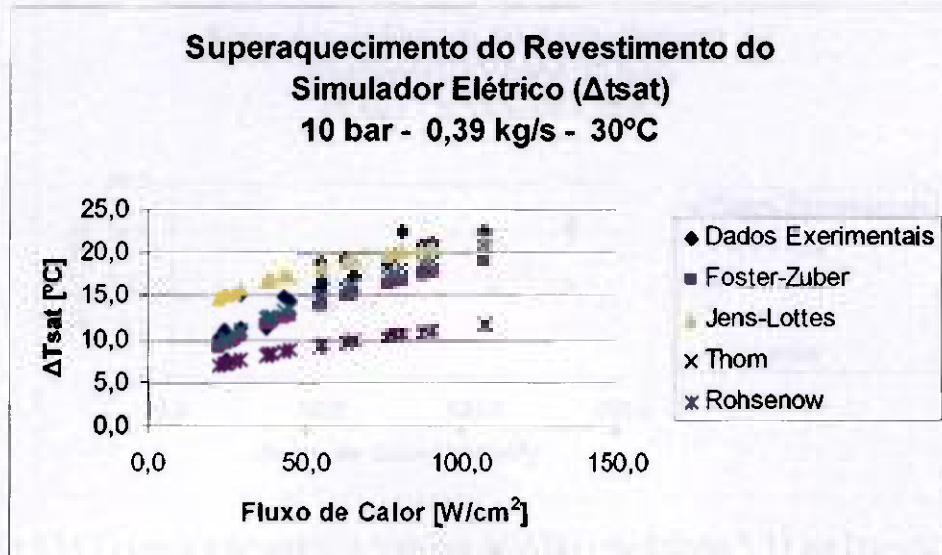


Figura 5.15 Comparação entre os Valores de ΔT_{SAT} da Tabela 5.10 na Pressão de 10 bar

Experimentos com valores fixados de $p=40$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$

Tabela 5.11 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico para $p = 40$ bar

Pontos	Fluxo de Calor [W/cm ²]	Resultados Δt_{sat} [°C]	Foster-Zuber Δt_{sat} [°C]	Jens-Lottes Δt_{sat} [°C]	Thom Δt_{sat} [°C]	Rosehnow Δt_{sat} [°C]
1	45,2	10,6	8,8	10,8	9,6	6,6
2	48,9	10,4	9,2	11,0	10,0	6,8
3	50,7	10,8	9,3	11,1	10,2	6,9
4	53,3	10,8	9,6	11,2	10,4	7,0
5	62,2	12,3	10,3	11,7	11,3	7,3
6	64,1	12,8	10,5	11,7	11,5	7,4
7	65,1	13,1	10,5	11,8	11,5	7,4
8	75,4	13,1	11,3	12,2	12,4	7,8
9	88,7	11,7	12,3	12,7	13,5	8,2
10	105,4	14,6	13,3	13,3	14,7	8,7
11	106,5	14,4	13,4	13,3	14,8	8,8
12	132,5	15,9	14,9	14,1	16,5	9,4

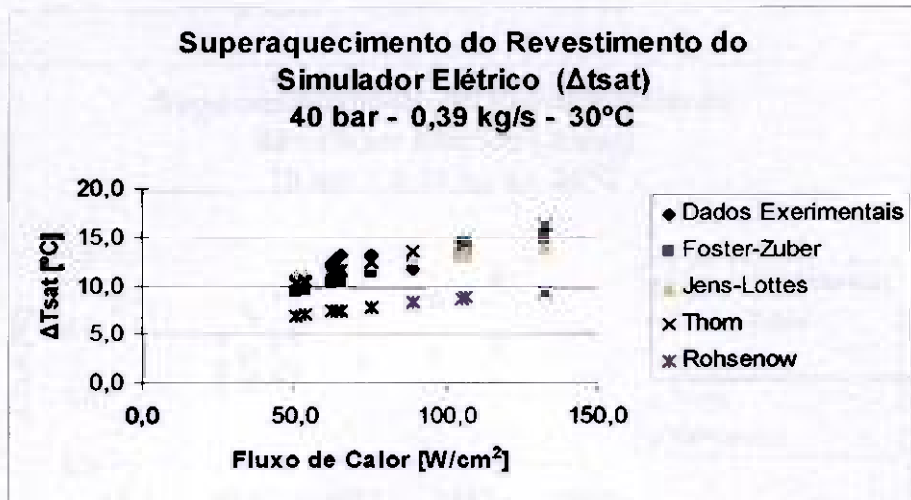


Figura 5.16 Comparação entre os Valores de ΔT_{SAT} da Tabela 5.11 na Pressão de 40 bar

Experimentos com valores fixados de $p=70$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{in}=30^\circ\text{C}$

Tabela 5.12 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico para $p = 70$ bar

Pontos	Fluxo de Calor [W/cm ²]	Resultados Δt_{sat} [°C]	Foster-Zuber Δt_{sat} [°C]	Jens-Lottes Δt_{sat} [°C]	Thom Δt_{sat} [°C]	Rosehnow Δt_{sat} [°C]
1	45,5	9,2	7,3	6,7	6,8	5,5
2	54,8	11,3	8,0	7,0	7,5	5,9
3	59,0	10,6	8,3	7,1	7,8	6,0
4	69,2	12,5	9,0	7,4	8,4	6,3
5	76,9	12,1	9,4	7,6	8,9	6,6
6	77,3	12,6	9,5	7,6	8,9	6,6
7	105,1	13,6	11,0	8,2	10,4	7,3
8	136,4	12,2	12,5	8,8	11,8	7,9
9	163,1	13,5	13,6	9,2	12,9	8,4

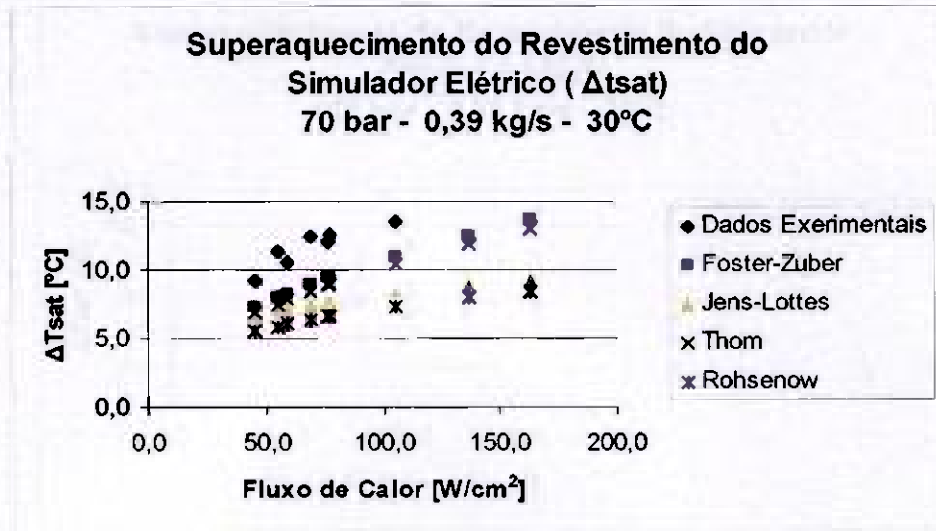


Figura 5.17 Comparação entre os Valores de ΔT_{SAT} da Tabela 5.12 na Pressão de 70 bar

Experimentos com valores fixados de $p=110$ bar, $v=0,39$ kg/s e $T_{i0}=30^\circ\text{C}$

Tabela 5.13 Comparação do ΔT_{SAT} no Simulador Elétrico para $p = 110$ bar

Pontos	Fluxo de Calor [W/cm ²]	Resultados Δt_{sat} [°C]	Foster-Zuber Δt_{sat} [°C]	Jens-Lottes Δt_{sat} [°C]	Thom Δt_{sat} [°C]	Rosehnow Δt_{sat} [°C]
1	62,1	4,1	6,9	3,8	5,0	5,2
2	62,3	4,8	6,9	3,8	5,0	5,2
3	73,9	7,4	7,5	3,9	5,5	5,5
4	82,9	7,3	7,9	4,1	5,8	5,7
5	104,9	5,0	8,9	4,3	6,6	6,1
6	129,0	5,0	9,8	4,5	7,3	6,6
7	160,7	5,5	11,0	4,8	8,1	7,0

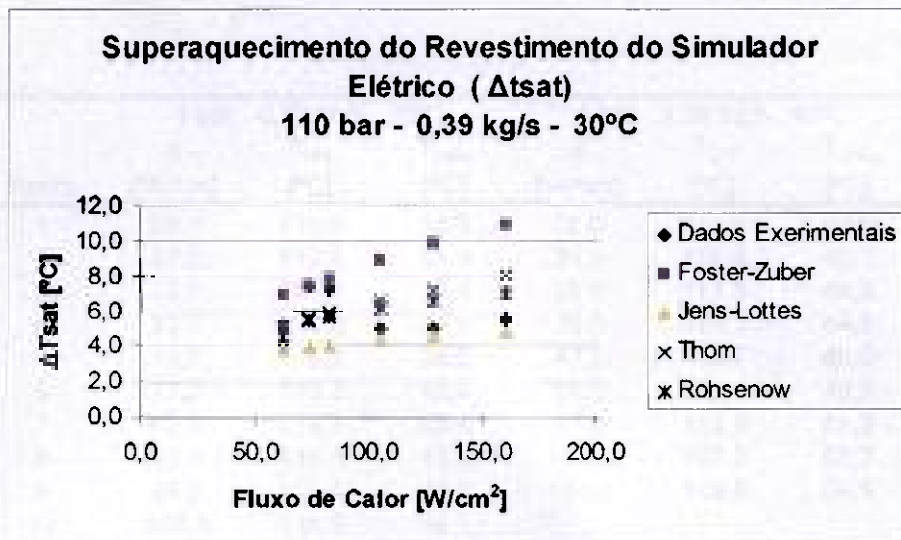


Figura 5.18 Comparação entre os Valores de Δt_{sat} da Tabela 5.13 na Pressão de 110 bar

5.4 Influência da Temperatura de Entrada da Água de Resfriamento nos Resultados

A temperatura de entrada da água de resfriamento na cápsula de irradiação pode alcançar valores mais elevados do que o valor normal de operação de 30°C. O sistema de proteção do circuito de irradiação deve desligar o reator IEA-R1 caso esta temperatura exceda a 40°C. Por essa razão foram realizados experimentos com a temperatura da água de resfriamento fixada em 40°C na entrada da cápsula simplificada e neste item é avaliada a influência da diferença de T_{in} em relação às temperaturas na parede externa do simulador elétrico e na parede interna do vaso de pressão, para as pressões de 1, 5 e 10 bar. Estes valores são mostrados nas Tabelas 5.14, 5.15 e 5.16 e nas Figuras 5.19, 5.20 e 5.21. O número de pontos experimentais para cada condição operacional da cápsula simplificada foi independente, sendo mais importante a carga térmica comparada.

