INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**CONTROLE DE SISTEMAS PASSIVOS DE RESFRIAMENTO DE EMERGÊNCIA
DE REATORES NUCLEARES POR MEIO DE LINHAS DE DESVIO**

LUIZ ALBERTO MACEDO

**Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para
obtenção do grau de Mestre em
Ciências na Área de Reatores
Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível
Nuclear.**

Orientador:

Dr. Benedito Dias Baptista Filho

SÃO PAULO

2001

*À minha esposa Maria Aparecida, pelo amor, carinho, dedicação,
compreensão e apoio em todos os momentos.*

*À minha mãe Nilce e tia Albenair, por me ensinarem,
ao longo dos anos, o verdadeiro sentido da vida.*

AGRADECIMENTOS

À Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento (DPD), na pessoa do Dr. Antonio Carlos de Oliveira Barroso, pelo incentivo e apoio financeiro.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN – CNEN/SP), pelo apoio e incentivo à capacitação científica nacional.

Ao Dr. Benedito Dias Baptista Filho, pela amizade, orientação, confiança e contínuo incentivo no desenvolvimento desse trabalho.

Ao meu amigo, Walmir Maximo Torres, pelo companheirismo, incentivo e valiosa ajuda no decorrer do trabalho.

Aos amigos José Carlos, Omar Cícero e Rubens Lander (*in memoriam*) na montagem da Bancada de Circulação Natural e realização dos experimentos.

Aos amigos Iraci, Mauro e Samuel na elaboração do sistema de aquisição de dados e do controlador de potência e, Delvonei e Pedro no desenvolvimento do modelo matemático e utilização do programa computacional.

CONTROLE DE SISTEMAS PASSIVOS DE RESFRIAMENTO DE EMERGÊNCIA DE REATORES NUCLEARES POR MEIO DE LINHAS DE DESVIO

Luiz Alberto Macedo

RESUMO

Neste trabalho são apresentados resultados experimentais, de um circuito operando em circulação natural, que permitem analisar o comportamento de um sistema de resfriamento de emergência quando é aberta uma linha de desvio entre a fonte quente e a fonte fria. O trabalho tem ainda a importância de documentar os testes de caracterização hidráulica do circuito experimental, fornecendo inclusive os fatores de perda de pressão específicos para o circuito.

Observou-se que, para uma mesma potência, quando é aberta a linha de desvio, a temperatura na saída da fonte quente aumenta substancialmente. Esse aumento ocorre porque a vazão através do aquecedor diminui. A vazão através do trocador de calor (fonte fria) aumenta ligeiramente, sendo sempre a soma das vazões na linha de desvio e no aquecedor.

O trabalho mostra ainda que a posição de conexão da linha de desvio com a perna quente determina o sentido de escoamento, podendo ocorrer a inversão a partir de uma determinada cota.

Para comprovar a possibilidade de simulação precisa dos experimentos foi ainda desenvolvido um modelo numérico das equações de conservação, utilizando o programa “Engineering Equation Solver” (EES). Esse modelo foi utilizado para reproduzir os experimentos de circulação natural pelo circuito externo.

CONTROL OF EMERGENCY COOLING PASSIVE SYSTEMS OF NUCLEAR REACTORS BY BYPASS LINES

Luiz Alberto Macedo

ABSTRACT

This work presents experimental results of a circuit when operating in natural circulation. These results allow to analyze the behavior of an emergency core cooling system when a bypass line that connects the hot source with the cold source is opened. This work also reports the hydraulic characterization of the experimental loop, given geometric and hydraulic data including experimental friction factors specific to this circuit.

It was observed that, to a fixed thermal power, when the bypass line is opened, the heater outlet temperature increases. This temperature increase is due to the decrease in the flow rate through the heater. The heat exchanger's flow rate is subjected to a small increase. This flow rate is the sum of the bypass line and heater mass flow rates.

This work also shows that the vertical position of the connection of the bypass line in the hot-leg determines the flow direction in the bypass line. If the bypass line connection is in the lowest position, the flow is from the cold to the hot-leg. If the bypass connection is in the highest position, the flow is from the hot to the cold-leg.

A numerical model used to evaluate friction factors and heat transfer coefficients influence was developed. It was used to confirm the possibility of precise experiments simulation. The conservation equations are solved using "Engineering Equation Solver" (EES), a thermal hydraulics analysis tool. The model was adjusted with natural circulation experimental data and was tested with results of natural circulation without bypass lines.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 DESCRIÇÃO DA BCN	9
2.1 <i>Local da Instalação</i>	10
2.2 <i>Materiais</i>	11
2.3 <i>Medidor de Vazão Magnético</i>	12
2.4 <i>Rotâmetros</i>	14
2.5 <i>Aquecedor Elétrico</i>	14
2.6 <i>Trocador de Calor</i>	16
2.7 <i>Vaso de Expansão</i>	19
2.8 <i>Termopares</i>	20
2.9 <i>Controlador de Potência</i>	21
2.10 <i>Aquisição de Dados</i>	22
3 COMISSIONAMENTO DA BCN	27
3.1 <i>Calibração dos Rotâmetros</i>	27
3.2 <i>Calibração de Potência</i>	28
3.3 <i>Calibração do Medidor de Vazão Magnético</i>	30

3.4	<i>Caracterização Hidráulica</i>	.	.	.	.	.	34
4	CIRCULAÇÃO NATURAL						39
4.1	<i>Etapa 1 – Experimento sem Linha de Desvio – Circuito Externo</i>	.	.	.	.	.	40
4.2	<i>Etapa 2 – Linha de Desvio 1 – Conexão Inferior.</i>	.	.				46
4.3	<i>Etapa 3 – Linha de Desvio 2 – Conexão Superior.</i>	.	.				54
5	MODELO MATEMÁTICO						61
5.1	<i>Modelo Térmico</i>	.	.	.	.	.	61
5.2	<i>Equação de Conservação da Quantidade de Movimento</i>	.					63
5.3	<i>Equação de Conservação de Energia</i>	.	.	.	.		68
	5.3.1 <i>Aquecedor Elétrico</i>	.	.	.	.	.	68
	5.3.2 <i>Trocador de Calor</i>	.	.	.	.	.	73
	5.3.3 <i>Tubulação</i>	.	.	.	.	.	76
5.4	<i>Propriedades Físicas da Água</i>	.	.	.	.	.	78
5.5	<i>Coeficientes de Película</i>	.	.	.	.	.	80
5.6	<i>Ajuste do Modelo Matemático</i>	.	.	.	.	.	85
6	CONCLUSÕES						93
	ANEXO 1 – LEI DE FARADAY DE INDUÇÃO MAGNÉTICA.	.					95

APÊNDICE 1 – CALIBRAÇÃO DOS ROTÂMETROS . . .	98
APÊNDICE 2 – CALIBRAÇÃO DE POTÊNCIA. . .	106
APÊNDICE 3 – CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO MAGNÉTICO	108
APÊNDICE 4 – CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA . . .	110
 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 118

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 – Sistema de Resfriamento de Emergência através de Circulação Natural – Reator AP-600	5
Figura 1.2 – Sistema de Resfriamento de Emergência – Reator PWR Convencional	6
Figura 2.1 – Bancada de Circulação Natural	9
Figura 2.2 – Planta do Galpão – Localização da Bancada	11
Figura 2.3 – Válvula Tipo Esfera com Atuador Elétrico	12
Figura 2.4 – Montagem do Transmissor Remoto	13
Figura 2.5 – Sensor do Medidor de Vazão Magnético	13
Figura 2.6 – Aquecedor Elétrico	15
Figura 2.7 – Esquema do Trocador de Calor	16
Figura 2.8 – Trocador de Calor	17
Figura 2.9 – Vista Interna do Trocador de calor	18
Figura 2.10 – Vaso de Expansão e Reservatório de Água	19
Figura 2.11 – Localização dos Termopares no Circuito Primário	20
Figura 2.12 – Localização dos Termopares no Circuito Secundário	21
Figura 2.13 – Sistema de Aquisição de Dados	24
Figura 2.14 – Tela da Interface	25
Figura 3.1 – Posição dos Rotâmetros	27
Figura 3.2 – Curva de Calibração da Potência Fornecida x Sinal de Tensão	30
Figura 3.3 – Ponto de Zero do Medidor de Vazão – TC 20	31
Figura 3.4 – Ponto de Zero do Medidor de Vazão – TC 11	32
Figura 3.5 – Ponto de Zero do Medidor de Vazão – TC 12	33
Figura 3.6 – Elementos para Caracterização Hidráulica da Bancada	34
Figura 3.7 – Trecho 2 – 1 – Perda de Carga x Velocidade ao Quadrado	37
Figura 3.8 – Trecho 2 – 1 – Fator de Atrito x Número de Reynolds	38
Figura 4.1 – Vazões na Bancada de Circulação Natural	39

Figura 4.2 – Temperaturas no Aquecedor Elétrico – Experimento sem Linha de Desvio	40
Figura 4.3 – Temperaturas de Entrada e Saída no Secundário do Trocador de Calor	41
Figura 4.4 – Potência Fornecida x Potência Térmica no Secundário do Trocador de Calor – Experimento sem Linha de Desvio	42
Figura 4.5 – Comparação entre Potências e Vazão ao Longo do Transitório	43
Figura 4.6 – Erro Relativo entre Vazão Medida e Vazão Calculada em Regime Permanente	44
Figura 4.7 – Medidas de Temperatura e Vazão para Balanço de Energia na BCN – Experimento sem Linha de Desvio	45
Figura 4.8 – Temperaturas no Aquecedor Elétrico – Linha de Desvio 1	47
Figura 4.9 – Comparação de Vazões ao Longo do Transitório – Linha de Desvio 1	48
Figura 4.10 – Potência Fornecida x Potência Térmica no Secundário do Trocador de Calor – Linha de Desvio 1	49
Figura 4.11 – Temperaturas TC 15 e TC 16 ao Longo do Transitório	50
Figura 4.12 – Comportamento Inicial das Temperaturas TC 15 e TC 16 ao Longo do Transitório	51
Figura 4.13 – Posição dos Termopares TC 15 e TC 16 na Linha de Desvio 1	51
Figura 4.14 – Medidas de Temperatura e Vazões para BCN com Linha de Desvio 1	52
Figura 4.15 – Temperaturas de Saída do Aquecedor com o Experimento sem Linha de Desvio e com Linha de Desvio 1	53
Figura 4.16 – Temperaturas no Aquecedor Elétrico – Linha de Desvio 2	54
Figura 4.17 – Vazões ao Longo do Transitório – Linha de Desvio 2	55

Figura 4.18 – Potência Fornecida x Potência Térmica no Primário e Secundário do Trocador de Calor – Linha de Desvio 2	56
Figura 4.19 – Temperatura Média no Secundário do Trocador de Calor	57
Figura 4.20 – Temperaturas de Saída do Aquecedor com o Experimento sem Linha de Desvio e com Linha de Desvio 2	59
Figura 4.21 – Temperaturas TC 15 e TC 16 ao Longo do Transitório	60
Figura 4.22 – Posição dos Termopares TC 15 e TC 16 na Linha de Desvio 2	60
Figura 5.1 – Regiões do Modelo Matemático	63
Figura 5.2 – Volume de Controle – Aquecedor Elétrico	69
Figura 5.3 – Esquema para Modelo do Trocador de Calor	73
Figura 5.4 – Regiões no Trocador de Calor	74
Figura 5.5 – Esquema para Modelo da Tubulação	77
Figura 5.6 – Comparação Experimento 1 e Modelo para Temperaturas TC 18 e TC 24 – Trocador de Calor	83
Figura 5.7 – Comparação Experimento 2 e Modelo para Temperaturas TC 18 e TC 24 – Trocador de Calor	84
Figura 5.8 – Temperatura de Entrada e Saída no Aquecedor Elétrico	85
Figura 5.9 – Potência Calculada no Aquecedor Elétrico e Vazão	86
Figura 5.10 – Potência Fornecida e Calculada no Secundário do Trocador de Calor	87
Figura 5.11 – Temperaturas de Entrada e Saída no Aquecedor no Início do Transitório	88
Figura 5.12 – Potência Térmica no Aquecedor e Vazão no Início do Transitório	88
Figura 5.13 – Esquema de Aceleração do Fluido	89
Figura 5.14 – Esquema de Vazão e Temperaturas – Modelo Trecho Externo	91