Tabela 5.14 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 1 bar

Ponto	1 bar 0,39 kg/s 30°C			1 bar 0,39 kg/s 40°C		
	q' [W/cm]	T _{sim} [°C]	T _{vaso} [°C]	q' [W/cm]	T _{sim} [°C]	T _{vaso} [°C]
1	23,7	113,5	33,3	20,6	114,0	42,9
2	30,2	113,6	33,5	25,3	114,4	43,1
3	32,7	113,3	34,1	29,9	113,0	44,5
4	33,7	114,0	34,3	30,3	113,3	44,3
5	48,7	115,6	36,5	47,1	114,7	46,2
6	77,2	116,3	42,7	69,2	116,2	49,2
7	80,8	116,1	40,4	81,3	116,9	51,2
8	82,1	116,0	41,2	101,3	117,0	53,7
9	88,8	120,1	41,6	134,4	119,6	56,6
10	104,6	118,6	44,1			
11	136,4	121,7	47,5			
12	139,9	123,4	49,8			
13	165,5	123,2	53,6			

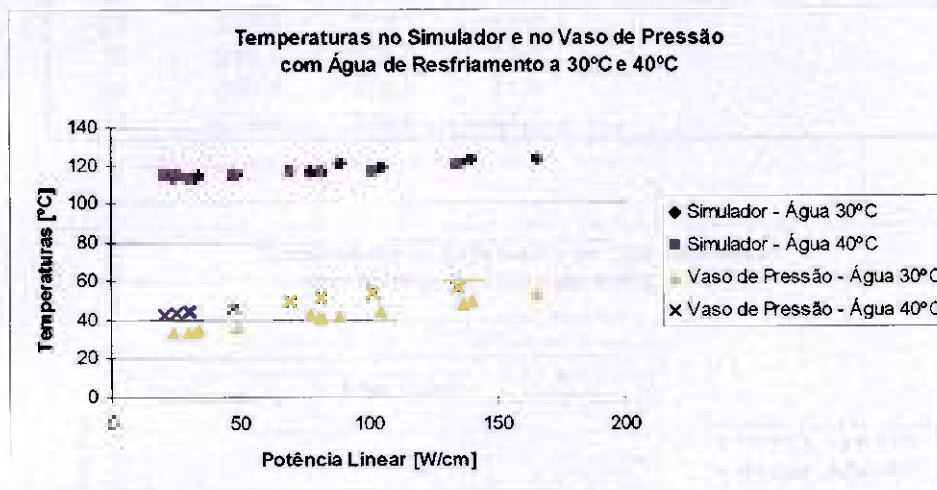


Figura 5.19 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 1 bar

Tabela 5.15 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 5 bar

Ponto	5 bar 0,39 kg/s 30°C			5 bar 0,39 kg/s 40°C		
	q' [W/cm]	T _{sim} [°C]	T _{vaso} [°C]	q' [W/cm]	T _{sim} [°C]	T _{vaso} [°C]
1	42,1	160,9	35,9	44,6	162,2	46,2
2	52,7	163,8	37,0	53,6	163,7	46,1
3	61,6	161,9	37,3	63,7	165,3	47,9
4	64,7	165,3	38,1	80,3	170,2	49,8
5	82,8	166,5	40,7	94,2	170,5	51,8
6	97,4	166,4	42,7	103,8	169,9	53,3
7	107,5	167,1	44,1	144,4	173,9	58,4
8	110,0	169,2	43,5	145,4	173,2	58,4
9	110,4	168,5	43,8	197,1	175,7	64,8
10	132,8	168,1	47,2			
11	137,1	169,9	47,6			
12	141,1	169,6	47,7			
13	144,7	171,8	48,9			
14	163,7	170,8	51,5			
15	168,1	169,4	52,1			
16	191,5	173,9	54,5			
17	196,2	177,5	55,2			
18	201,1	174,5	57,6			
19	203,3	175,8	56,6			
20	213,3	178,8	57,7			
21	229,0	179,0	58,7			
22	237,9	179,1	60,0			
23	245,1	178,0	62,8			
24	260,1	178,0	61,6			
13	274,1	178,4	67,3			

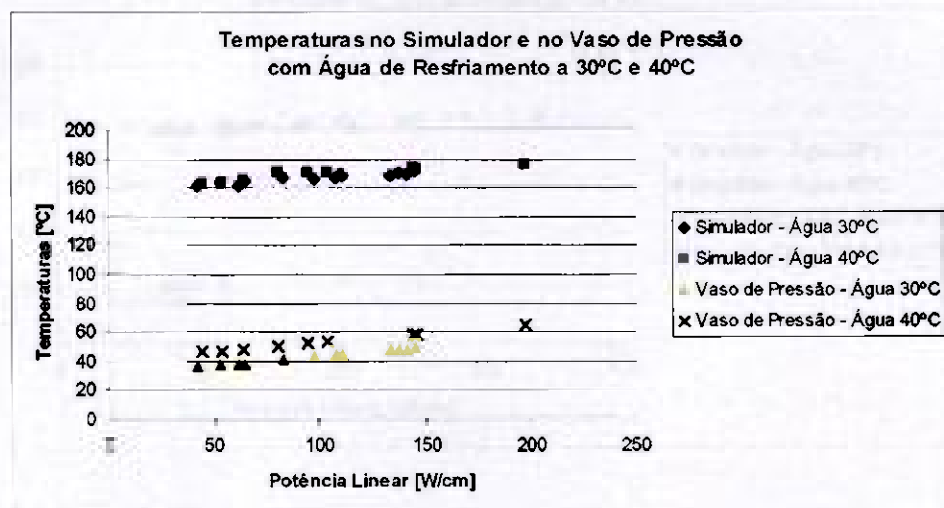


Figura 5.20 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 5 bar

Tabela 5.16 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 10 bar

Ponto	10 bar 0,39 kg/s 30°C			10 bar 0,39 kg/s 40°C		
	q' [W/cm]	T _{sim} [°C]	T _{vaso} [°C]	q' [W/cm]	T _{sim} [°C]	T _{vaso} [°C]
1	69,8	190,8	39,3	72,2	190,2	49,8
2	77,2	191,7	39,6	77,8	191,4	50,3
3	77,6	188,3	39,8	79,1	189,4	50,0
4	86,0	190,8	41,1	86,3	190,0	50,5
5	92,5	194,9	42,0	95,2	191,3	52,3
6	92,5	192,0	42,2	114,6	193,2	54,1
7	117,3	192,3	44,7	168,8	191,7	61,2
8	120,5	193,5	45,2	205,6	193,4	64,4
9	124,7	193,1	45,4			
10	135,2	194,8	46,4			
11	141,2	195,7	48,2			
12	172,3	196,0	51,6			
13	172,5	200,7	51,9			
14	174,8	196,6	51,8			
15	199,2	202,4	56,0			
16	201,4	198,9	55,5			
17	205,8	199,3	53,5			
18	240,3	201,2	59,1			
19	247,7	202,1	60,5			
20	255,3	205,1	60,5			
21	275,3	203,7	65,7			
22	285,6	206,0	66,5			
23	337,7	205,8	74,2			

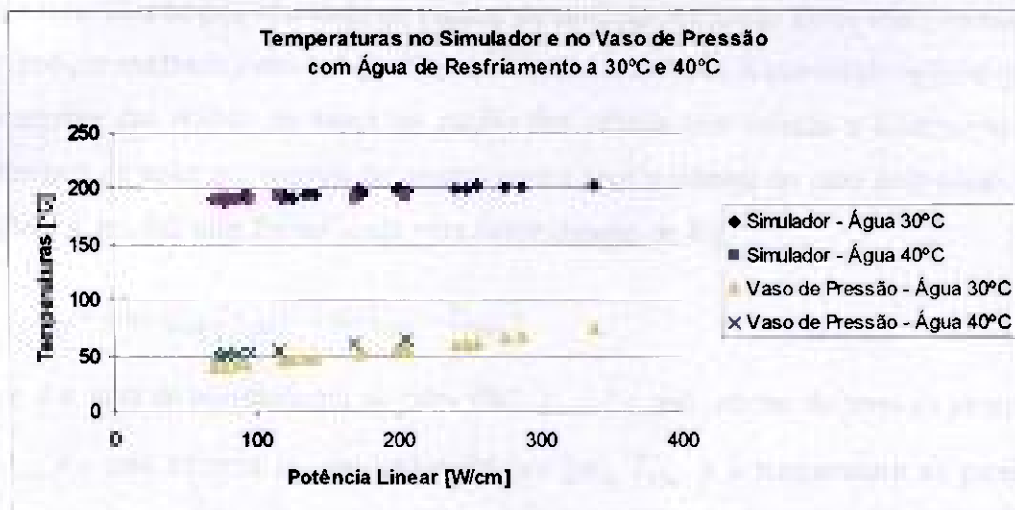


Figura 5.21 Influência do Sub-resfriamento nas Temperaturas Medidas a 10 bar

5.5 Cálculos dos Coeficientes de Transferência de Calor para a Cápsula Simplificada

O objetivo principal deste trabalho é a determinação dos coeficientes de transferência de calor por ebulição nucleada na região do estabilizador de bolhas. Por essa razão, este item apresenta tabelas com os valores dos coeficientes de transferência de calor h [$W/^\circ C m^2$] obtidos a partir dos dados experimentais. O cálculo dos coeficientes de transferência de calor (h) utiliza sua equação 4.2 conceitual modificada:

$$h = q'' / \Delta T_{SAT} \quad [5.1]$$

onde q'' é fluxo de calor por convecção [W/m^2] e ΔT_{SAT} é a diferença entre a temperatura da parede externa do simulador elétrico T_{SIM} [$^\circ C$] e a temperatura de saturação na pressão do experimento T_{SAT} [$^\circ C$].