Figura An1.1 – Princípio de Funcionamento do Medidor de Vazão Magnético	96
Figura Ap1.1 – Esquema da Calibração do Rotâmetro Primário	98
Figura Ap1.2 – Balão de Vidro com Escala Graduada	99
Figura Ap1.3 – Curva de Calibração do Rotâmetro Primário	101
Figura Ap1.4 – Secundário da Bancada de Circulação Natural	102
Figura Ap1.5 – Recipiente Calibrado	103
Figura Ap1.6 – Curva de Calibração do Rotâmetro Secundário	105
Figura Ap2.1 – Temperaturas no Aquecedor com Vazão 49,57 l/h	106
Figura Ap2.2 – Temperaturas no Aquecedor com Vazão 92,66 l/h	107
Figura Ap3.1 – Elementos Envolvidos no Experimento	109
Figura Ap4.1 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ² (v^2)	111
Figura Ap4.2 – Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)	112
Figura Ap4.3 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ² (v^2)	112
Figura Ap4.4 - Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)	113
Figura Ap4.5 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ² (v^2)	113
Figura Ap4.6 - Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)	114
Figura Ap4.7 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ² (v^2)	114
Figura Ap4.8 - Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)	115
Figura Ap4.9 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ² (v^2)	115
Figura Ap4.10 - Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)	116
Figura Ap4.11 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ² (v^2)	116
Figura Ap4.12 - Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)	117

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1 – Características do Trocador de Calor	18
Tabela 3.1 – Sinal de Tensão e Potência Fornecida	29
Tabela 3.2 – Trechos Selecionados da Bancada	36
Tabela 3.3 – Dados para Perda de Carga	36
Tabela 4.1 – Balanço de Energia no Primário da BCN	46
Tabela 4.2 – Comparação de Temperaturas no Aquecedor nas Etapas 1 e 3	58
Tabela 5.1 – Balanço Térmico BCN – Regime Permanente	92
Tabela Ap1.1 – Vazões Medidas e Calculadas no Rotâmetro Primário	100
Tabela Ap1.2 - Vazões Medidas e Calculadas no Rotâmetro Secundário	104
Tabela Ap3.1 – Comparação entre Vazões	108
Tabela Ap4.1 – Dados para Perda de Carga – BCN	110
Tabela Ap4.2 – Relação de Figuras	111

A população mundial praticamente dobrou nas últimas três décadas e, segundo as projeções mais recentes, continuará crescendo. Conforme IAEA (2000a), as estimativas mais atuais prevêem que, por volta de 2020, haverá aproximadamente 8,1 bilhão de pessoas vivendo no planeta. Praticamente 90% dessas pessoas estarão habitando em países em desenvolvimento. Nestes países, o consumo de energia per capita, índice este que pode ser utilizado na determinação da qualidade de vida, é muito baixo, quando comparado aos índices dos países desenvolvidos. Além das muitas necessidades urgentes, tais como alimentação, vestimenta, moradia e trabalho, a disponibilidade de energia é uma condição prévia muito importante para desenvolvimento sócio-econômico em todas as partes do mundo.

De acordo com GREIF (1988), dependendo da localização geográfica e do nível de industrialização, a energia pode ser oferecida de diferentes formas, tais como eletricidade, para transporte ou como calor. Entre os diferentes meios de produção de energia que os países podem escolher, a *Energia Nuclear* representa uma das poucas opções capaz de produzir energia sob todas as formas, isto é, como eletricidade, como calor em alta ou baixa temperatura e vapor, ambos em condições aceitáveis, tanto economicamente, quanto em relação ao meio ambiente.

Os cuidados com o meio ambiente (efeitos da queima de combustíveis fósseis para a produção de energia) têm contribuído para o desenvolvimento de fontes de energia que pouco poluem. Além disso, o desenvolvimento da energia nuclear pode ser uma boa opção para algumas nações. Desse modo, o futuro da energia nuclear aplicada na produção energética depende crucialmente de uma adequada seleção dos conceitos do reator e de seus sistemas.

Nas últimas três décadas, a experiência adquirida na operação de reatores em conjunto com o atual modelo econômico e com sistemas de energia nuclear seguros, permitem o desenvolvimento de uma nova geração de usinas nucleares. Consequentemente, projetos avançados têm sido desenvolvidos para tornar as plantas cada vez mais seguras, menos perigosas e mais econômicas que suas predecessoras. Dentro dessa linha de raciocínio se iniciou há alguns anos o desenvolvimento dos conceitos dos *Reatores Avançados*, para os quais foram previstos aperfeiçoamentos tecnológicos tais como a elevada padronização, a redução na demanda de controle, a minimização da necessidade de suprimento de energia elétrica de emergência e o desenvolvimento de conceitos mais robustos, ou seja, imunes a falhas, segundo LAYMAN et al. (1991). No entanto, existe certa resistência de muitos segmentos em relação à produção energética nuclear, associando esse fato à utilização da energia nuclear para fins que não sejam exclusivamente pacíficos e à geração de rejeitos nucleares. Esses efeitos da opinião pública levaram as autoridades a iniciar o desenvolvimento de uma nova geração de reatores, denominados “Geração IV” que apresentam como

características principais a resistência à proliferação e a mínima produção de lixo atômico (IAEA (2000b)).

O conceito *avançado* incorpora melhorias nos níveis de segurança, incluindo, entre outros, aspectos que permitirão aos operadores mais tempo de ação relativo à segurança, e que produzirão sempre uma maior proteção contra qualquer possível liberação de radioatividade para o meio ambiente. Grande atenção é dada no projeto de novos reatores mais simples de operar, inspecionar, manter, reparar e que apresentem um mínimo custo global. Nos casos de distúrbios e acidentes, controles digitalizados, sistemas de monitoramento e proteção trarão automaticamente a planta de volta às condições normais ou para um estado de segurança controlada, sem a intervenção dos operadores. Isso tem por objetivo controlar as ações de segurança, ou seja, que o operador tenha, pelo menos, 30 minutos para intervir no sistema, permitindo assim que ele tenha condições de avaliar criteriosamente a situação e os seus atos. Conforme IAEA (1995), ampliar a inércia térmica no reator e reduzir a densidade de potência do núcleo são dois fatores importantes no projeto.

Observa-se que o conceito de *reator avançado* é caracterizado como um reator inovador, que ainda não foi construído e nem operado. Os *reatores avançados* são divididos em projetos *evolucionários* e projetos *evoluídos*.

Um reator *evolucionário*, como por exemplo ABWR (Advanced Boiling Water Reactor), é o sucessor de um reator já existente, dotado de modificações

baseadas na experiência operacional adquirida e em novas tecnologias. Este tipo de reator apresenta um grande investimento em trabalhos de engenharia e em testes, caso seja confirmado sua produção em escala comercial.

Um reator *evoluído* (Reator Rápido resfriado a Metal Líquido) é um projeto que apresenta um afastamento maior dos reatores já existentes, requerendo, também, a construção de uma planta de demonstração em escala ou uma planta protótipo para o desenvolvimento comercial em larga escala. Um projeto *evoluído* que apresente mudanças quase radicais, pode ser chamado de *inovador*, como por exemplo o Reator de Neutrons Rápidos operado por meio de um Amplificador de Energia (Rubbia et al (1995)).

Projetos que visam a melhoria da qualidade devem, também, introduzir meios de segurança passiva que estão baseados nos fenômenos naturais, tais como convecção e gravidade, fazendo as funções de segurança menos dependentes do sistema ativo e de componentes como válvulas e bombas. Destaca-se, principalmente nos *Reatores PWR Avançados*, a adoção dos conceitos utilizados em reatores navais militares que sempre possuíram sistemas de resfriamento de emergência com características passivas, usando o fenômeno da *Circulação Natural*, ou seja, a utilização da variação de densidade do fluido no resfriamento do calor residual do núcleo ou no caso da perda de refrigerante (LOCA).

De acordo com WESTINGHOUSE (2000), o reator AP-600 adota sistemas de resfriamento de emergência passivos para aumentar a segurança da planta, bem como satisfazer os mais rígidos critérios de confiabilidade. Esses sistemas utilizam os fenômenos naturais, tais como a circulação natural e a gravidade.

O sistema de segurança passiva no reator AP-600, por meio de circulação natural, é mostrado na Fig. 1.1.

Fonte: Westinghouse – Reator AP-600.

Figura 1.1 – Sistema de Resfriamento de Emergência através de Circulação Natural – Reator AP-600

Pode-se notar as vantagens do sistema de resfriamento de emergência através de circulação natural, utilizado em um reator AP-600, quando comparado

com o sistema de resfriamento de emergência utilizado em um reator PWR convencional, mostrado na Fig. 1.2.

Fonte: Westinghouse – Reator AP-600.

Figura 1.2 – Sistema de Resfriamento de Emergência – Reator PWR Convencional

As principais vantagens são:

- Utilização de menor quantidade de bombas;
- Utilização de menor quantidade de válvulas;
- Utilização de menor quantidade de cabos elétricos;
- Utilização de menor quantidade de conduítes elétricos e
- Utilização de menor quantidade de tubulação.

Dando seqüência aos objetivos propostos por BAPTISTA FILHO (1996), no início de 1998, foi concluída uma instalação para experimentos de sistemas de resfriamento de emergência através de circulação natural, denominada Bancada de Circulação Natural (BCN) que foi concebida e detalhada para atender as seguintes linhas de trabalho:

- Estudo do comportamento de resfriadores de sistemas passivos de remoção de calor residual típicos de reatores avançados e de reatores navais;
- Análise do comportamento operacional de sistemas passivos de remoção de calor residual com linhas de desvio da fonte quente;
- Pesquisa de redes neurais artificiais para controle de sistemas de reatores nucleares;
- Utilização de redes neurais artificiais e análise de ruído para diagnose e previsão do comportamento de sistemas de reatores nucleares.

Este trabalho descreve essa bancada para experimentos em circulação natural e suas principais características de projeto. Além disso apresenta os resultados da caracterização hidráulica da bancada, que consistiram em medidas de perda de pressão nos diversos trechos, sua correlação em termos de fatores de atrito, os resultados de testes de calibração do sistema de medição de potência e os resultados dos experimentos em circulação natural. Esses resultados tratam de transitórios em circulação natural a baixas potências (até 2.400W), com a aplicação de degrau de potência iniciado em condição de equilíbrio. Existem diversos

trabalhos sobre circulação natural, tais como apresentados por ZVIRIN e RABINOVIZ (1987), LAVRADOR (1994) e ZVIRIN (1985).

O objetivo do trabalho é o estudo experimental da utilização de linhas de desvio entre a fonte quente e fonte fria, para controle de temperatura bem como a aplicação de métodos teóricos para descrição da vazão, dos processos e fenômenos de transferência de calor envolvidos na BCN com as linhas de desvio fechadas, comparando-os com alguns resultados experimentais obtidos.

Como divulgado no INFORME IPEN (1998), a BCN mostrada na Fig. 2.1, foi projetada nos moldes de um sistema de remoção de calor residual de um reator PWR avançado.

Figura 2.1 – Bancada de Circulação Natural

O circuito (primário e linha de desvio) é preenchido com água por meio da válvula esfera C. O secundário é alimentado por gravidade a partir de um reservatório elevado, sendo que sua vazão é controlada por uma válvula agulha e medida pelo rotâmetro secundário. O controle do preenchimento de água no primário é feito por um visor de nível localizado no vaso de expansão (ver Fig. 2.10). Quando a BCN está em operação, a vazão no circuito externo (aquecedor elétrico, perna quente, trocador de calor e perna fria) é indicada por m . A abertura e fechamento da linha de desvio 1 – conexão inferior e da linha de desvio 2 – conexão superior se dão por meio da válvula de desvio e da válvula esfera B e válvula esfera A, respectivamente. Na linha de desvio 1 – conexão inferior tem-se a vazão m_{d1} e na linha de desvio 2 – conexão superior tem-se a vazão m_{d2} .

A bancada possui um aquecedor elétrico que é a fonte quente do sistema, um trocador de calor constituído por dois tubulões horizontais com um feixe de tubos verticais imersos em um tanque de água. Além desses componentes e da instrumentação descrita adiante, foi instalada uma bomba para realizar operações de calibração e determinação das características hidráulicas do circuito.

2.1 Local da Instalação

Conforme MACEDO e BAPTISTA FILHO (1997a), a BCN está instalada no galpão do “Loop – 70” (Circuito Experimental de Água Pressurizada do Centro de

Engenharia Nuclear), montada sobre a própria estrutura metálica do “Loop”. A bancada está posicionada na lateral, entre o circuito e a oficina/sala de controle, conforme planta do galpão representada esquematicamente na Fig. 2.2.

Figura 2.2 – Planta do Galpão / Localização da Bancada

2.2 Materiais

A tubulação é de cobre com 22 mm de diâmetro e 0,6 mm de espessura. As conexões são soldadas nas curvas e “tês”. As válvulas e equipamentos são instalados com uniões roscadas. A linha de abastecimento de água no lado secundário do trocador de calor é de PVC. O isolamento térmico da tubulação é feito com calhas de lã de vidro de 25 mm de espessura envolvidas por alumínio corrugado.

Nas linhas principais do circuito, são utilizadas válvulas tipo esfera, em latão. Exceção apenas no secundário do trocador de calor que utiliza válvulas tipo gaveta, em latão. Para o estudo do sistema com linha de desvio, foi instalada uma válvula tipo esfera, em material termoplástico, com atuador elétrico. Esta válvula é tipo ação abre/fecha (Fig. 2.3).

Figura 2.3 – Válvula Tipo Esfera com Atuador Elétrico

2.3 Medidor de Vazão Magnético

Na linha principal do circuito foi instalado um medidor de vazão, tipo magnético, marca Sparling TIGERMAG, modelo FM 625 com diâmetro $\frac{1}{2}$ pol.. O princípio de funcionamento do medidor de vazão está baseado na Lei de Faraday de Indução Magnética (SPARLING (1996) - ANEXO 1). Esse medidor consiste de um sensor, do tipo “wafer”, com carcaça não magnética e um transmissor remoto. Essa disposição é visualizada na Fig. 2.4.

Figura 2.4 – Montagem do Transmissor Remoto

A Fig. 2.5 mostra o sensor do medidor de vazão magnético instalado na BCN.

Figura 2.5 – Sensor do Medidor de Vazão Magnético

2.4 Rotâmetros

Na BCN foram instalados dois rotâmetros, um no circuito primário e o outro no circuito secundário. Os rotâmetros são da marca KROHNE e apresentam escala de 25 a 250 l/h. O rotâmetro do primário faz a função de um instrumento auxiliar para a caracterização hidráulica da bancada, para a calibração do sistema de medida de potência do aquecedor elétrico e para a calibração do medidor de vazão magnético utilizado quando a bancada opera em circulação natural. O segundo rotâmetro serve para controle de vazão no secundário do trocador de calor.

2.5 Aquecedor Elétrico

O aquecedor elétrico é do tipo “passagem”, fabricado pela DENNEX (Fig. 2.6). Foi construído com tubos e conexões de aço inox. Esse aquecedor é equipado com três resistências de imersão em “U” com flange, elementos tubulares blindados em aço inox e termostato de segurança contra eventual excesso de temperatura. O aquecedor elétrico, embora projetado para uma potência nominal de 10.000 W, teve sua potência fornecida ao sistema limitada a 2.400 W, em função da BCN operar em circulação natural e para evitar danos às resistências elétricas.

Os parâmetros nominais de projeto do aquecedor elétrico são:

- Fluido : Água;
- Vazão Máxima : 432 l/h;
- Potência Máxima : 10.000 W;
- Tensão de Alimentação : 220 V (trifásico)

Figura 2.6 – Aquecedor Elétrico

2.6 Trocador de Calor

O trocador de calor (Fig. 2.7) foi construído totalmente em cobre. É constituído por 2 tubulões de $\phi 1 \frac{3}{4}$ pol., interligados por 18 tubos de $\phi 3/8$ pol. e 590 mm de comprimento.

Figura 2.7 – Esquema do Trocador de Calor

A legenda para a Fig. 2.7 é a seguinte:

- A, B** : Conexões (luvas rosqueadas) soldadas ao corpo do trocador de calor que permitem controlar o nível de água do secundário, através de válvulas tipo gaveta;
- 1** : Entrada de água quente do circuito;
- 2 e 4** : Conexão plugada;
- 3** : Saída de água resfriada para o circuito;
- 5** : Entrada de água do secundário e;
- 6** : Saída de água do secundário.

A instalação do trocador de calor na BCN é mostrada na Fig. 2.8.

Figura 2.8 – Trocador de Calor

A vista interna do trocador de calor é mostrada na Fig. 2.9.

Figura 2.9 – Vista Interna do Trocador de Calor

As principais características do trocador de calor são dadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Características do Trocador de Calor

Dimensões Principais	1,0 x 1,0 x 0,25 m
Volume de Água (Lado Primário)	2,8 litros
Volume de Água (Lado Secundário)	202 litros
Área de Transferência de Calor nos Tubulões (ϕ 1 ^{3/4} pol.)	0,2793 m ²
Área de Transferência de Calor nos Tubos (ϕ 3/8 pol.)	0,3232 m ²

2.7 Vaso de Expansão

O vaso de expansão (Fig. 2.10) tem por finalidade acomodar as variações de volume da água no circuito primário da bancada devido a variação de temperatura. O vaso é feito em PVC, rosqueado à tubulação, e permite a expansão do fluido em até 1 l. Ao lado do vaso de expansão, foi instalado posteriormente, um reservatório de água com capacidade de 10 l. Este reservatório, construído inteiramente em PVC, permite completar o nível de água no primário do circuito em testes com circulação de água.

Figura 2.10 – Vaso de Expansão e Reservatório de Água

2.8 Termopares

Ao longo do circuito foram instalados 24 termopares, sendo 5 do tipo T de 1,5 mm e 19 do tipo K de 0,5 mm de diâmetro. As Fig. 2.11 e Fig. 2.12 mostram, respectivamente, o posicionamento dos termopares no circuito primário e no secundário. Como os termopares são de boa procedência, eles não foram calibrados. Utilizou-se a relação : tensão (V) é proporcional a temperatura (T).

Figura 2.11 – Localização dos Termopares no Circuito Primário

Figura 2.12 – Localização dos Termopares no Circuito Secundário

2.9 Controlador de Potência

O controlador de potência, diferente dos modelos industriais, foi

especialmente concebido visando a aplicação em experimentos nos quais a contínua informação da potência fornecida é necessária para registro ou para ações de controle, considerando-se a segurança dos pesquisadores envolvidos no trabalho.

A variação de potência é feita por meio de uma entrada analógica isolada que pode ser variada entre 0 e 10 V. A isolação da rede para o aquecedor é feita por um transformador isolador de potência especificado para 4 kVA. O sistema de proteção é baseado no intertravamento com contatos em série ao comando de um contator que ativa a alimentação 220 VAC monofásica. As condições consideradas para desligamento da alimentação de potência foram a temperatura da água acima de 90 °C e a abertura da porta do controlador. O controlador desenvolvido pode trabalhar com cargas resistivas tanto em 110 como em 220 V.

2.10 Aquisição de Dados

O controlador de potência pode receber o sinal de controle advindo de uma fonte externa ou de uma saída do sistema de aquisição de dados que é constituído por uma placa de aquisição de dados da National Instruments, AT-MIO-16E, um computador (PC); um bloco terminal isolado SCXI; um módulo condicionador de sinais SCXI; e um bastidor SCXI.

A placa de aquisição de dados (NATIONAL INSTRUMENTS (1995a)), possui 8 entradas diferenciais analógicas (16 entradas com terra comum), sinal de entrada de -10 a +10V, selecionável por software, 8 entradas/saídas digitais, taxa de amostragem 100 kS/s, 2 saídas analógicas no intervalo de -10 a +10V configurável via software, com contador/temporizador disponível para acesso a leitura.

O bloco SCXI é formado pelo bloco terminal, um módulo condicionador de sinais e um bastidor. A fiação da instrumentação é montada no bloco terminal isolado, que é conectado diretamente na parte frontal do módulo condicionador de sinais. Este é acondicionado no bastidor SCXI, e multiplexa todos os sinais em um canal.

A atuação do condicionador de sinais é controlada via software. Para isso foi utilizado o sistema LabWindows/CVI (NATIONAL INSTRUMENTS (1995b)). O sistema LabWindows/CVI é um ambiente de programação que permite desenvolvimento de aplicações de instrumentação e controle, aplicações em testes automatizados e aquisição de dados. Suas bibliotecas contêm funções de alto nível para aquisição, análise e apresentação de dados.

A Fig. 2.13 mostra o esquema do sistema de aquisição de dados configurado para os experimentos. Utilizando-se o LabWindows, fez-se um programa para aquisição, apresentação e armazenamento dos dados da seguinte instrumentação da BCN (GONÇALVES (2001)):

- 19 termopares tipo K - sinal em mV;
- 5 termopares tipo T - sinal em mV;
- medidor de vazão magnético - sinal de 1 a 5 V e;
- potência do aquecedor - sinal do controlador de 0 a 10 V.

Figura 2.13 – Sistema de Aquisição de Dados

A Fig. 2.14 mostra a tela de interface do usuário para utilização do programa. A tela foi feita de tal modo que as posições de indicação das temperaturas correspondam aos locais de instalação dos termopares no circuito, na forma de um quadro sinóptico, de forma a facilitar a visualização do comportamento do circuito durante sua operação. Antes de iniciar a aquisição dos dados, o usuário fornece o valor da escala de vazão que está sendo utilizado no

medidor de vazão do primário, e seleciona dois termopares que deseja que sejam acompanhados em forma gráfica.

Figura 2.14 – Tela da Interface

O programa permite a operação e acompanhamento dos experimentos sem gravação dos dados ou com a opção de armazenamento em um arquivo especificado no início da gravação. Ao acionar o botão *GRAVAR*, é aberta uma janela para ser fornecido o nome e a localização do arquivo onde serão

armazenados os dados. Caso se deseje continuar uma gravação em um arquivo já utilizado, os dados serão colocados em seqüência aos já existentes. O arquivo de saída registra a data, hora de início e fim da gravação, temperaturas em graus Celsius, vazão na unidade escolhida e potência do aquecedor em W. Dessa forma, ao terminar o experimento, os dados poderão ser analisados utilizando-se programas adequados.