As Tabelas 5.17 a 5.22 apresentam os valores de (h) e também os valores da condutância térmica global (K_G) determinada para a região do estabilizador de bolhas compreendida entre a parede externa do simulador elétrico e a parede interna do vaso de pressão. Este coeficiente possibilita representar ao mesmo tempo os três processos de transferência de calor que ocorrem na região do estabilizador de bolhas quando a cápsula simplificada está operando no regime de ebulição nucleada. Estes três processos são a ebulição nucleada junto à superfície do simulador elétrico, a convecção natural por deslocamento das bolhas de vapor na região das células convectivas e finalmente, a transferência do calor por convecção natural para a parede interna do vaso de pressão. A equação 4.8, modificada, foi utilizada para determinação de K_G :

$$K_G = q \ln(r_{VASO} / r_{SIM}) / 2\pi L (T_{SIM} - T_{VASO}) \quad [5.2]$$

onde q é a taxa de transferência de calor [W], r_{VASO} é o raio interno do vaso de pressão [m], r_{SIM} é o raio externo do simulador elétrico [m], T_{SIM} é a temperatura da parede externa do simulador elétrico [$^\circ C$], T_{VASO} é a temperatura da parede interna do vaso de pressão [$^\circ C$] e L é o comprimento aquecido [m].

Tabela 5.17 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para p= 1 bar, v=0,39 kg/s e Tin=30°C

Pontos	q [kW]	q ¹ _{sim} [kW/m ²]	T _{sim} [°C]	[Δtsat] [°C]	h [kW/m ² -°C]	T _{vaso} [°C]	Kg [W/m-°C]
1	1,4	75,5	113,5	13,9	5,4	33,3	4,7
2	1,8	96,3	113,6	14,0	6,9	33,5	6,0
3	2,0	104,0	113,3	13,6	7,6	34,1	6,5
4	2,0	107,3	114,0	14,4	7,5	34,3	6,7
5	2,9	155,1	115,6	16,0	9,7	36,5	9,7
6	4,6	245,6	116,3	16,7	14,7	42,7	16,6
7	4,8	257,1	116,1	16,5	15,5	40,4	16,9
8	4,9	261,4	116,0	16,4	16,0	41,2	17,4
9	5,3	282,5	120,1	20,5	13,8	41,6	17,9
10	6,3	333,0	118,6	18,9	17,6	44,1	22,2
11	8,2	434,2	121,7	22,1	19,6	47,5	29,0
12	8,4	445,3	123,4	23,8	18,7	49,8	30,1
13	9,9	526,9	123,2	23,6	22,3	53,6	37,6

Tabela 5.18 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para p= 5 bar, v=0,39 kg/s e Tin=30°C

Pontos	q [kW]	q ¹ _{sim} [kW/m ²]	T _{sim} [°C]	[Δtsat] [°C]	h [kW/m ² -°C]	T _{vaso} [°C]	Kg [W/m-°C]
1	2,5	134,0	160,9	9,1	14,7	35,9	5,3
2	3,2	167,9	163,8	11,9	14,1	37,0	6,6
3	3,7	196,2	161,9	10,0	19,6	37,3	7,8
4	3,9	206,0	165,3	13,4	15,3	38,1	8,0
5	5,0	263,6	166,5	14,7	18,0	40,7	10,4
6	5,8	309,9	166,4	14,5	21,4	42,7	12,4
7	6,5	342,3	167,1	15,3	22,4	44,1	13,8
8	6,6	350,2	169,2	17,4	20,2	43,5	13,8
9	6,6	351,4	168,5	16,7	21,0	43,8	14,0
10	8,0	422,7	168,1	16,2	26,1	47,2	17,4
11	8,2	436,5	169,9	18,0	24,2	47,6	17,7
12	8,5	449,1	169,6	17,8	25,2	47,7	18,3
13	8,7	460,6	171,8	20,0	23,0	48,9	18,6
14	9,8	521,2	170,8	18,9	27,5	51,5	21,7
15	10,1	535,0	169,4	17,6	30,5	52,1	22,6
16	11,5	609,5	173,9	22,0	27,6	54,5	25,4
17	11,8	624,5	177,5	25,7	24,3	55,2	25,3
18	12,1	640,0	174,5	22,6	28,3	57,6	27,2
19	12,2	647,0	175,8	24,0	27,0	56,6	27,0
20	12,8	679,0	178,8	26,9	25,2	57,7	27,8
21	13,7	728,9	179,0	27,1	26,9	58,7	30,1
22	14,3	757,2	179,1	27,3	27,7	60,0	31,6
23	14,7	780,2	178,0	26,2	29,8	62,8	33,6
24	15,6	827,8	178,0	26,1	31,7	61,6	35,3
25	16,4	872,4	178,4	26,5	32,9	67,3	39,0

Tabela 5.19 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para p= 10 bar, v=0,39 kg/s e Tin=30°C

Pontos	q [kW]	q'' _{sim} [kW/m ²]	T _{sim} [°C]	[Δtsat] [°C]	h [kW/m ² -°C]	T _{vaso} [°C]	Kg [W/m-°C]
1	4,2	222,0	190,1	10,2	21,7	39,3	7,3
2	4,6	245,9	190,9	11,0	22,3	39,6	8,1
3	4,7	246,9	187,5	7,6	32,6	39,8	8,3
4	5,2	273,8	189,9	10,0	27,3	41,1	9,1
5	5,5	294,3	194,9	15,0	19,6	42,0	9,6
6	5,6	294,5	191,0	11,2	26,4	42,2	9,8
7	7,0	373,4	191,1	11,2	33,4	44,7	12,7
8	7,2	383,4	192,3	12,4	30,9	45,2	12,9
9	7,5	396,8	191,9	12,0	33,2	45,4	13,5
10	8,1	430,2	194,8	14,9	28,9	46,4	14,4
11	8,5	449,6	194,3	14,4	31,2	48,2	15,3
12	10,3	548,4	196,0	16,1	34,1	51,6	18,9
13	10,4	549,2	198,9	19,0	28,9	51,9	18,6
14	10,5	556,5	196,6	16,7	33,3	51,8	19,1
15	12,0	634,2	199,4	19,5	32,6	56,0	22,0
16	12,1	641,1	198,9	19,0	33,7	55,5	22,2
17	12,3	655,1	197,2	17,3	37,8	53,5	22,6
18	14,4	764,9	198,7	18,8	40,6	59,1	27,2
19	14,9	788,3	199,6	19,7	40,0	60,5	28,1
20	15,3	812,7	202,5	22,6	36,0	60,5	28,4
21	16,5	876,5	200,9	21,0	41,6	65,7	32,2
22	17,1	909,2	201,0	21,1	43,1	66,5	33,6
23	20,3	1074,8	202,3	22,4	47,9	74,2	41,7

Tabela 5.20 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para p= 40 bar, v=0,39 kg/s e Tin=30°C

Pontos	q [kW]	q'' _{sim} [kW/m ²]	T _{sim} [°C]	[Δtsat] [°C]	h [kW/m ² -°C]	T _{vaso} [°C]	Kg [W/m-°C]
1	8,5	452,0	261,0	10,9	41,4	47,5	10,5
2	9,2	489,4	260,7	11,9	41,1	50,0	11,5
3	9,6	506,8	261,2	12,1	41,9	50,2	11,9
4	10,1	533,4	261,2	12,0	44,3	51,4	12,6
5	11,7	621,6	262,6	13,3	46,6	55,4	14,8
6	12,1	641,3	263,2	11,9	54,1	58,1	15,6
7	12,3	651,1	263,5	11,1	58,4	56,7	15,8
8	14,2	753,8	263,5	13,5	55,7	60,6	18,4
9	16,7	887,0	262,0	14,4	61,5	65,0	22,0
10	19,9	1053,5	265,0	14,3	73,5	77,1	27,9
11	20,1	1064,7	264,8	14,4	73,8	76,5	28,1
12	25,0	1325,2	266,2	14,9	89,1	87,4	37,0

Tabela 5.21 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para p= 70 bar, v=0,39 kg/s e Tin=30°C

Pontos	q [kW]	q'' _{sim} [kW/m ²]	T _{sim} [°C]	[Δtsat] [°C]	h [kW/m ² -°C]	T _{vaso} [°C]	Kg [W/m-°C]
1	8,6	455,3	295,0	9,2	49,7	49,0	9,2
2	10,3	547,6	297,2	11,3	48,3	52,6	11,1
3	11,1	590,4	298,4	10,6	55,7	54,2	12,1
4	13,0	692,2	298,3	12,5	55,4	58,6	14,3
5	14,5	768,8	297,9	12,1	63,8	61,8	16,2
6	14,6	773,3	298,4	12,6	61,3	64,1	16,4
7	19,8	1050,7	299,4	13,6	77,4	77,9	23,6
8	25,7	1363,8	298,0	12,2	111,8	89,7	32,5
9	30,7	1630,9	299,4	13,5	120,4	99,8	40,6

Tabela 5.22 Determinação de h e Kg com Resultados Experimentais para p= 110 bar, v=0,39 kg/s e Tin=30°C

Pontos	q [kW]	q'' _{sim} [kW/m ²]	T _{sim} [°C]	[Δtsat] [°C]	h [kW/m ² -°C]	T _{vaso} [°C]	Kg [W/m-°C]
1	11,7	621,4	322,2	4,1	151,0	54,4	11,5
2	11,7	623,1	322,9	4,8	130,3	55,6	11,6
3	13,9	739,4	325,5	7,4	99,8	61,8	13,9
4	15,6	829,2	325,3	7,3	114,3	65,6	15,9
5	19,8	1048,7	323,1	5,0	211,0	74,4	20,9
6	24,3	1290,2	323,1	5,0	259,5	86,8	27,1
7	30,3	1606,6	323,6	5,5	292,2	102,4	36,1

5.6 Determinação das Faixas de Incertezas Associadas aos Resultados Experimentais

Este item apresenta as faixas de incertezas associadas aos valores de coeficiente de transferência de calor [h] e de condutância térmica global [Kg] relativas a cada condição operacional do dispositivo experimental. Estas avaliações de faixas de incertezas utilizaram valores do desvio padrão dos parâmetros experimentais medidos, a incerteza dos calibradores utilizados, o erro padrão do ajuste das curvas de calibrações do Anexo I e as expressões de propagação de incertezas em resultados descritas no Anexo II.