Para que a parte experimental fosse realizada na BCN, foi necessário o desenvolvimento de quatro atividades: calibração dos rotâmetros, calibração de potência, calibração do medidor de vazão magnético e a caracterização hidráulica do circuito

3.1 Calibração dos Rotâmetros

A BCN utiliza dois rotâmetros KROHNE de 250 l/h, um no circuito primário e o outro, no secundário. A Fig. 3.1 mostra a localização desses rotâmetros na BCN, de acordo com MACEDO e BAPTISTA FILHO (1997b).

Figura 3.1 – Posição dos Rotômetros

O rotâmetro do primário funciona como um instrumento auxiliar para a determinação da vazão no circuito quando este opera em circulação forçada. Por meio dele, realizou-se a calibração de potência, a caracterização hidráulica do circuito, e a calibração do medidor de vazão magnético utilizado quando a bancada opera em circulação natural. O rotâmetro do secundário da BCN é utilizado para a medida de vazão de água que serve como refrigerante no trocador de calor (MACEDO e BAPTISTA FILHO (1997c)).

Para assegurar a precisão dos rotâmetros, foi feita sua calibração conforme apresentado no Apêndice 1.

3.2 Calibração de Potência

Para medir a potência fornecida, utiliza-se um sinal de tensão (S), gerado no controlador de potência. Esse sinal, proporcional à potência, é enviado ao sistema de aquisição de dados e multiplicado por uma constante. A calibração desse sinal torna-se necessária, pois o mesmo não é linear (ver Fig. 3.2). Essa calibração é feita por meio de balanço térmico no aquecedor, em regime permanente (ver Apêndice 2). O seguinte procedimento foi adotado:

- Para uma determinada vazão, medida no rotâmetro, fornece-se potência ao circuito até atingir o regime permanente;

- As temperaturas de entrada e saída do fluido no aquecedor (termopares TC 23 e TC 22 da Fig. 2.1) são registradas e;
- Conhecidas as temperaturas, as entalpias do fluido são calculadas na entrada e saída do aquecedor, e determinada a potência fornecida.

A Tabela 3.1 mostra os resultados dos testes relacionando o sinal de tensão (S) e a potência fornecida (P_f).

Tabela 3.1 – Sinal de Tensão e Potência Fornecida

Vazão Calibrada (l/h)	Sinal (V)	Potência Fornecida (W)
37,55	2,85	898,61
40,55	1,53	468,81
40,55	1,59	482,19
45,56	4,57	1702,61
49,57	1,45	438,84
49,57	2,91	992,14
49,57	1,71	546,65
55,58	1,66	513,50
59,59	5,85	2127,70
68,61	1,61	488,74
68,61	1,89	576,59
68,61	2,54	801,30
76,63	6,17	2253,46
77,63	2,92	962,23
78,63	2,90	940,33
78,63	3,08	1035,85
89,66	6,73	2413,64
90,66	3,81	1397,60
92,66	4,22	1652,48
92,66	4,89	1920,87
92,66	5,37	2101,33

A Fig. 3.2 mostra a curva de calibração da potência fornecida (P_f) em função do sinal de tensão (S).

Figura 3.2 – Curva de Calibração da Potência Fornecida x Sinal de Tensão

A potência fornecida (P_f) em função do sinal de tensão (S) é dada por:

$$P_f = 1.115,19 - 1.127,14 S + 591,59 S^2 - 89,80 S^3 + 4,60 S^4 \quad (1)$$

3.3 Calibração do Medidor de Vazão Magnético

Na linha principal do circuito, foi instalado um medidor de vazão tipo magnético ajustado para a faixa de vazão máxima de 0,1 kg/s. Observou-se que o

“zero” do medidor magnético de vazão varia com a temperatura do sensor (há um “drift”). Apesar de pequena, essa variação é importante na faixa de vazão obtida quando o circuito opera em circulação natural. Para essa calibração foram realizados diversos testes (Apêndice 3) variando-se a temperatura da água, e correlacionando os resultados com as temperaturas lidas, através dos termopares localizados mais próximos ao sensor do medidor de vazão, ou seja, os termopares TC 11, TC 12 e TC 20 (ver Fig. 2.1). Nota-se que os termopares TC 11 e TC 12 são do tipo K e efetuam a leitura da temperatura na superfície externa do tubo e o termopar TC 20 é do tipo T efetuando a leitura da temperatura do fluido no centro da seção transversal do tubo. A localização do termopar TC 20 é muito próxima das paredes do trocador de calor (secundário), que contem uma grande massa de fluido frio, influenciando na leitura da temperatura. O “zero” do medidor de vazão para o termopar TC 20 é mostrado na Fig. 3.3.

Figura 3.3 – Ponto de Zero do Medidor de Vazão – TC 20

Os gráficos relacionando o “zero” do medidor de vazão, para os termopares TC 11 e TC 12, são mostrados nas Fig. 3.4 e 3.5.

Figura 3.4 - Ponto de Zero do Medidor de Vazão – TC 11

A curva ajustada do ponto de zero (PZ) para a temperatura do termopar TC 11 é representada por:

$$PZ = -7,51 \times 10^{-4} + 1,76 \times 10^{-3} TC_{11} - 3,37 \times 10^{-5} TC_{11}^2 \quad (2)$$

Figura 3.5 – Ponto de Zero do Medidor de Vazão – TC 12

Nesse caso, o ajuste da curva do ponto de zero (PZ) para a temperatura do termopar TC 12 é dado por:

$$PZ = -1,10 \times 10^{-2} + 2,41 \times 10^{-3} TC_{12} - 4,37 \times 10^{-5} TC_{12}^2 \quad (3)$$

Nota-se que os ajustes das curvas dos pontos de zero para os termopares TC 11 e TC 12 foram feitos até aproximadamente 41 °C. Para medidas de temperaturas maiores, considerou-se os valores do ponto de zero constantes e iguais a 0,014 kg/s. Esse fato é devido ao comportamento da curva de ponto de zero para a temperatura do termopar TC 20, mostrada na Fig. 3.3. A partir dos 36 °C, observa-se um comportamento horizontal da curva, indicando um ponto de zero igual e constante a 0,014 kg/s.

O ponto de “zero” utilizado para efetuar a leitura no medidor de vazão magnético, quando o circuito opera em circulação natural, é o baseado no termopar TC 11. Isso se deve à proximidade e à localização do termopar TC 11 em relação ao medidor de vazão magnético.

3.4 Caracterização Hidráulica

A caracterização hidráulica do circuito foi feita circulando-se água ao longo de cada trecho, utilizando-se as tomadas de pressão numeradas de 1 a 4, conforme Fig. 3.6, onde se queria determinar a perda de carga (ΔP) para se estabelecer os coeficientes de perda de pressão ou de atrito.

Figura 3.6 - Elementos para Caracterização Hidráulica da Bancada

As medidas de perda de carga (ΔP) nos diversos trechos entre as tomadas de pressão foram realizadas com um transmissor de pressão diferencial calibrado na faixa de 0 a 130 mmH₂O. Com as quatro tomadas de pressão foram selecionados sete trechos de interesse. As perdas de carga (ΔP) são representadas por:

$$\Delta P = f \left(\frac{L_{eq}}{D_h} \right) \rho \left(\frac{v^2}{2} \right) \quad (4)$$

onde:

ΔP : Perda de Pressão (N/m²);

f : Fator de Atrito;

L_{eq} : Comprimento Equivalente (m);

D_h : Diâmetro Hidráulico (m);

ρ : Massa Específica da Água (kg/m³) e;

v : Velocidade de Escoamento (m/s).

Para correlacionar o fator de atrito, em cada trecho selecionado, a vazão foi variada e medida por meio do rotâmetro primário calibrado. A partir do início da faixa de medição do transmissor de pressão, iniciou-se o registro da correspondente perda de pressão. Em cada condição foi registrada a temperatura da água para determinação das suas propriedades físicas. Conhecida a vazão (Q), a perda de carga (ΔP), as propriedades da água e os comprimentos equivalentes de cada trecho (L_{eq}), baseados em dados tabelados, conforme CRANE (1977), foi utilizada a equação (4) para se obter o valor do fator de atrito. Esse procedimento foi repetido para cada trecho, e é mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Trechos Selecionados da Bancada

Trecho	Vazão (l/h)	Válvula A	Válvula B	Válvula C	Válvula D	Válvula E	Válvula F
2 – 1	23 – 167	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
2 – 3	25 – 207	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
3 – 4	25 – 206	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
4 – 1	26 – 123	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
1 – 2	25 – 167	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada
2 – D – 1	25 – 210	Aberta	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	Fechada
2 – E – 1	28 – 220	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Aberta	Fechada

Para o trecho externo (trecho 2 – 1), os valores das perdas localizadas, incluindo o número de singularidades por tipo e trecho, são mostrados na Tabela 3.3. O comprimento equivalente (L_{eq}) está relacionado ao diâmetro da tubulação (0,0208 m). Os demais trechos estão relacionados no Apêndice 4.

Tabela 3.3 – Dados para Perda de Carga

Trecho	Diâmetro Hidráulico (m)	Trecho Reto (m)	Medidor de Vazão L/D=130	Nipples L/D=14	L/D=20	L/D=60	União L/D=18	Curva L/D=30	Válvula de Esfera L/D=240	Compr. Equiv. Leq (m)
R1	0,0381	1,00	–	–	8	1	–	–	–	5,58
R2	0,0080	0,635	–	–	–	–	–	–	–	2,61
R3	0,0381	1,00	–	–	8	1	–	–	–	5,38
S1	0,0144	1,70	–	–	–	–	–	–	–	3,23
S2	0,0630	0,15	–	–	–	–	–	–	–	0,35
Perna Quente	0,0208	3,62	–	2	3	–	1	1	–	6,44
Perna Fria	0,0208	12,30	1	10	4	–	12	4	1	36,54

A Fig. 3.7 exemplifica o correlacionamento da perda de carga (ΔP) com o quadrado da velocidade (v^2) apresentando os resultados para o trecho externo (que compreende o aquecedor, o trocador de calor, o medidor de vazão e retorna no aquecedor) da BCN.

Figura 3.7 – Trecho 2 – 1 – Perda de Carga x Velocidade ao Quadrado

Na Fig. 3.8 são mostrados os resultados na forma de correlação do fator de atrito. Observa-se que os resultados atingem a zona de transição. Pode-se observar a mudança de comportamento do fator de atrito no ponto em torno de $Re \approx 1500$. Na faixa de regime laminar foi obtido um fator de atrito um pouco inferior ao da curva de Hagen-Poiseuille ($f=64/Re$). Na zona de transição ($Re =$

2000 a 3000) a curva tende a manter o comportamento esperado, porém atingindo valores ligeiramente superiores aos da curva de Blasius.

Figura 3.8 – Trecho 2 – 1 – Fator de Atrito x Número de Reynolds

As correlações obtidas permitiram observar que o coeficiente de atrito é intrínseco à bancada, sendo dependente de características geométricas. Conclusões similares foram apresentadas por ZVIRIN et al. (1981).

Os experimentos em circulação natural são divididos em três etapas. A primeira etapa corresponde ao experimento sem linha de desvio da BCN (circuito externo). A segunda e terceira etapas compreendem os experimentos utilizando as linhas de desvio 1 e 2 (conexão inferior e superior). A utilização de linhas de desvio pode reduzir as taxas de resfriamento do reator, permitindo maior tempo para análise de problemas e religamento. As linhas de desvio podem produzir efeito equivalente ao de válvulas de controle, porém sem introduzir elementos ativos no circuito principal. A bancada, em termos de vazões e identificação do circuito externo, da linha de desvio 1 – conexão inferior e da linha de desvio 2 – conexão superior, pode ser visualizada através da Fig. 4.1.

Figura 4.1 – Vazões na Bancada de Circulação Natural

4.1 Etapa 1 – Experimento sem Linha de Desvio – Circuito Externo

O experimento consistiu de um transitório de aumento de potência, partindo-se da condição inicial de fluido estacionário na temperatura ambiente. A válvula de desvio bem como as válvulas esfera A e B estavam fechadas. O degrau de potência foi de aproximadamente 2.400 W e foi aplicado 140 s após iniciada a gravação. A duração total do experimento foi de 8h30. Os dados continuaram a ser registrados mesmo após o circuito ter atingido o regime permanente. A temperatura de entrada (TC 23), a temperatura de saída (TC 22) e a temperatura média no aquecedor elétrico (média entre as temperaturas registradas pelos termopares TC 22 e TC 23) são mostradas na Fig. 4.2.

Figura 4.2 – Temperaturas no Aquecedor Elétrico – Experimento sem Linha de Desvio

A Fig. 4.3 mostra as temperaturas de entrada (TC 24) e saída (TC 18) do secundário do trocador de calor. Observa-se que o circuito atingiu o regime permanente.

Figura 4.3 – Temperaturas de Entrada e Saída no Secundário do Trocador de Calor

A Fig. 4.4 mostra a potência fornecida em comparação com a potência térmica do secundário do trocador de calor. Observa-se que no final do transitório a potência térmica não se iguala à potência fornecida em função das perdas térmicas na carcaça do trocador de calor. O trocador de calor não possui isolamento térmico. A vazão no secundário foi de aproximadamente 98 l/h.

Figura 4.4 – Potência Fornecida x Potência Térmica no Secundário do Trocador de Calor – Experimento sem Linha de Desvio

A Fig. 4.5 relaciona a potência fornecida, a potência térmica no aquecedor e a vazão no medidor de vazão magnético. Em regime permanente, observa-se que a diferença entre a potência fornecida e a potência calculada por balanço térmico no aquecedor é de aproximadamente 103 W. Essa diferença está relacionada com as perdas de calor para o ambiente, com a precisão de leitura das temperaturas de entrada e saída no aquecedor elétrico pelos termopares e com o erro na medida de vazão no medidor magnético.

Figura 4.5 - Comparação entre Potências e Vazão ao Longo do Transitório

Em regime permanente, pode-se determinar o “erro” relativo entre a vazão no medidor de vazão magnético e a vazão calculada por meio da potência fornecida. A Fig. 4.6 relaciona o erro relativo da vazão ao longo do tempo com o circuito em regime permanente (adotado $t \geq 21.000$ s). Obteve-se um erro relativo médio de 5,02% com um valor máximo de 11,05% e um valor mínimo de 0%.

Figura 4.6 – Erro Relativo entre Vazão Medida e Vazão Calculada em Regime Permanente

A Fig. 4.7 mostra o trecho externo sem linha de desvio da BCN e as respectivas medidas de temperatura registradas pelos termopares, quando o circuito está em regime permanente, para a realização do balanço de energia.

Figura 4.7 – Medidas de Temperatura e Vazão para Balanço de Energia na BCN – Experimento sem Linha de Desvio

No aquecedor, desconsiderando-se as incertezas nas medidas de temperatura, tem-se:

- Potência fornecida (P_f) = 2.400 W;
- Potência térmica calculada no aquecedor (P_{taq}) = 2.297 W e;
- Perda de potência para o ambiente no aquecedor (P_{paq}) = 103 W.

Na “perna quente” e na “perna fria” tem-se:

- Perda de potência para o ambiente na perna quente (P_{ppq}) = 78 W e;
- Perda de potência para o ambiente na perna fria (P_{ppf}) = 52 W.

No trocador de calor pode-se calcular:

- Potência térmica no primário (P_{tcp}) = 2.167 W e;
- Potência térmica no secundário (P_{tcs}) = 2.136 W.

A Tabela 4.1 mostra o balanço de energia no primário da BCN.

Tabela 4.1 – Balanço de Energia no Primário da BCN

Potência fornecida (P_f)	2.400 W
Perda de calor no aquecedor para o ambiente (P_{paq})	103 W
Potência térmica no aquecedor (P_{taq})	2.297 W
Perda de calor na perna quente para o ambiente (P_{ppq})	78 W
Perda de calor na perna fria para o ambiente (P_{ppf})	52 W
Potência térmica no primário – Trocador de Calor (P_{tcp})	2.167 W

Calcula-se a potência dissipada na carcaça do trocador de calor (P_{ca}) por meio da subtração da potência térmica no secundário do trocador de calor (P_{tcs}) da potência térmica no primário do trocador de calor (P_{tcp}). O resultado encontrado é 31 W.

4.2 Etapa 2 – Linha de Desvio 1 – Conexão Inferior

Nesta etapa, o experimento consistiu da aplicação de dois degraus de potência. O primeiro degrau de potência foi de aproximadamente 1.100 W aplicado

no instante $t=214$ s. O segundo degrau elevou a potência para aproximadamente 2.400 W e foi aplicado no instante $t=1.894$ s. O experimento teve uma duração total de aproximadamente 8h43 com o circuito atingindo o regime permanente. No instante $t=1.354$ s, a válvula de desvio bem como a válvula esfera B (ver Fig. 4.1), na linha de desvio, foram abertas. A temperatura na entrada (TC 23), a temperatura na saída (TC 22) e a temperatura média no aquecedor elétrico (temperatura média entre as temperaturas registradas pelos termopares TC 22 e TC 23 ao longo do transitório) são mostradas na Fig. 4.8.

Figura 4.8 - Temperaturas no Aquecedor Elétrico – Linha de Desvio 1

A Fig. 4.9 mostra a comparação entre a vazão calculada pelo balanço térmico no aquecedor elétrico (m_{aq1}), a vazão no trocador de calor (m_{t1}) e na linha

de desvio (m_{d1}). A vazão no trocador de calor (m_{t1}) é a leitura da vazão corrigida no medidor de vazão. A vazão no aquecedor (m_{aq1}) foi estimada com base na potência fornecida, pois não se dispõe de medida específica no trecho do aquecedor.

Figura 4.9 – Comparação de Vazões ao Longo do Transitório - Linha de Desvio 1

Na etapa 2, após a abertura da válvula de desvio, observa-se:

$$\overset{\bullet}{m_{t1}} = \overset{\bullet}{m_{d1}} + \overset{\bullet}{m_{aq1}} \quad (5)$$

A Fig. 4.10 relaciona a potência fornecida em comparação com a potência térmica calculada no secundário do trocador de calor. A vazão no secundário foi de aproximadamente 50 l/h.

Figura 4.10 – Potência Fornecida x Potência Térmica no Secundário do Trocador de Calor – Linha de Desvio 1

Após o circuito atingir o regime permanente, a temperatura do fluido na saída do aquecedor elétrico (perna quente) é maior que a obtida quando o circuito opera no trecho externo (etapa 1). Essa situação ocorre em função de se ter uma menor vazão de fluido no aquecedor elétrico ($m_{aq1} < m$), quando se abre a linha de desvio. Nota-se que a vazão na linha de desvio tem um sentido conhecido (ver Fig. 4.13). Esse fato foi constatado por meio das temperaturas registradas pelos

termopares TC 15 e TC 16 (ver Fig. 2.1). A Fig. 4.11 relaciona as temperaturas TC 15 e TC 16 ao longo do transitório.

Figura 4.11 – Temperaturas TC 15 e TC 16 ao Longo do Transitório

A Fig. 4.12 mostra a variação das temperaturas TC 15 e TC 16 ao longo do transitório, desde o instante inicial até 4.000 s. Observa-se claramente que as temperaturas TC 15 e TC 16 são iguais do instante inicial até pouco depois da abertura da válvula de desvio ($t=1.354$ s). Aproximadamente após 1.600 s, a temperatura TC 15 começa a aumentar, enquanto a temperatura TC 16 continua estável em 23 °C até atingir o instante 1.900 s, quando começa a aumentar, sempre num patamar inferior à temperatura TC 15. Assim sendo, tem-se a

temperatura TC 15 maior que a temperatura TC 16 e, portanto, a vazão ($\dot{m}_{d1}$) tem sentido determinado, conforme Fig. 4.13.

Figura 4.12 – Comportamento Inicial das Temperaturas TC 15 e TC 16 ao Longo do Transitório

Figura 4.13 – Posição dos Termopares TC 15 e TC 16 na Linha de Desvio 1

A Fig. 4.14 mostra o esquema de vazões e temperaturas na BCN em regime permanente.

Figura 4.14 - Medidas de Temperatura e Vazões para BCN com Linha de Desvio 1

Para uma potência fornecida de 2.400 W, no experimento sem linha de desvio, em regime permanente, tem-se uma diferença de temperatura no aquecedor elétrico de 17,7 °C para uma vazão ($\dot{m}$) de 0,031 kg/s. Para a mesma

potência (2.400 W), no experimento com a linha de desvio 1, em regime permanente, tem-se uma diferença de temperatura no aquecedor de 17,8 °C para uma vazão (m_{aq1}) de 0,03 kg/s. Observa-se que para uma redução de vazão da ordem de 10% no aquecedor elétrico, obtêm-se uma variação muito pequena na diferença de temperatura do aquecedor elétrico (cerca de 0,56%), além de se estabelecer uma temperatura maior na saída do aquecedor elétrico, conforme mostrado na Fig. 4.15. Nota-se que se as condições iniciais dos transientes fossem iguais (temperatura inicial TC 22), ter-se-ia um acréscimo ainda maior na temperatura de saída no aquecedor, no caso do experimento com linha de desvio.

Figura 4.15 – Temperaturas de Saída do Aquecedor com o Experimento sem Linha de Desvio e com Linha de Desvio 1

4.3 Etapa 3 – Linha de Desvio 2 – Conexão Superior

Nesta etapa, o experimento consistiu da aplicação de uma potência constante de 2.400 W, tendo como condição inicial o fluido em uma temperatura estável em regime permanente. O experimento teve uma duração total de aproximadamente 14h46, de modo que o circuito foi mantido em regime permanente por tempo suficiente para observar sua estabilidade. Após 250 s do início da gravação, a válvula esfera A foi aberta e a válvula esfera B foi fechada. As temperaturas do fluido na entrada (TC 23), saída (TC 22) e média no aquecedor elétrico são mostradas na Fig. 4.16.

Figura 4.16 - Temperaturas no Aquecedor Elétrico – Linha de Desvio 2

Na etapa 2, após a abertura da válvula esfera A e do fechamento da válvula esfera B, observa-se que a vazão total está no aquecedor ($\dot{m}_{aq2}$) e as vazões parciais são a vazão no trocador de calor ($\dot{m}_{t2}$) e a vazão na linha de desvio ($\dot{m}_{d2}$).

$$\dot{m}_{aq2} = \dot{m}_{t2} + \dot{m}_{d2} \quad (6)$$

A Fig. 4.17 relaciona a potência fornecida e as vazões no trocador de calor, no aquecedor elétrico e na linha de desvio.