As incertezas associadas à geometria da cápsula simplificada e do simulador elétrico serão desprezadas em função das rigorosas tolerâncias especificadas nos respectivos projetos. Como exemplo, a espessura do vaso da pressão em AlMg₃, teve uma tolerância especificada de $4,2mm_{-0}^{+0,1}$.

As incertezas associadas às propriedades físicas da água também serão desprezadas tendo em vista as baixas incertezas da referência utilizada para levantamento destas propriedades específicas [Wagner e Kruse, 1998]. Como exemplo, para os valores de calor específico isobárico a referência consultada associa uma incerteza de $\pm 0,3\%$ do valores tabelados.

As determinações das incertezas associadas aos coeficientes de transferência de calor, h e K_g , são realizadas para cada valor de pressão ajustado na cápsula simplificada durante os experimentos realizados. Os resultados encontrados indicam que as maiores incertezas estão associadas aos valores de potência de início da ebulição nucleada para cada pressão ajustada. Na pressão de 1 bar e potência de 2 kW foi encontrada uma incerteza de $\pm 29\%$ para os valores dos coeficientes de transferência de calor obtidos a partir dos resultados experimentais. Para a potência máxima de 10 kW fornecida ao simulador elétrico durante os experimentos a 1 bar, foi encontrada uma incerteza de $\pm 6,8\%$. Para as demais pressões as incertezas de propagação máximas obtidas para h e K_g foram: 1 bar (29%), 5 bar (16%), 10 bar (10%), 40 e 70 bar (7,5%) e 110 bar (5,5%). Estes valores são condizentes com as incertezas encontradas para experimentos de ebulição, devendo ser citado o caso da correlação de Rohsenow que constitui a correlação mais empregada em estudos de ebulição nucleada e pode apresentar um desvio da ordem de até 100% na determinação do fluxo de calor por ebulição de vaso [Özisik, 1990] e [Incropera e Witt, 1992].

A análise das incertezas calculadas mostra que, basicamente, os valores encontrados são determinados pelas respectivas incertezas na medição da potência fornecida ao simulador elétrico, com as demais parcelas da equação de propagação de incertezas sendo desprezíveis. Em valores mais elevados de potência, começa a ter alguma influência as demais parcelas da equação de propagação de incertezas para os coeficientes de transferência de calor. Deve ser acrescentado que os valores considerados são aqueles cujas respectivas potências indicaram por meios teóricos o estabelecimento do regime de ebulição nucleada no interior da cápsula simplificada do dispositivo experimental.

Os valores de potência elétrica determinados durante os experimentos com o retificador de 16 kW, resultaram em valores ligeiramente superiores àqueles obtidos pela variação da entalpia na água de resfriamento. Como este retificador apresenta baixo nível de ripple, estas medidas elétricas são tecnicamente confiáveis e apresentam

reduzidas incertezas de propagação associadas devido aos baixos valores de incerteza para as tensões e as correntes elétricas medidas. Este resultado contrasta com as elevadas incertezas calculadas para as potências térmicas medidas por variação da entalpia da água de resfriamento. Estas incertezas elevadas são determinadas pelas pequenas diferenças de temperaturas entre a saída e a entrada da água de resfriamento. Mesmo com estas considerações a potência elétrica não foi adotada na determinação do fluxo de calor por não levar em consideração as perdas de calor na cápsula simplificada.

5.7 Interpretações dos Resultados Experimentais

Os experimentos foram realizados com dois retificadores. Para potências inferiores foi utilizado um retificador com capacidade de 16 kW e ripple máximo de 5%. Em potências superiores a 12 kW, foi utilizado um retificador de 1 MW, com percentual elevado de ripple. Esta característica reduz em muito a confiança nas medidas elétricas, apesar da utilização de multímetros de excelente qualidade para medir tensão e corrente elétrica *true-rms* e da utilização de instrumentos redundantes nessas medições para determinação da potência elétrica fornecida ao simulador elétrico pelos retificadores. A potência térmica medida diretamente pela variação da entalpia da água de resfriamento apresentou resultados inferiores aos valores da potência elétrica obtida pelas grandezas medidas pelos multímetros. Além disso, foi detectada uma pequena perda de calor na parte superior da cápsula simplificada, o que poderia estar determinando a diferença entre os dois princípios de medição. Baseado nestas considerações, foi adotada a potência medida pela variação da entalpia da água de resfriamento para o processamento dos parâmetros obtidos experimentalmente.

O simulador elétrico utilizado nos experimentos iniciais foi danificado acidentalmente quando submetido a pressões acima de 40 bar e temperaturas mais elevadas. A falha ocorreu na região do canal de fixação dos termopares na parede do tubo de revestimento do simulador, por brasagem. Dessa forma, a água pressurizada penetrou no interior do simulador elétrico causando fuga considerável da corrente elétrica de alimentação do simulador.

Os experimentos foram retomados com a instalação de um segundo simulador elétrico na cápsula simplificada, fabricado conforme o mesmo procedimento e com as operações executadas pelo mesmo operador que havia fabricado o simulador utilizado inicialmente. Estes critérios de fabricação certamente minimizaram diferenças

significativas entre os dois simuladores empregados durante os experimentos, fato este comprovado pelos testes preliminares realizados em uma cuba metálica na pressão atmosférica.

As condições de realização dos experimentos descritas acima não tiveram grande influência em seus resultados, fato demonstrado pelas curvas de comparação com valores determinados a partir das correlações empíricas utilizadas com sucesso em outros trabalhos técnicos no regime de ebulição nucleada. Algumas das correlações utilizadas neste trabalho foram desenvolvidas para o processo de ebulição convectiva, o que demonstra a eficiência do estabilizador de bolhas para transferência de potências térmicas mais elevadas numa geometria muito próxima da ebulição de vaso. Estas considerações são válidas, mesmo observando que os valores da diferença entre as temperaturas da parede e de saturação ΔT_{sat} obtidos para a parede externa do simulador elétrico foram, em alguns pontos experimentais, ligeiramente superiores aos valores calculados com as correlações utilizadas para comparação.

Durante os experimentos realizados na pressão de 1 bar foi possível acompanhar as oscilações da água no interior da cápsula simplificada através de uma mangueira transparente em comunicação com a pressão atmosférica. Foi constatado que as oscilações do nível da mangueira iniciam quando a potência alcança valores da ordem de 2 kW e, daí para frente, as oscilações do nível aumentam sua amplitude e sua frequência até atingirem seus valores mais elevados na potência limite de 10 kW utilizada na pressão de 1 bar.

Instabilidades do processo de ebulição foram indicadas no sistema de aquisição de dados para pressões de 5 e 10 bar, tendo sido observada oscilação simultânea e constante de todas as temperaturas do simulador, do vaso de pressão e da água de resfriamento. Na pressão de 10 bar foi observada instabilidade operacional na faixa de potência de 8 a 10 kW, com as temperaturas da cápsula simplificada oscilando de modo simultâneo e cíclico. Este comportamento da cápsula havia sido constatado anteriormente por Whitehouse (1976) e o restabelecimento da estabilidade do processo de transferência de calor naquela oportunidade foi atribuído ao estabilizador de bolhas de vapor utilizado em sua seção de testes.

Os experimentos realizados com o dispositivo experimental serviram como indicativo de bom desempenho para o processo de união por difusão entre os tubos de

ação inoxidável e a liga de alumínio empregados na fabricação do vaso de pressão, não tendo sido detectada nenhuma alteração mecânica significativa naquele componente.

Com base nos resultados experimentais apresentados nas tabelas e nos gráficos deste capítulo, as seguintes interpretações devem ser destacadas:

- as temperaturas na parede externa do revestimento do simulador elétrico indicadas nas Tabelas 5.1 a 5.6 e nos gráficos correspondentes, comprovam a eficiência do regime de ebulição nucleada para refrigeração da vareta combustível nuclear durante os testes de irradiação. Quando comparados a outros processos de transferência de calor, fica evidente pelos resultados experimentais que grandes quantidades de calor podem ser transferidas por ebulição nucleada a partir de pequenas elevações das temperaturas na superfície externa do simulador ΔT_{sat} .
- os resultados do superaquecimento ΔT_{sat} na parede externa do simulador elétrico apresentados nas Tabelas 5.8, a 5.13 demonstram que os valores experimentais deste parâmetro apresentam boa concordância com os valores obtidos por meio das correlações selecionadas na literatura especializada. As correlações de Jens e Lottes e de Foster e Zuber foram as que melhor se ajustaram aos resultados experimentais, o que permite validar os cálculos preliminares da fase de projeto básico do circuito de irradiação efetuados com a primeira correlação.
- os resultados do superaquecimento ΔT_{sat} na parede externa do simulador elétrico apresentados nas Tabelas 5.8 a 5.13 indicam também que os valores deste parâmetro tornam-se menores com o aumento da pressão dos experimentos, considerando um mesmo valor do fluxo de calor. A consequência desta redução do ΔT_{sat} com a pressão é um aumento no valor do coeficiente de transferência de calor por ebulição.
- deve-se destacar os elevados valores para os coeficientes de transferência de calor por ebulição nucleada na parede externa do simulador elétrico obtidos através de parâmetros medidos experimentalmente neste trabalho. Os valores dos coeficientes de transferência de calor (h) são apresentados nas Tabelas 5.17 a 5.22 e são compatíveis com os valores da Tabela 4.1 de referência. Analisando a cápsula simplificada como um sistema de transferência de calor com refrigeração primária por circulação natural constata-se que os valores de (h) encontrados experimentalmente correspondem a coeficientes de transferência de calor por

ebulição convectiva no interior de tubos. Dessa forma, o estabilizador de bolhas de vapor além de uniformizar o perfil de temperaturas sobre o simulador elétrico e de estabilizar o processo de ebulição nas pressões mais elevadas, possibilita também a operação da cápsula simplificada com valores de coeficientes de transferência de calor simplificada superiores aos obtidos para ebulição em vaso.