Figura 4.17 – Vazões ao Longo do Transiente - Linha de Desvio 2

Observa-se o comportamento das vazões no aquecedor elétrico (m_{aq2}), no trocador de calor (m_{t2}) e na linha de desvio (m_{d2}). A vazão no aquecedor (m_{aq2}) sofre um ligeiro acréscimo (0,033 kg/s), quando comparada à vazão antes da abertura da válvula esfera A e do fechamento da válvula esfera B ($m_{aq1}=0,030$ kg/s). A vazão no trocador de calor (m_{t2}) é de aproximadamente 0,027 kg/s e a vazão na linha de desvio (m_{d2}) é de aproximadamente 0,006 kg/s.

A Fig. 4.18 mostra a potência térmica calculada no secundário e no primário do trocador de calor em comparação com a potência fornecida. A vazão no secundário foi de aproximadamente 50 l/h.

Figura 4.18 – Potência Fornecida x Potência Térmica no Primário e Secundário do Trocador de Calor – Linha de Desvio 2

No transiente, a partir do instante igual 30.000 s, observa-se que a potência térmica calculada no secundário é maior que a potência térmica calculada no primário da BCN. Essa mudança de comportamento pode ser interpretada por meio da Fig. 4.19, que mostra a temperatura média no secundário do trocador de calor ao longo do transitório. Após o instante 30.000 s, observa-se a mudança das condições com o resfriamento da carcaça do trocador de calor.

Figura 4.19 – Temperatura Média no Secundário do Trocador de Calor

Na etapa 3, tem-se as temperaturas na entrada e saída do aquecedor elétrico maiores, quando em comparação com o experimento sem linha de desvio. A Tabela 4.2 mostra as temperaturas de entrada (TC 23) e saída (TC 22) no aquecedor elétrico, em regime permanente, nas duas etapas 1 e 3.

Tabela 4.2 – Comparação de Temperaturas no Aquecedor nas Etapas 1 e 3

Etapa	Temperatura Entrada TC 23 (°C)	Temperatura Saída TC 22 (°C)
1 (Sem Linha de Desvio)	40,0	57,7
3	47,8	64,5

Na etapa 3, para uma potência fornecida de 2.400 W, obteve-se no experimento com a linha de desvio 2 (conexão superior), uma diferença de temperatura no aquecedor elétrico de 16,7 °C e uma vazão (m_{aq2}) de 0,033 kg/s. No experimento sem linha de desvio, para a mesma potência fornecida (2.400 W), obteve-se uma diferença de temperatura no aquecedor de 17,7 °C e uma vazão (m) igual a 0,031 kg/s. Ao se comparar as duas situações, observa-se que para um aumento de vazão da ordem de 6% no aquecedor, tem-se uma variação 6% menor na diferença de temperatura no aquecedor elétrico. A Fig. 4.20 mostra o aumento da temperatura na saída do aquecedor elétrico no experimento com a linha de desvio 2 em relação ao experimento sem linha de desvio. Esse aumento é de aproximadamente 7 °C. Deve-se ressaltar que se as condições iniciais dos dois transientes fossem iguais, o acréscimo na temperatura de saída no aquecedor elétrico seria ainda maior.

Figura 4.20 - Temperaturas de Saída do Aquecedor com o Experimento sem Linha de Desvio e com Linha de Desvio 2

A Fig. 4.21 mostra a comparação das temperaturas registradas ao longo do transitório pelos termopares TC 15 e TC 16, instalados na linha de desvio 2. A vazão na linha de desvio (m_{d2}) sofre uma inversão de sentido em relação à etapa 2.

Figura 4.21 – Temperaturas TC 15 e TC 16 ao Longo do Transitório

Tem-se a temperatura TC16 maior que a temperatura TC15, portanto a vazão na linha de desvio tem sentido contrário à etapa 2 (ver Fig. 4.22).

Figura 4.22 – Posição dos Termopares TC 15 e TC 16 na Linha de Desvio 2

Nesse capítulo é apresentado o modelo matemático para o trecho externo da BCN, desenvolvido com o programa “Engineering Equation Solver” (EES) de KLEIN e ALVARADO (2000). Esse modelo é utilizado para reproduzir os experimentos de circulação natural pelo circuito externo.

5.1 Modelo Térmico

O modelo matemático é um conjunto de equações de balanço de fluxo de calor de acordo com KREITH (1977), uma para cada nó, que juntamente com as correlações para o cálculo dos coeficientes de película, número de Reynolds e condições de contorno estabelecidas, são resolvidas simultaneamente com o EES.

Para o modelo assumiu-se as seguintes hipóteses:

- Fluido incompressível (Aproximação de Boussinesq) e;
- Escoamento unidirecional.

As trocas térmicas consideradas são:

- Condução de calor radial na tubulação;
- Convecção entre as superfícies internas com o fluido e externas com o ar e;
- Transporte entálpico em função do escoamento do fluido.

A condução de calor axial na tubulação e no fluido foi desprezada e as propriedades físicas dos metais (inox e cobre) foram consideradas constantes.

As condições iniciais utilizadas são:

- Temperatura inicial do primário (T_{if}) e;
- Temperatura inicial do secundário – trocador de calor (T_{ies}).

Para o circuito, em sua parte externa, considerou-se 4 regiões (Aquecedor Elétrico, Perna Quente, Trocador de Calor e Perna Fria), conforme mostrado na Fig. 5.1. Cada região foi discretizada em um número finito de nós (i), que pode variar de 1 até n.

Figura 5.1- Regiões do Modelo Matemático

O modelo utiliza a equação de conservação de quantidade de movimento e a equação de energia. Como o circuito é fechado, os efeitos da aceleração convectiva são anulados. Para facilitar a solução, a equação de quantidade de movimento foi desacoplada da equação de energia. As equações são resolvidas simultaneamente com o EES.

5.2 Equação de Conservação da Quantidade de Movimento

A equação de conservação da quantidade de movimento é escrita para cada região da BCN, conforme Fig. 5.1.

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} \right) = - \frac{\partial P}{\partial s} - \frac{\partial \tau}{\partial s} + \rho g \quad (7)$$

→ Forças de Campo
 → Forças Viscosas = Atrito
 → Forças de Pressão

onde:

ρ : densidade do fluido {kg/m³};

v : velocidade do fluido na direção do escoamento {m/s};

s : coordenada espacial {m};

t : tempo {s} e;

g : aceleração da gravidade {m/s²}.

O lado esquerdo da equação (7) é escrito como:

$$r \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} \right) = r \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \frac{V}{A^2} \quad (8)$$

onde:

A : área {m²};

Q : vazão {m³/s} e;

V : volume {m³}.

Aplicando-se a equação (7) para cada região, tem-se:

- Região 01:

$$\frac{\mathbf{r}_{01} V_{01}}{A_{01}^2} \dot{Q} = (p_0 - p_1) + \mathbf{r}_{01} g (z_0 - z_1) - f_{01} \frac{L_{01}}{d_{01}} \mathbf{r}_{01} \frac{Q^2}{2A_{01}^2} \quad (9)$$

onde:

$\tilde{n}_{01}$: densidade média – região 01 {kg/m³};

V_{01} : volume – região 01 {m³};

A_{01} : área de escoamento – região 01 {m²};

$\dot{Q}$: taxa de variação da vazão volumétrica ($\frac{\partial Q}{\partial t}$) {m³/s²};

p : pressão {N/m²};

g : aceleração da gravidade {m/s²};

z : cota em relação a um nível qualquer {m};

f_{01} : fator de atrito;

L_{01} : comprimento equivalente {m} e;

d_{01} : diâmetro hidráulico no trecho {m}

- Região 12:

$$\frac{\mathbf{r}_{12} V_{12}}{A_{12}^2} \dot{Q} = (p_1 - p_2) + \mathbf{r}_{12} g (z_1 - z_2) - f_{12} \frac{L_{12}}{d_{12}} \mathbf{r}_{12} \frac{Q^2}{2A_{12}^2} \quad (10)$$

- Região 23:

$$\frac{\mathbf{r}_{23} V_{23}}{A_{23}^2} \dot{Q} = (p_2 - p_3) + \mathbf{r}_{23} g(z_2 - z_3) - f_{23} \frac{L_{23}}{d_{23}} \mathbf{r}_{23} \frac{Q^2}{2A_{23}^2} \quad (11)$$

- Região 30:

$$\frac{\mathbf{r}_{30} V_{30}}{A_{30}^2} \dot{Q} = (p_3 - p_0) + \mathbf{r}_{30} g(z_3 - z_0) - f_{30} \frac{L_{30}}{d_{30}} \mathbf{r}_{30} \frac{Q^2}{2A_{30}^2} \quad (12)$$

Como o circuito é fechado, pode-se somar lado a lado as equações de cada trecho. A soma do lado esquerdo (L_{esq}) da equação é a seguinte:

$$\left(\frac{\mathbf{r}_{01} V_{01}}{A_{01}^2} + \frac{\mathbf{r}_{12} V_{12}}{A_{12}^2} + \frac{\mathbf{r}_{23} V_{23}}{A_{23}^2} + \frac{\mathbf{r}_{30} V_{30}}{A_{30}^2} \right) \dot{Q} = L_{esq} \quad (13)$$

A somatória do lado direito (L_{dir}) é o resultado da soma de dois fatores denominados $\Delta f c_{dir}$ e Δt_{dir} :

$$\Delta f c_{dir} = g[\mathbf{r}_{01}(z_0 - z_1) + \mathbf{r}_{12}(z_1 - z_2) + \mathbf{r}_{23}(z_2 - z_3) + \mathbf{r}_{30}(z_3 - z_0)] \quad (14)$$

e

$$\Delta t_{dir} = \frac{Q^2}{2} \left[\left(\frac{f_{01} \mathbf{r}_{01} L_{01}}{d_{01} A_{01}^2} \right) + \left(\frac{f_{12} \mathbf{r}_{12} L_{12}}{d_{12} A_{12}^2} \right) + \left(\frac{f_{23} \mathbf{r}_{23} L_{23}}{d_{23} A_{23}^2} \right) + \left(\frac{f_{30} \mathbf{r}_{30} L_{30}}{d_{30} A_{30}^2} \right) \right] \quad (15)$$

Como o modelo foi feito para o circuito sem linha de desvio, utilizou-se o fator de atrito global (f) da BCN (trecho 1 – 2), que representa um valor médio dos fatores de atritos obtidos experimentalmente para o trecho externo da BCN (ver item 3.4). Esses outros fatores de atrito serão utilizados no modelo completo, que considera as linhas de desvio, e que será desenvolvido em trabalhos futuros. Assim sendo, os fatores de atrito f_{01} , f_{12} , f_{23} e f_{30} são substituídos pelo fator de atrito global (f). Para número de Reynolds (Re) ≤ 1.500 , tem-se:

$$f = \frac{3,39}{Re^{0,68}} \quad (16)$$

Para número de Reynolds (Re) > 1.500 , tem-se:

$$f = -0,37 + (5 \cdot 10^{-4}) Re - (2,39 \cdot 10^{-7}) Re^2 + (4,55 \cdot 10^{-11}) Re^3 - (2,98 \cdot 10^{-15}) Re^4 \quad (17)$$

A equação (15) se torna:

$$\Delta t_{dir} = \frac{Q^2 f}{2} \left[\left(\frac{L_{01} r_{01}}{d_{01} A_{01}^2} \right) + \left(\frac{L_{12} r_{12}}{d_{12} A_{12}^2} \right) + \left(\frac{L_{23} r_{23}}{d_{23} A_{23}^2} \right) + \left(\frac{L_{30} r_{30}}{d_{30} A_{30}^2} \right) \right] \quad (18)$$

Igualando-se os dois lados (L_{dir} e L_{esq}), tem-se:

$$\dot{Q} = \frac{(\Delta f c_{dir} - \Delta t_{dir})}{\left(\frac{\mathbf{r}_{01} V_{01}}{A^2_{01}} + \frac{\mathbf{r}_{12} V_{12}}{A^2_{12}} + \frac{\mathbf{r}_{23} V_{23}}{A^2_{23}} + \frac{\mathbf{r}_{30} V_{30}}{A^2_{30}} \right)} \quad (19)$$

O programa EES integra a equação (19) no tempo pelo método de Euler:

$$Q_i^{t+\Delta t} = Q_i^t + \Delta t \frac{\partial Q_i^t}{\partial t} \quad (20)$$

5.3 Equação de Conservação de Energia

A equação de conservação de energia resulta da aplicação da primeira lei da termodinâmica a cada volume de controle.

5.3.1 Aquecedor Elétrico

O volume de controle é representado na Fig. 5.2.

Figura 5.2 – Volume de Controle – Aquecedor Elétrico

Para cada volume de controle tem-se:

$$M c_p \frac{\partial T}{\partial t} = S + G \Delta T + \dot{m} \Delta h \quad (21)$$

onde:

M : massa {kg};

c_p : calor específico {J/kg °C};

S : geração de calor {W}

G : condutância condutiva e/ou convectiva {W/°C};

$\dot{m}$: vazão em massa {kg/s} e;

Δh : variação de entalpia {J/kg}.

Sabe-se que:

$$M = \rho V \quad (22)$$

onde:

ρ : densidade {kg/m³} e;

V : volume {m³}.

Substituindo a equação (22) na equação (21):

$$\rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t} = S + G \Delta T + \dot{m} \Delta h \quad (23)$$

A equação (23) é genérica. Pode-se determinar, em cada nó (i), a temperatura desejada. A densidade da água (ρ_a) é função da temperatura do fluido no nó. Adotou-se constantes:

- calor específico da água (c_{pa}) e;
- propriedades físicas dos metais (aço inox e cobre).

A seguir são apresentadas as equações de balanço no aquecedor (resistência elétrica, fluido e no tubo de inox).

- **Energia na Resistência Elétrica (r)**

$$\mathbf{r}_i V_{r(i)} c_{pi} \frac{\partial T_{r(i)}}{\partial t} = S_{(i)} + G_1 (Ta_{(i)} - Tr_{(i)}) \quad (24)$$

onde:

$\tilde{n}_i$: densidade resistência elétrica – (inox) $\{\text{kg/m}^3\}$;

$V_{r(i)}$: volume da resistência elétrica em cada nó (i) $\{\text{m}^3\}$;

c_{pi} : calor específico resistência elétrica – (inox) $\{\text{J/kg}^\circ\text{C}\}$;

$T_{r(i)}$: temperatura resistência em cada nó (i) $\{^\circ\text{C}\}$;

t : tempo $\{\text{s}\}$;

$S_{(i)}$: fonte de calor $\{\text{W}\}$ e;

G_1 : condutância por condução/convecção na interface inox fluido $\{\text{W}/^\circ\text{C}\}$.

- **Energia no Primário (a)**

$$\begin{aligned} \rho_{a(i)} V_{a(i)} c_{pa} \frac{\partial T_{a(i)}}{\partial t} = G_1 (T_{r(i)} - T_{a(i)}) + G_2 (T_{m(i)} - T_{a(i)}) \\ + \dot{m} c_{pa} (T_{a(i-1)} - T_{a(i)}) \end{aligned} \quad (25)$$

onde:

$\rho_{a(i)}$: densidade do fluido em cada nó (i) $\{\text{kg/m}^3\}$;

$V_{a(i)}$: volume do fluido em cada nó (i) $\{\text{m}^3\}$;

$T_{a(i)}$: temperatura do fluido no nó(i) $\{^\circ\text{C}\}$;

$T_{m(i)}$: temperatura da parede do tubo em cada nó (i) $\{^\circ\text{C}\}$;

G_2 : condutância por convecção/condução interface fluido inox $\{\text{W}/^\circ\text{C}\}$;

$T_{a(i-1)}$: temperatura do fluido no nó anterior $\{^\circ\text{C}\}$ e;

$\dot{m}$: vazão $\{\text{kg/m}^3\}$.

- **Energia no Tubo de Inox (m)**

$$\rho_i V_{m(i)} c_{pi} \frac{\partial T_{m(i)}}{\partial t} = G_2 (T_{a(i)} - T_{m(i)}) + G_3 (T_{amb} - T_{m(i)}) \quad (26)$$

onde:

$V_{m(i)}$: volume do tubo em cada nó (i) $\{m^3\}$;

G_3 : condutância por condução/convecção tubo – isolamento ar $\{W/^\circ C\}$ e;

T_{amb} : temperatura ambiente $\{^\circ C\}$.

5.3.2 Trocador de Calor

Para o modelo do trocador de calor foi considerada a divisão de volumes da Fig. 5.3, acoplados conforme Fig. 5.4. O trocador de calor foi dividido em três regiões denominadas região 1, região 2 e região 3. Deve-se notar que a evaporação no secundário do trocador de calor não foi considerada.

Figura 5.3 – Esquema para Modelo do Trocador de Calor

Figura 5.4 – Regiões no Trocador de Calor

- Energia no Primário (a)

$$r_{a(i)} V_{a(i)} c_{p_a} \frac{\partial T_{a(i)}}{\partial t} = G_4 (T_{c(i)} - T_{a(i)}) + \dot{m} c_{p_a} (T_{a(i-1)} - T_{a(i)}) \quad (27)$$

onde:

G_4 : condutância por convecção/condução fluido – tubo $\{W/^{\circ}C\}$;

$T_{c(i)}$: temperatura tubo de cobre $\{^{\circ}C\}$ e;

$V_{a(i)}$: volume de fluido primário $\{m^3\}$.

- **Energia no Tubo de Cobre (c)**

$$r_c V_{c(i)} c_{pc} \frac{\partial T_{c(i)}}{\partial t} = G_4 (T_{a(i)} - T_{c(i)}) + G_5 (T_{s(i)} - T_{c(i)}) \quad (28)$$

onde:

G_5 : condutância por condução/convecção tubo – fluido $\{W/^{\circ}C\}$;

$T_{s(i)}$: temperatura secundário $\{^{\circ}C\}$ e;

$V_{c(i)}$: volume do tubo de cobre $\{m^3\}$.

- **Energia no Secundário (s)**

$$r_{a(i)} V_{s(i)} c_{pa} \frac{\partial T_{s(i)}}{\partial t} = G_5 (T_{c(i)} - T_{s(i)}) + G_6 (T_{ca(i)} - T_{s(i)}) + \dot{m}_s c_{pa} (T_{s(i+1)} - T_{s(i)}) \quad (29)$$

onde:

G_6 : condutância por convecção/condução fluido – carcaça $\{W/^{\circ}C\}$;

$T_{ca(i)}$: temperatura carcaça $\{^{\circ}C\}$ e;

$V_{s(i)}$: volume do secundário $\{m^3\}$.

- **Energia na Carcaça (ca)**

$$r_{ca} V_{ca(i)} c_{pc} \frac{\partial T_{ca(i)}}{\partial t} = G_6 (T_{s(i)} - T_{ca(i)}) + G_7 (T_{amb} - T_{ca(i)}) \quad (30)$$

onde:

G_7 : condutância por condução/convecção carcaça – ar $\{W/^{\circ}C\}$ e;

$V_{ca(i)}$: volume da carcaça $\{m^3\}$.

5.3.3 Tubulação

O volume de controle para a tubulação, tanto para a “perna quente” como para a “perna fria” é o mostrado na Fig. 5.5. A condução axial foi desprezada em função da espessura do tubo ser pequena (6.10^{-4} m).

Figura 5.5 – Esquema para Modelo da Tubulação

- Energia no primário (a)

$$r_{a(i)} V_{a(i)} c_{pa} \frac{\partial T_{a(i)}}{\partial t} = G_8 (T_{c(i)} - T_{a(i)}) + \dot{m} c_{pa} (T_{a(i-1)} - T_{a(i)}) \quad (31)$$

onde:

G_8 : condutância por convecção/condução fluido – tubo $\{W/^\circ C\}$;

$V_{a(i)}$: volume do fluido $\{m^3\}$;

$T_{a(i)}$: temperatura fluido $\{^\circ C\}$ e;

$T_{c(i)}$: temperatura do tubo de cobre $\{^\circ C\}$.

- **Energia no Tubo de Cobre (c)**

$$r_c V_{c(i)} c_{pc} \frac{\partial T_{c(i)}}{\partial t} = G_8 (T_{a(i)} - T_{c(i)}) + G_9 (T_{amb} - T_{c(i)}) \quad (32)$$

onde:

G_9 : condutância por condução/convecção tubo – ar $\{W/^\circ C\}$ e;

$V_{c(i)}$: volume tubo de cobre $\{m^3\}$.

As equações (24), (25), (26), (27), (28), (29), (30), (31) e (32) são integradas no tempo pelo método de Euler.

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \Delta t \frac{\partial T_i^t}{\partial t} \quad (33)$$

5.4 Propriedades Físicas da Água

Na solução das equações de conservação de quantidade de movimento e de energia, as propriedades da água foram consideradas nas condições médias de temperatura em cada região. Como cada região é dividida em volumes de controle

iguais, as médias de temperatura podem ser obtidas por meio da média aritmética das temperaturas em cada volume de controle, como mostrado a seguir.

$$\bar{T}_{região} \langle ^\circ C \rangle = \frac{1}{n} \sum_i T_{a(i)} \quad (34)$$

As propriedades físicas da água são avaliadas nessas temperaturas médias por meio de funções de aproximação preparadas especificamente para as condições de operação da bancada ($T \leq 100^\circ C$).

A densidade da água (ρ_a) foi aproximada pela seguinte função:

$$\tilde{n}_a \left\langle \frac{kg}{m^3} \right\rangle = 1000,54 - (6,9 \cdot 10^{-2}) \bar{T}_{região} - (4 \cdot 10^{-3}) \bar{T}_{região}^2 \quad (35)$$

A função de aproximação da viscosidade da água (μ_a) é a seguinte:

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_a \left\langle \frac{kg}{m.s} \right\rangle = & (1,79 \cdot 10^{-3}) - (5,89 \cdot 10^{-5}) \bar{T}_{região} + (1,28 \cdot 10^{-6}) \bar{T}_{região}^2 \\ & - (1,72 \cdot 10^{-8}) \bar{T}_{região}^3 + (1,26 \cdot 10^{-10}) \bar{T}_{região}^4 - (3,72 \cdot 10^{-13}) \bar{T}_{região}^5 \end{aligned} \quad (36)$$

Para a condutividade térmica da água (K_a) foi utilizada a seguinte função:

$$K_a \left\langle \frac{W}{m \text{ } ^\circ C} \right\rangle = 0,56 + (2,26.10^{-3}) \bar{T}_{região} - (9,72.10^{-6}) \bar{T}_{região}^2 \quad (37)$$

5.5 Coeficientes de Película

Conforme Silva (1980), o modelo utiliza, no primário, a correlação de Sieder-Tate (regime laminar) e MacAdams (regime turbulento), que faz uma correção devido à variação de viscosidade entre as temperaturas da parede do tubo e média do fluido. A correlação de Sieder-Tate é a seguinte:

- **Laminar – $Re \leq 2.000$)**

$$h = 1,86 \left(\frac{K_a}{d} \right) (Pr Re)^{1/3} \left(\frac{d}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{m}_s} \right)^{0,14} \quad (38)$$

onde:

h : coeficiente de película $\{W/m^2 \text{ } ^\circ C\}$;

d : diâmetro hidráulico $\{m\}$;

Pr : número de Prandtl;

Re : número de Reynolds;

L : comprimento do tubo $\{m\}$;

$\dot{\mathbf{i}}$: viscosidade dinâmica do fluido $\{kg/ms\}$ e;

$\dot{\mathbf{i}}_s$: viscosidade dinâmica temperatura parede do tubo $\{kg/ms\}$.