- as Tabelas 5.17 a 5.22 apresentam os valores da condutância térmica global (Kg) na região compreendida entre a parede externa do simulador elétrico e a parede interna do vaso. Esta condutância determinada através de parâmetros medidos experimentalmente neste trabalho apresentou valores que correspondem à condutividade térmica de materiais bons condutores de calor. Os resultados obtidos serão utilizados para ajuste de curvas a serem empregadas no projeto e em previsões do comportamento térmico da cápsula de irradiação durante os testes de irradiação.
- as Tabelas 5.14 a 5.16 e os gráficos 5.19 a 5.21 possibilitam avaliar o efeito da variação da temperatura de entrada da água de resfriamento na cápsula simplificada sobre as temperaturas na parede externa do simulador elétrico e na parede interna do vaso de pressão. Os experimentos foram realizados com a temperatura da água de resfriamento na entrada da cápsula simplificada ajustada no seu valor limite de operação de 40°C e, fica evidente, que esta variável não tem influência significativa nas temperaturas do simulador elétrico. Em relação às temperaturas do vaso de pressão, a elevação de seus valores é quase que igual à elevação na temperatura da água de resfriamento. Estas afirmações são evidentes nos gráficos apresentados para as pressões de 1, 5 e 10 bar e constituem uma comprovação experimental para validação do critério de projeto adotado para o sistema de proteção do circuito de irradiação.
- as temperaturas na parede interna do vaso de pressão apresentadas nas Tabelas 5.1 a 5.6 para as potências máximas ajustadas para cada pressão dos experimentos, indicam que os valores desta variável não ultrapassam o limite de 122°C estipulado no item 3.4.2 [ASME, 1992] como a temperatura acima da qual é iniciado o processo de instabilidade metalúrgica da liga AlMg₃, sob radiação ionizante.

5.8 Conclusão

Este capítulo apresentou os resultados experimentais e uma interpretação dos mesmos, com ênfase na aplicação destes resultados ao projeto de engenharia e à operação de circuito de irradiação CAFE-Mod1.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

A refrigeração por ebulição de um fluido é empregada em circuitos de irradiação para assegurar pleno controle da temperatura sobre a vareta combustível em teste e para reduzir as dimensões da cápsula de irradiação. A elaboração de um modelo para a cápsula de irradiação requer um bom conhecimento teórico dos diversos fenômenos físicos envolvidos e a determinação experimental dos parâmetros que influenciam no comportamento e na eficiência térmica do circuito de irradiação. Este trabalho de tese teve como objetivo principal a determinação experimental dos parâmetros de refrigeração por ebulição nucleada confinada para o Circuito de Irradiação a Água Fervente CAFE-Mod1.

A refrigeração primária por ebulição nucleada confinada ocorre, no circuito de irradiação CAFE-Mod1, com o fenômeno de ebulição modificado pela presença de um conjunto de discos metálicos horizontais. Estes discos têm a função de direcionar radialmente o trajeto das bolhas de vapor entre seu local de origem, na superfície externa do simulador elétrico, e sua condensação na superfície interna do vaso de pressão. Não foi encontrada na literatura especializada nenhuma correlação empírica que se aplique, sem restrições, à situação em estudo. A realização dos experimentos para determinação dos parâmetros de refrigeração do circuito de irradiação CAFE-Mod1 exigiu o desenvolvimento e a implementação de um dispositivo experimental para representar o circuito de irradiação e de um simulador elétrico para representar a vareta combustível nuclear. Por limitações técnicas do simulador elétrico, os experimentos realizados atingiram 80% do fluxo de calor crítico teórico estimado para a cápsula simplificada somente nas pressões inferiores de 1, 5 e 10 bar.

Os experimentos realizados mostraram um desempenho satisfatório do processo desenvolvido para união entre o tubo de aço inoxidável e o tubo de liga de alumínio que formam o vaso de pressão da cápsula simplificada. Este componente foi submetido a ciclagem de pressão e de temperatura ajustados para realização dos experimentos e não apresentou qualquer indicativo de comprometimento de sua integridade mecânica. Esta validação deverá ser complementada, posteriormente, para as pressões e as temperaturas mais elevadas de operação do circuito de irradiação e com a presença das radiações ionizantes.

O simulador elétrico demonstrou durante os experimentos que o posicionamento dos seus termopares nos canais perfurados na parede de seu revestimento dificulta o conhecimento da localização exata da sua junta de medição. A esta conclusão deve ser acrescentado que os dois simuladores utilizados durante os experimentos foram danificados por falha na brasagem dos termopares quando a cápsula simplificada foi submetida a pressões e temperaturas mais elevadas.

Os resultados experimentais confirmaram que o processo de refrigeração por ebulição nucleada confinada ocorre com elevados valores de fluxo de calor sendo transferidos com reduzido superaquecimento da superfície externa do simulador. A interpretação dos resultados experimentais mostra também que o superaquecimento da superfície externa do simulador torna-se menor com a elevação da pressão ajustada na água pressurizada da cápsula simplificada. Estas conclusões são de grande importância para os testes de irradiação, pois indicam que a superfície externa da vareta combustível nuclear fica submetida a temperaturas uniformes durante os testes de irradiação.

A partir dos resultados experimentais foram determinados valores para a condutância térmica Kg na região entre o simulador elétrico e o tubo de pressão da cápsula simplificada, o que possibilita o conhecimento do superaquecimento na parede externa da vareta combustível nuclear para cada condição experimental estudada. A temperatura na parede externa do revestimento da vareta combustível é um dos parâmetros mais importante a ser fixado durante um teste de irradiação.

Os resultados experimentais comprovaram, ainda, que nas condições nominais de operação do circuito de irradiação CAFE-Mod1 é possível irradiar varetas combustíveis nucleares com uma potência térmica linear da ordem de 500 W/cm sem que a temperatura da parede interna do vaso de pressão alcance o limite de projeto definido para proteção da liga de $AlMg_3$ contra instabilidade metalúrgica.

Em relação aos valores das incertezas determinados para os coeficientes de transferência de calor deve ser comentado que os mesmos são condizentes com valores esperados para experimentos de ebulição descritos na literatura especializada.

Como sugestões de novos trabalhos para continuidade dos estudos de ebulição utilizando o estabilizador de bolhas de vapor, podem ser mencionados:

- a necessidade de uma avaliação experimental do efeito da variação da distância vertical entre os discos guias do estabilizador de bolhas sobre o desempenho do mesmo, pois nos experimentos realizados foi respeitada a distância proposta em duas referências do trabalho [Reichardt e Neumann, 1968] e [Whitehouse, 1976];
- o desenvolvimento de um simulador elétrico de aquecimento direto e com os termopares posicionados no interior de seu tubo de revestimento seria de grande utilidade na execução de novos experimentos sobre ebulição. Recomenda-se a utilização de um retificador de reduzido *ripple* em toda a faixa de potência e com a possibilidade de operação por software;
- a necessidade de uma avaliação experimental do fluxo de calor crítico para levantamento dos limites térmicos admitidos para a cápsula de irradiação;
- o desenvolvimento de um modelo numérico para utilização em projeto e em previsão de comportamento térmico e hidráulico da cápsula de irradiação com diferentes dimensões, formas e materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atkinson, J. R.; Rigg, S. Design of Irradiation Experiments. Mechanical Engineering. p. 69-85, January-1962.
- Baird, David Carr. Experimentation: An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design. Prentice-Hall: New Jersey, 1995.
- Berenson, P., J. Experiments on Pool Boiling Heat Transfer. Int. J. Heat Mass Transfer, v. 5, p. 985-999, 1962.
- Bhat, A.,M.; Prakash, R.; Saini, J.,S. Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling at High Heat Flux. Int. J. Heat Mass Transfer, v. 26, n. 6, p. 833-840, 1981.
- Bonjour, J.; Lallemand, M. Flow Patterns During Boiling in a Narrow Space Between Two Vertical Surfaces. International Journal of Multiphase Flow, v. 24, p. 947-960, 1998.
- Carey, Van. P. Liquid-vapor Phase-change Phenomena. Hemisphere Publishing Corporation: USA, 1992.
- Catálogo Goodfellow, 1996/97.
- Celata, Gian Piero; Cumo, Maurizio; Mariani, Andrea. Experimental Evaluation of the Onset of Subcooled Flow Boiling at Liquid Velocity. International Journal of Heat and Mass Transfer. v. 40, p. 2879-2885, 1996.
- Chai, L. H.; Peng, X. F.; Wang, B. X. Nonlinear Aspects of Boiling Systems and a New Method for Predicting the Pool Nucleate Boiling Heat Transfer. International Journal of Heat and Mass Transfer. v. 43, p. 75-84, 2000.
- Chang, Soon Heung; Baek, Won-Pil; Bae, Tae Min. A Study of Critical Heat Flux for Low Flow of Water in Vertical Round Tubes under Low Pressure. Nuclear Engineering and Design. v. 132, p. 225-237, 1991.
- Cheng, X; Erbacher, F. J.; Müller, U. Critical Heat Flux in Uniformly Heated Vertical Tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer. v. 40, p. 2929-2939, 1997.
- Chowdhury, S. K.R.; Winterton, R. H. S. Surface Effects in Pool Boiling. Int. J. Heat Mass Transfer, v. 28, n. 10, p. 1881-1889, 1985.
- Chyu, M.-C.; Bergles, A. E. Thermal Analysis of the Electrically Heated Cylindrical Test Section for Heat Transfer Experiments. Experimental Thermal and Fluid Science.

v. 1, p. 19-27, 1988.

Comissão Nacional de Energia Nuclear. Garantia da Qualidade na Aquisição, Projeto e Fabricação de Elementos Combustíveis. Norma Técnica Cnen 1.27. Rio de Janeiro, 1999.

Coleman, Hugh W. Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers. John Wiley & Sons: New York, 2. ed., 1999.

Collier, J.G.; Thome, J. R. Convective Boiling and Condensation. Mc.Graw-Hill: Oxford, 1994.

Costa, A. C. L. ; Esteves, F. A. ; Dias, M. S. Circuito de Irradiação a Água Fervente para Irradiação de Varetas Combustíveis Tipo PWR. Anais do VI CGEN, Rio de Janeiro, abril de 1996.

Costa, A C. L., Maraslis, A. A, Esteves, F. A , Lima, V. M., Silva, L. L. Descrição do Circuito a Água Fervente CAFE-Mod1. CDTN/CTMSP, R22.10-3101-MS-01, 1998.

Costa, A. C. L. ; Esteves, F. A.; Dias, M. S; Mattos, J. R. L., Projeto Integrado de Irradiação para Qualificação de Varetas Combustíveis Tipo PWR. Anais do XI ENFIR/IV ENAN. Proceedings, Poços de Caldas, agosto de 1997.

Costa A. C. L. ; Esteves, F. A.; Dias M. S; Mattos, J. R. L. Projeto Brasileiro de Irradiação: Programa Experimental de Validação do Circuito de Irradiação CAFE-Mod1. Anais do VII CGEN, Belo Horizonte, setembro de 1999.

Dieck, Ronald H. Measurement Uncertainty: Methods and Applications, a Guide to Estimating and Understanding the Accuracy of Test and Experimental Data. Instrument Society of America: Research, Triangle Park, 2. ed., 1997.

El-Wakil, M. M. Nuclear Heat Transport. International Textbook Company: New York, 1971.

Faber, E.A.; Scoriah. R.L. Heat Transfer to Water Boiling under Pressure. Trans ASME v. 70: p. 369-385, 1948.

Fink, Donald G.; Beatt, H. Wayne. Standard Handbook for Electrical Engineers. McGraw-Hill: New York, 1978.

Freund, Rudolf Jakob. Regression Analysis: Statistical Modeling of a Response Variable. Academic Press: San Diego, 1998.

- Glasstone, Samuel. Nuclear Reactor Engineering. Chapman & Hall: New York, 1994.
- Han, C. Y.; Griffith, P. The Mechanism of Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling. Int. J. Heat Mass Transfer, v. 8, p. 888-904, 1965.
- Hasan, A.; Roy, R. P. Experiments on Subcooled Flow Boiling Heat Transfer in Vertical Annular Channel. International Journal of Heat and Mass Transfer. v.33, p. 2285-2293, 1990.
- Holman, J. P. Experimental Methods for Engineers. McGraw Hill: Boston, 7. ed., 2001.
- Holman, J. P. Heat Transfer. McGraw Hill: New York, 6 ed., 1987.
- Incropera, F. P. ; Witt, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. LTC:, Rio de Janeiro, 1998.
- Katto, Y.; Yokoya, S. Principal Mechanism of Boiling Crisis in Pool Boiling. Int. J. Heat Mass Transfer, v. 11, p. 993-1002, 1968.
- Kennedy, T. D.A.; McAllister, S.; Markgraf, J.; Ruyler, I. A. Development of a Two-dimensional Computer Code for the Prediction of Two-phase Heat Transfer in Experimental Light Water Reactor Irradiation Capsule. Nuclear Energy, v. 30, n. 3, p. 165-172, 1991.
- Kim, Hong Chae; Baek, Won-Pil; Chang, Soon Heung. Critical Heat Flux of Water in Vertical Round Tubes at Low Pressure and Low Flow Conditions. Nuclear Engineering and Design. v. 199, p. 49-73, 2000.
- Kjarrerheim, Gudolf. Heat Transfer as Limiting Factor in Water-cooled Nuclear Reactors. Nuclear Engineering and Design. v. 21, p. 279-302, 1972.
- Kline, S. J.; McClintock, F. A. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. Mechanical Engineering. 3-8, 1953.
- Lee, Young Shin; Choi, Myoung Hwan; Kang, Young Hwan. Thermal and Mechanical Characteristics of an Instrumented Capsule for a Material Irradiation Test. Nuclear Engineering and Design. v. 205, p. 205-212, 2001.
- Levine, David M.; Berenson, Mark L.; Stephan, David. Estatística: Teoria e Aplicações Usando Microsoft Excel em Português. Tradução Tereza Cristina Padilha de Souza. LTC: Rio de Janeiro. 2000.
- Levy, S. Generalized Correlations of Boiling Heat Transfer. Journal of Heat Transfer, v.

02 n. 39, p. 37-42, 1959.

McAnemy, R. S. Design of Irradiation Experiments for Materials Testing Reactors, Irradiation Facilities for Research Reactors. p. 3-7, 1973.

Mikheyev, M. Fundamentals of Heat Transfer. Peace Publishers, Moscow, 1994.

Mudawar, I.; Bowers, M.B. Ultra-high Critical Heat Flux (CHF) for Subcooled Water Flow Boiling. Nuclear Engineering and Design, v. 42, n. 8, p. 1405-1428, 1999.

Oberkampf, W. L. What are Validatin Experiments. Experimental Techniques, p. 35-40, 2001.

Obertelli, J.D.; Lee, D.H. An Experimental Investigation of Burnout with Forced Convection High-Pressure Water. Proceeding Institution of Mechanical Engineers, 1966.

Olekhnovitch, A.; Teyssedou, A.; Tye, P. Critical Heat Flux in a Vertical Tube at Low and Medium Pressures. Nuclear Engineering and Design, v. 193, p. 73-89, 1999.

Özisik, M. Necati. Transferência de Calor: um texto básico. Tradução Luiz de Oliveira. Editora Guanabara: Rio de Janeiro, 1990.

Ozkul, Tarik. Data Acquisition and Process Control Using Personal Computers. Marcel Dekker Inc.: New York, 1996.

Reichardt, K.; Neumann, M. Irradiation of Water-cooled Fuel Rods in Boiling Water Loops. Kerntechnik: the Journal for Nuclear Engineers and Scientists. n. 6, p. 331-337, 1968.

Stephan, Karl ; Abdelsalam, M. Heat-Transfer Correlations for Natural Convection Boiling. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 23, p. 73-87, 1980.

Stephan, K.; Auracher, H. Correlations for Nucleate Boiling Heat Transfer in Forced Convection. Nuclear Engineering and Design, v. 24, n.1, p. 99-107, 1981.

Tantolin, Christian. Refroidissement de Composants Electroniques de Puissance par Immersion dans um Fluide Dielectrique: Etude dès Echanges par Ebullition/ Condensation/ Convection. These pour obtenir Le Grade de Docteur, MEGA, 1994.

Teyssedou, A.; Olekhnowitch, A.; Tapucu, A.; Champagne, P.; Groeneveld, D. Critical Heat Flux Data in a Vertical Tube at Low and Medium Pressures. Nuclear Engineering and Design. v. 149, p. 185-194, 1994.

- The American Society of Mechanical Engineers. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II Materials, Part D- Properties. New York, 1992.
- Tong, L. S.; Tang, Y. S. Boiling Heat Transfer and Two-phase Flow. Taylor & Francis: Washington, 1997.
- Tong, L. S. Boiling Crisis and Critical Heat Flux, U. S. Atomic Energy Commission, Oak Ridge, Tennessee, 1972.
- Tong, L. S.; Weisman, Joel. Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors. American Nuclear Society: Illinois, 3. ed., 1996.
- Tszeng, T. C.; Saraf, V. A Study of Fin Effects in the Measurement of Temperature Using Surface-Mounted Thermocouples. Transactions of the ASME. v. 125, p. 926-935, 2003.
- Usmani, M. Khalid; Siddiqui, M. Altamush; Alam, S. S.; Jairajpuri, A. M.; Kamil, M. Heat Transfer Studies During Natural Convection Boiling in Internally Heated Annulus. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 46, p. 1085-1095, 2003.
- Veyrat, J.F.; Michel, F. PWR Irradiations Facilities in a CEA Experimental Reactors. American Nuclear Society, Proceedings, v.1, p. 202-209, 1990.
- Wagner, W.; Kruse, A. Properties of Water and Steam – The Industrial Standard IAPWS-IF97 for the Thermodynamics Properties. Springer, Berlin, 1998.
- Watt, John H. American Electricians` Handbook. 9. ed. McGraw-Hill: New York, 1970.
- Whitehouse, J. C. Investigations into Guided Boiling. M. A. Thesis, University of New South Wales, 1976.
- Whitehouse, J. C. Pool Boiling from a Vertical Rod Using Guide Disks. Proceedings of the Fifth International Topical Meeting on Reactor Thermal Hydraulics. Salt Lake City, UT. ANS, p. 981-989, 1992.
- Yao, S.; Chang, Y. Pool Boiling Heat Transfer in a Confined Space. Int. J. Heat Mass Transfer, v. 26, n. 6. p. 841-848, 1983.

ANEXO I - CALIBRAÇÕES PARA AS CADEIAS DE MEDIÇÕES

Este anexo apresenta as equações das curvas ajustadas para correção dos erros sistemáticos das medições efetuadas durante os experimentos. Estas equações foram obtidas a partir da fixação dos valores das variáveis medidas nos instrumentos de calibração descritos no item 3.6 e as indicações pelas respectivas cadeias do sistema de aquisição de dados do dispositivo experimental. Após um intervalo de tempo apropriado para estabilização dos processos físicos sendo medidos, um registro de 2 minutos foi arquivado na memória do microcomputador para posterior levantamento de valores médios e determinação das equações das curvas de calibração para cada faixa de operação prevista para a variável a ser medida.

• Calibração de Temperatura

A Figura I.1 mostra o banho térmico e o esquema de ligação dos termopares ao sistema de aquisição de dados para calibração de toda a cadeia de medição.

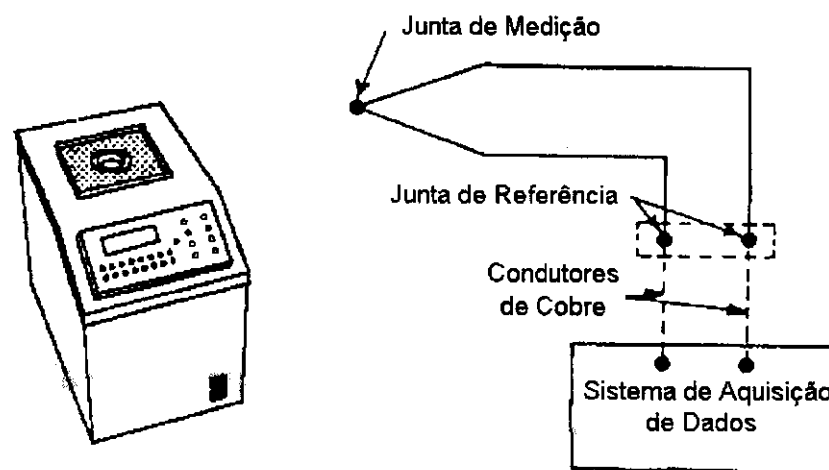


Figura I.1 Banho Térmico e Ligação dos Termopares para Calibração

Utilizando como padrão de calibração o banho térmico tipo bloco seco T-650P, as cadeias de medida com termopares foram calibradas conforme as suas respectivas faixas de utilização: 50°C a 500°C para os termopares dos simuladores elétricos A e C, 30°C a 200°C para os termopares do vaso de pressão e 26°C a 80°C para os termopares de entrada e saída da água de resfriamento na cápsula simplificada. Para cada cadeia de

medição do dispositivo experimental foi determinada uma curva ajustada de calibração, expressa pela equação 3.4.

Na Tabela I.1 são apresentados os coeficientes a e b da curva de calibração, o coeficiente de correlação R^2 e o erro padrão de ajuste da curva de calibração SC para cada uma das cadeias de medições iniciadas pelos termopares do vaso de pressão.

Tabela I.1 Parâmetros das Curvas de Calibração para os Termopares do Vaso de Pressão

<i>TERMOPAR</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	SC ($^{\circ}C$)
TE01	1,0015	-0,7143	1	0,1724
TE02	0,9983	-0,2577	0,9999	0,2179
TE03	1,0007	-0,5907	1	0,3864
TE04	0,9983	-0,1481	1	0,6692

Na Tabela I.2 são apresentados os coeficientes a e b da curva de calibração, o coeficiente de correlação R^2 e o erro padrão de ajuste da curva de calibração SC para cada uma das cadeias de medições iniciadas pelos termopares do simulador elétrico A.

Tabela I.2 Parâmetros das Curvas de Calibração para os Termopares do Simulador Elétrico A

<i>TERMOPAR</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	SC ($^{\circ}C$)
TE02A	1,0027	-0,7847	0,9999	0,5069
TE04A	1,0027	0,7847	1	0,4937
TE06A	1,0058	0	1	0,5002
TE08A	1,0035	0,6938	0,9999	0,5121

Na Tabela I.3 são apresentados os coeficientes a e b da curva de calibração, o coeficiente de correlação R^2 e o erro padrão de ajuste da curva de calibração SC para cada uma das cadeias de medições iniciadas pelos termopares do simulador elétrico C.

Tabela I.3 Parâmetros das Curvas de Calibração para os Termopares do Simulador Elétrico

<i>TERMOPAR</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>SC (°C)</i>
TE02A	0,9973	-1,4958	1	0,5878
TE04A	0,9976	-1,6099	1	0,5371
TE06A	0,9979	-1,4584	1	0,4823
TE08A	0,9982	-1,5812	0,9999	0,4838

Na Tabela I.4 são apresentados os coeficientes *a* e *b* da curva de calibração, o coeficiente de correlação R^2 e o erro padrão de ajuste da curva de calibração *SC* para cada uma das cadeias de medições iniciadas pelos termopares localizados na entrada e na saída da água de resfriamento da cápsula simplificada.

Tabela I.4 Parâmetros das Curvas de Calibração para os Termopares da Água de Resfriamento

<i>TERMOPAR</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>SC (°C)</i>
TE09	1,0073	-0,1609	0,9999	0,2446
TE10	1,0037	-0,0418	0,9999	0,2376

- **Calibração de Transmissores de Pressão**

Foi utilizado como padrão para os transmissores de pressão o calibrador PC-5071 equipado com cápsulas de pressão de 15, 500 e 3000 Psi e uma bomba hidráulica portátil BY-8112-3000 para geração da pressão desejada. O transmissor de pressão absoluta do sistema de refrigeração primária foi calibrado de 0 a 120 bar e o transmissor de pressão diferencial para medição do nível de água no pressurizador foi calibrado de 0 a 110 mbar.

Na Figura I.2 está representado um esquema de interligação entre a bomba de geração de pressão, o calibrador de pressão, um transmissor de pressão e o sistema de aquisição de dados. Para cada cadeia de medição do dispositivo experimental foi determinada uma curva ajustada de calibração, expressa pela equação 3.4.

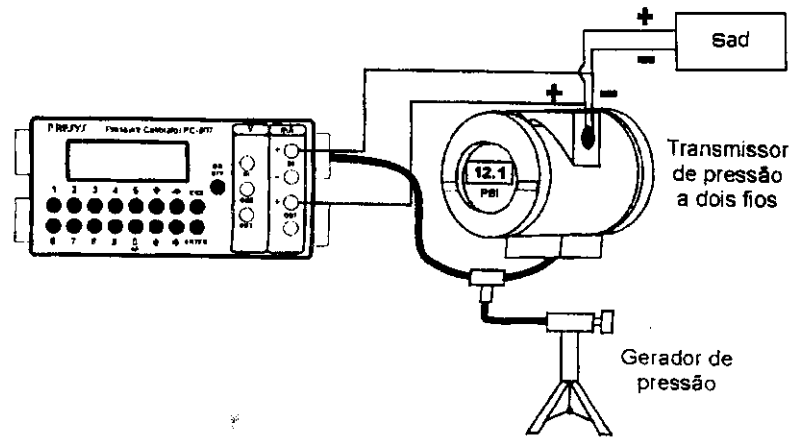


Figura I.2 Esquema da Interligação dos Transmissores de Pressão para Calibração

Na Tabela I.5 são apresentados os coeficientes a e b da curva de calibração, o coeficiente de correlação R^2 e o erro padrão de ajuste da curva de calibração SC para cada uma das cadeias de medições iniciadas pelos transmissores de pressão e de vazão.

Tabela I.5 Parâmetros das Curvas de Calibração para os Transmissores de Pressão e Vazão

<i>Transmissor</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>SC</i>
PT16	0,9734	-0,0131	0,9981	0,6221
LT15	0,9925	0,0131	0,9996	0,0265
FT18	1,0015	-0,0034	1	0,1756

O medidor de vazão mássica por efeito Coriolis foi calibrado pelo seu fabricante na faixa de 16,5 g/s a 410 g/s, utilizando como padrão de calibração uma balança de precisão.

Os instrumentos de medição de variáveis elétricas foram calibrados pelos respectivos fabricantes: multímetros Fluke True-rms modelo 189 com incerteza de 0,4% da leitura e Alicates digitais marca Polimed modelo PM-3400 com incerteza para corrente true-rms de 2% da leitura. Para as medidas de corrente elétrica com o multímetro Fluke foram utilizados resistores shunt de 600A/60mV e 2000A/300mV, com precisão de 0,5% da escala.

ANEXO II - EXPRESSÕES PARA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS

A determinação de incerteza das variáveis medidas é efetuada com a expressão 3.5, considerando a incerteza do calibrador, o erro padrão da curva ajustada para calibração e o desvio padrão em relação a média do conjunto de registros efetuados pelo sistema de aquisição de dados após a estabilização da grandeza física sendo medida.

Os cálculos efetuados com os resultados de diversas variáveis experimentais medidas devem ter a propagação de incertezas avaliadas a partir das incertezas consolidadas das medidas experimentais, das incertezas das propriedades físicas dos fluidos e dos materiais utilizados e das incertezas dimensionais dos processos de fabricação. Neste trabalho, as incertezas decorrentes das propriedades físicas da água e do vapor serão sempre desprezadas em face da bibliografia utilizada apresentar as incertezas para as diversas variáveis com valores inferiores aos valores da variáveis medidas durante os experimentos.

Supondo que um conjunto de medições experimentais tenha sido realizado para determinação de um resultado R de uma variável, sendo R função das variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ e da qual devemos avaliar a incerteza w_R . Sendo assim:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad [\text{II.1}]$$

e sua incerteza pode ser avaliada por [Holman, 2001]:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad [\text{II.2}]$$

onde $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ são as incertezas consolidadas das medidas experimentais das variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

– Incerteza no resultado da energia transferida Q

Aplicando a expressão II.2 para determinação da propagação de incerteza na equação de cálculo da potência térmica transferida para a água de resfriamento da cápsula simplificada:

$$Q = \dot{m} c_p (T_m - T_{out}) \quad \text{[II.3]}$$

onde Q é o calor transferido em [W], \dot{m} é a vazão da água de resfriamento [kg/s], c_p é o calor específico da água a pressão constante [J/kg.K], T_m é a temperatura da água de resfriamento na entrada da cápsula simplificada em [°C] e T_{out} é a temperatura da água de resfriamento na saída da cápsula simplificada em [°C].

A expressão para a incerteza relativa (w_Q / Q) é:

$$\frac{w_Q^2}{Q^2} = \frac{w_m^2}{\dot{m}^2} + \frac{w_{T_{out}}^2}{(T_{out} - T_m)^2} + \frac{w_{T_m}^2}{(T_{out} - T_m)^2} \quad \text{[II.4]}$$

onde w_m , $w_{T_{out}}$ e w_{T_m} são as incertezas absolutas das variáveis medidas, desprezando a incerteza absoluta do calor específico da água.

– Incerteza no resultado da potência elétrica P

Aplicando a expressão II.2 para determinação da propagação de incerteza para equação de cálculo da potência elétrica fornecida ao simulador elétrico:

$$P = \frac{EI}{\pi DL} \quad \text{[II.5]}$$

onde P é potência elétrica fornecida ao simulador elétrico e transferida como fluxo de calor para a água de resfriamento da cápsula simplificada [W/m²], E é a diferença de tensão elétrica sobre o elemento resistivo do simulador elétrico [V], I é a corrente elétrica que percorre o elemento resistivo do simulador elétrico [A], D é o diâmetro externo do simulador elétrico [m] e L é o comprimento do elemento resistivo do simulador elétrico [m].

A expressão para a incerteza relativa (w_p / P) é:

$$\frac{w_p^2}{P^2} = \frac{w_E^2}{E^2} + \frac{w_I^2}{I^2} + \frac{w_D^2}{D^2} + \frac{w_L^2}{L^2} \quad [\text{II.6}]$$

onde w_E, w_I, w_D e w_L são as incertezas absolutas das variáveis medidas.

– Incerteza no resultado do coeficiente de transferência de calor h

Aplicando a expressão II.2 para determinação da propagação de incerteza para equação de cálculo do coeficiente de transferência de calor no regime de ebulição nucleada:

$$h = \frac{Q}{\pi DL(T_S - T_{SAT})} \quad [\text{II.7}]$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor no regime de ebulição nucleada [W/m^2 °C], Q é o calor transferido [W], D é o diâmetro externo do simulador elétrico [m], L é o comprimento do elemento resistivo do simulador elétrico [m], T_S é a temperatura da parede externa do simulador elétrico [°C] e T_{SAT} é a temperatura de saturação para a água na pressão do experimento [°C].

A expressão para a incerteza relativa (w_h / h) é:

$$\frac{w_h^2}{h^2} = \frac{w_Q^2}{Q^2} + \frac{w_D^2}{D^2} + \frac{w_L^2}{L^2} + \frac{w_{T_S}^2}{(T_S - T_{SAT})^2} + \frac{w_{T_{SAT}}^2}{(T_S - T_{SAT})^2} \quad [\text{II.8}]$$

onde w_Q, w_D, w_L, w_{T_S} e $w_{T_{SAT}}$ são as incertezas absolutas das variáveis medidas.

- Incerteza no resultado da condutância térmica global K_g

Aplicando a expressão II.2 para determinação da propagação de incerteza na equação de cálculo da condutância térmica:

$$K_g = \frac{Q \ln(r_i / r_e)}{2\pi L(T_s - T_v)} \quad [\text{II.9}]$$

onde K_g é a condutância térmica na região do estabilizador de bolhas de vapor determinada a partir das medições experimentais [W/m°C], Q é o calor transferido em [W], r_i é o raio interno do vaso de pressão [m], r_e é o raio externo do simulador elétrico [m], L é o comprimento aquecido do elemento resistivo do simulador elétrico [m], T_s é a temperatura da parede externa do simulador elétrico [°C] e T_v é a temperatura da parede interna do vaso de pressão da cápsula simplificada [°C].

A expressão para a incerteza relativa (w_{K_g} / K_g) é:

$$\frac{w_{K_g}^2}{K_g^2} = \frac{w_Q^2}{Q^2} + \frac{w_{r_i}^2}{(r_i \ln(r_i / r_e))^2} + \frac{w_{r_e}^2}{(r_e \ln(r_i / r_e))^2} + \frac{w_{T_s}^2}{(T_s - T_v)^2} + \frac{w_{T_v}^2}{(T_s - T_v)^2} \quad [\text{II.10}]$$

onde $w_Q, w_{r_i}, w_{r_e}, w_{T_s}$ e w_{T_v} são as incertezas absolutas das variáveis medidas.

ANEXO III - FOTOS DO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

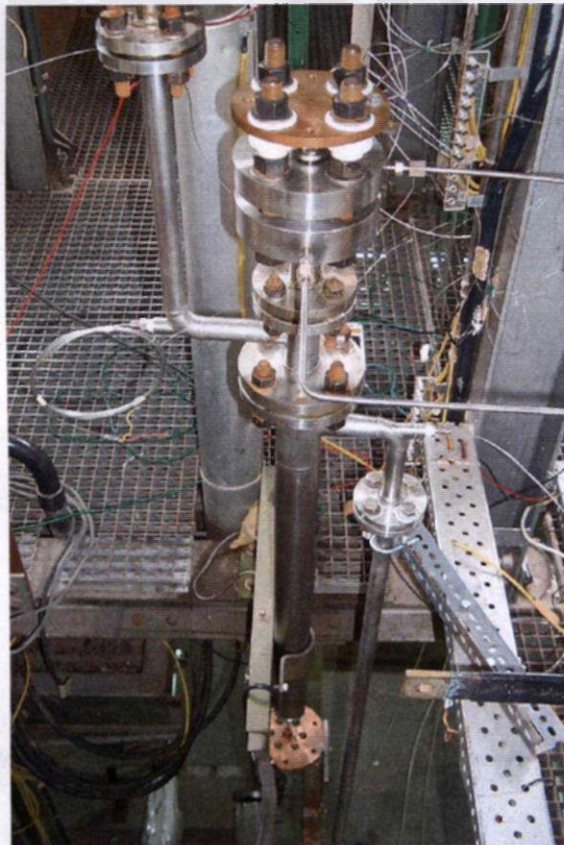


Foto da Cápsula Simplificada do Dispositivo Experimental

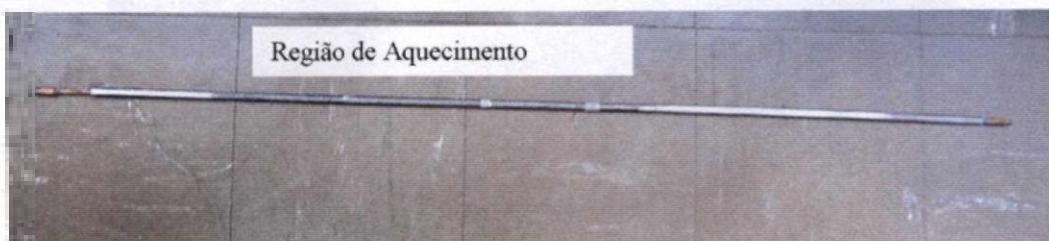


Foto do Simulador Elétrico Após uma Série de Experimentos



Simulador Elétrico na Cuba sob Ebulição Plena

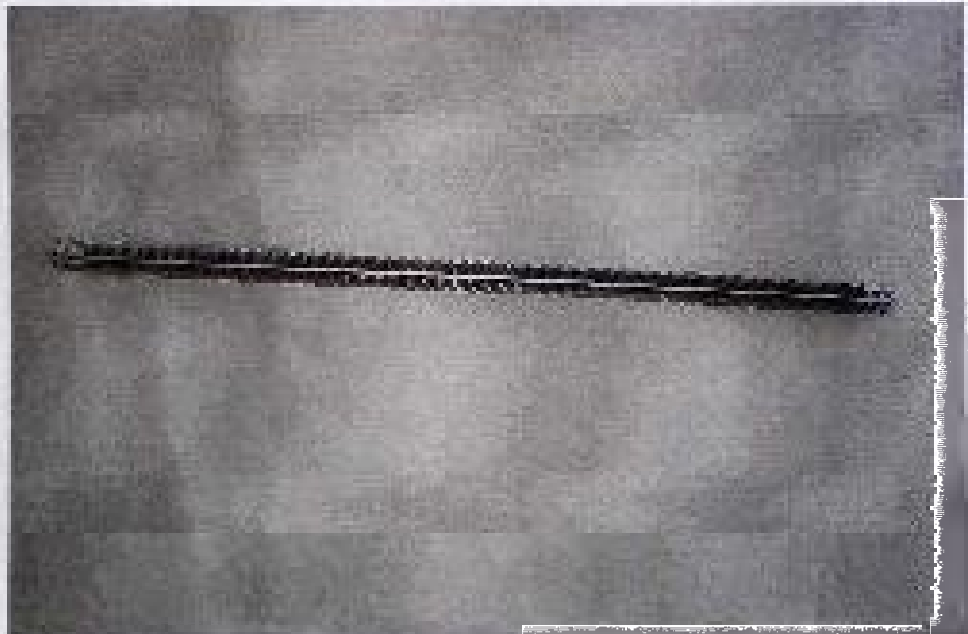


Foto do Estabilizador de Bolhas de Vapor



Solda por Difusão no Vaso de Pressão



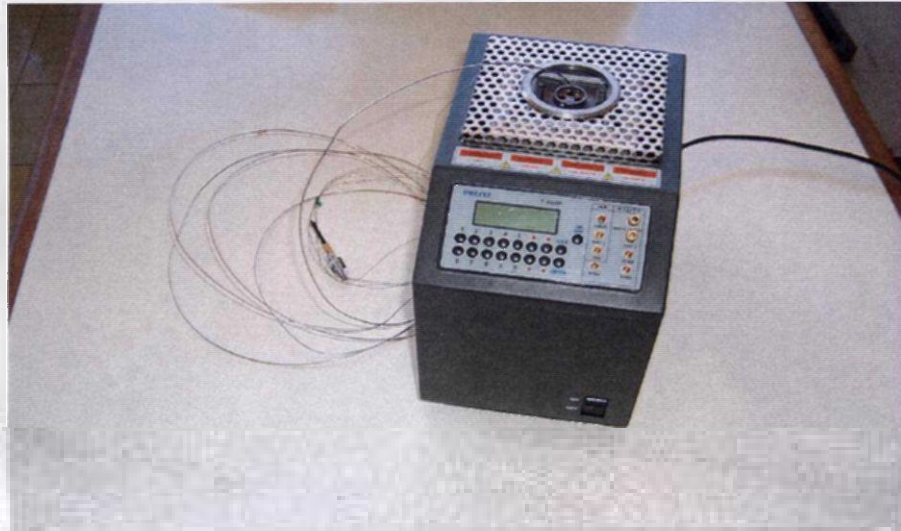
Radiografia de um Termopar Tipo K Bainha de 0,5 mm



Medidor de Vazão por Efeito Coriolis



Transmissores e Calibrador de Pressão



Banho Térmico Tipo Seco para Calibração de Temperatura

■



Multímetros para Medição da Potência Elétrica Fornecida ao Simulador