O número de Prandtl (Pr) é definido como:

$$\text{Pr} = \frac{C_{pa} \mathbf{m}_a}{K_a} \quad (39)$$

O número de Reynolds (Re) é definido a seguir:

$$\text{Re} = \frac{v d \mathbf{r}_a}{\mathbf{m}_a} \quad (40)$$

onde:

v : velocidade do fluido {m/s}.

A correlação de MacAdams é a seguinte:

- **Turbulento – $\text{Re} > 2.000$**

$$h = 0,023 \left(\frac{K_a}{d} \right) (\text{Re})^{0,8} (\text{Pr})^n \quad (41)$$

onde:

$n = 0,4$: fluido sendo aquecido e;

$n = 0,3$: fluido sendo resfriado.

Para o secundário do trocador de calor, foi utilizado o seguinte procedimento na determinação do coeficiente de película (h_{tre}):

- O modelo numérico foi simulado baseado nas condições iniciais de dois experimentos (Experimento 1 e 2) realizados em circulação natural. Nos dois casos, adotou-se um valor para o coeficiente de película no modelo (h_{tre}) e comparou-se com os resultados experimentais. O valor assumido para o coeficiente de película (h_{tre}) que fez o modelo numérico reproduzir com boa precisão o secundário do trocador de calor nos experimentos na BCN foi de $550 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

- **Experimento 1**

A Fig. 5.6 mostra a comparação entre os resultados do experimento e o do modelo, apresentando as temperaturas de saída (TC 18) e de entrada (TC 24) no trocador de calor, para uma vazão no secundário de 98 l/h. A potência fornecida é de 2.400W. As condições iniciais do modelo são iguais às do experimento e são:

- Temperatura ambiente (T_{amb}) = 25 °C ;
- Temperatura inicial primário (T_{if}) = 25 °C e;
- Temperatura inicial secundário (T_{ies}) = 24 °C .

Figura 5.6 – Comparação Experimento 1 e Modelo para Temperaturas TC 18 e TC 24 – Trocador de Calor

- **Experimento 2**

O experimento 2 apresenta uma vazão no secundário de 50 l/h, para uma potência fornecida no aquecedor elétrico de 2.400 W. A comparação experimental e do modelo, em relação as temperaturas de entrada (TC 24) e de saída (TC 18) do trocador de calor, é mostrada na Fig. 5.7. As condições iniciais do modelo e experimento são:

- Temperatura ambiente (T_{amb}) = 25 °C;
- Temperatura inicial primário (T_{if}) = 20 °C e;
- Temperatura inicial secundário (T_{ies}) = 19 °C.

Figura 5.7 – Comparação Experimento 2 e Modelo para Temperaturas TC 18 e TC 24 – Trocador de Calor

As simulações do modelo matemático, em relação à temperatura de saída do secundário do trocador de calor, apresentam um resultado bem próximo aos experimentos.

Dessa forma, pode-se adotar o valor constante do coeficiente de película do secundário do trocador de calor (h_{tre}) igual a 550 W/m² °C.

O modelo de simulação dos processos termo-hidráulicos da BCN no trecho externo está completo.

5.6 Ajuste do Modelo Matemático

Para a verificação e ajuste do modelo da BCN em seu trecho externo, foi simulado um transitório de aumento de potência de 2.400 W, com uma vazão no secundário (m_s) de 98 l/h. A Fig. 5.8 mostra as temperaturas, calculadas e medidas, de entrada e de saída no aquecedor elétrico ao longo do transitório.

Figura 5.8 – Temperatura de Entrada e Saída no Aquecedor Elétrico

A potência térmica no aquecedor calculada por meio de dados experimentais (aquisição de dados), a potência térmica no aquecedor calculada no modelo e as vazões medida e calculada ao longo do transitório são mostradas na Fig. 5.9. Nota-se a diferença inicial entre a vazão medida e calculada. Esse fato é função da influência da temperatura no sensor do medidor de vazão magnético. Em regime permanente, a vazão calculada e medida são praticamente iguais (0,031 kg/s). A potência fornecida (2.400 W) e as potências térmicas no secundário do trocador de calor calculadas por meio dos dados experimentais e do modelo são mostradas na Fig. 5.10.

Figura 5.9 – Potência Calculada no Aquecedor e Vazão

Figura 5.10 – Potência Fornecida e Calculada no Secundário do Trocador de Calor

No transitório, observa-se que as temperaturas de entrada, de saída do aquecedor (Fig. 5.8), a potência térmica no aquecedor e a vazão (Fig. 5.9) sofrem uma oscilação a partir do instante 300 s. O início do transitório, tanto para as temperaturas de entrada e saída do aquecedor, como potência térmica no aquecedor e vazão, é mostrado, respectivamente, nas Fig. 5.11 e Fig. 5.12.

Figura 5.11 – Temperaturas de Entrada e Saída no Aquecedor no Início do Transitório

Figura 5.12 – Potência Térmica no Aquecedor e Vazão no Início do Transitório

A Fig. 5.13 relaciona fases distintas de aceleração do fluido na BCN. No início do transitório, todo o fluido está numa mesma temperatura. Quando a potência é fornecida por meio do aquecedor elétrico, a temperatura da “perna quente” começa a subir, fazendo com que o fluido se acelere (Fase 1). A Fig. 5.13 pode ser analisada do seguinte modo: Conforme o fluido da “perna quente” vai atingindo o nível superior da BCN, a velocidade atinge um valor máximo e começa a diminuir quando o fluido mais aquecido chega na “perna fria”. As variações geométricas (trechos horizontais / verticais) da BCN determinam o comportamento oscilatório.

Figura 5.13 – Esquema de Aceleração do Fluido

Para verificar a precisão do modelo numérico, pode-se efetuar o balanço de energia no circuito, em regime permanente. No aquecedor elétrico, a potência térmica calculada (Q_{taq}) é feita por meio de balanço térmico ($Q=mc_p\Delta T$). A perda de potência para o ambiente no aquecedor (Q_{paq}) é calculada por:

$$Q_{paq} = Q_f - Q_{taq} \quad (42)$$

onde:

Q_f : Potência fornecida.

As potências dissipadas na “perna quente” (Q_{ppq}) , na “perna fria” (Q_{ppf}), e transferidas no primário do trocador de calor (Q_{tcp}) são calculadas por:

$$Q = \dot{m} c_{pa} \Delta T \quad (43)$$

onde:

Q : Potência térmica;

$\dot{m}$: Vazão no primário;

c_{pa} : Calor específico da água e;

ΔT : Temperatura de saída – temperatura de entrada.

A potência retirada pelo secundário do trocador de calor (Q_{tcs}) é dada por:

$$Q_{tcs} = \dot{m}_s c_{pa} \Delta T \quad (44)$$

onde:

Q_{tcs} : Potência térmica no secundário;

$\dot{m}_s$: Vazão no secundário;

c_{pa} : Calor específico da água e;

ΔT : Temperatura de saída – temperatura de entrada.

O modelo fornece a vazão e as temperaturas na BCN, em regime permanente, que estão representadas na Fig. 5.14.

Figura 5.14 – Esquema de Vazão e Temperaturas – Modelo Trecho Externo

A Tabela 5.1 compara o balanço térmico do circuito calculado por meio do modelo (Q_i) e o balanço térmico (P_i) feito no experimento sem linha de desvio (ver capítulo 4).

Tabela 5.1 – Balanço Térmico BCN – Regime Permanente

	Experimental P_i (W)	Calculada Q_i (W)
Potência Fornecida	2.400	2.400
Potência Térmica no Aquecedor	2.297	2.284
Perda de Calor no Aquecedor para o Ambiente	103	116
Perda de Calor na Perna Quente para o Ambiente	78	13
Perda de Calor na Perna Fria para o Ambiente	52	34
Potência Térmica no Primário – Trocador de Calor	2.167	2.237
Potência Térmica no Secundário – Trocador de Calor	2.136	2.202
Perda de Calor na Carcaça Trocador de Calor	31	35

Por meio dos resultados acima, pode-se concluir que o modelo numérico reproduz com boa precisão o experimento sem linha de desvio. Observa-se que a maior discrepância no resultado ocorre na perda de calor para o ambiente na perna quente. Esse fato se deve em função da leitura imprecisa da medida de temperatura do termopar na perna quente. Sabe-se que uma pequena variação na diferença de temperatura (ΔT), ocasiona uma sensível mudança no resultado do cálculo da potência ($Q = mc_p \Delta T$).

O objetivo principal do trabalho, que é o estudo experimental da utilização de linhas de desvio entre a fonte quente e fonte fria, para controle de temperatura, foi plenamente atingido.

Os testes realizados mostram que a aplicação de métodos teóricos para descrição da vazão, dos processos e fenômenos de transferência de calor envolvidos na BCN, com as linhas de desvio fechadas, produzem bons resultados em comparação com alguns experimentos realizados.

A potência do aquecedor em conjunto com a altura total do circuito e o diâmetro da tubulação, são adequados para a obtenção de vazões facilmente mensuráveis na faixa especificada para o medidor de vazão.

A capacidade do trocador de calor é adequada para a realização dos experimentos, considerando-se o fato de ter sido utilizada uma vazão bem inferior que a máxima possível para o secundário.

O sistema de controle de potência e o sistema de aquisição de dados operaram adequadamente, demonstrando precisão e estabilidade.

Os experimentos mostraram que medidores de vazão magnéticos são adequados para instalações experimentais em circulação natural, desde que tomados cuidados adicionais com sua calibração. Sugere-se investigar a instalação de outro medidor de vazão magnético na entrada do aquecedor elétrico.

O modelo numérico desenvolvido apresentou boa concordância com os dados experimentais obtidos, comprovando assim, a possibilidade de sua utilização para simulação de outros transientes em circulação natural.

O trabalho é atual, avançado e oferece uma contribuição original no âmbito da pesquisa e desenvolvimento das análises dos processos termo – hidráulicos envolvidos no comportamento de um sistema de resfriamento operando em circulação natural.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a inclusão das linhas de desvio no modelo numérico já existente, para simulação dos experimentos em circulação natural em todos os trechos da BCN e para determinação das perdas para o ambiente durante a realização dos experimentos, a instalação de um medidor de temperatura no galpão, próximo de onde se localiza a BCN, para a medição da temperatura ambiente.

ANEXO 1 – LEI DE FARADAY DE INDUÇÃO MAGNÉTICA

Um líquido eletricamente condutivo fluindo através de um campo magnético induz uma diferença de potencial que é perpendicular a esse campo e à direção da vazão. Essa diferença de potencial é proporcional à velocidade média do fluido.

$$\Delta V = BLv \quad (45)$$

onde:

ΔV : Voltagem induzida;

B : Intensidade do campo magnético – densidade de fluxo;

L : Distância entre os eletrodos – diâmetro interno do medidor e;

v : Velocidade média do fluido.

O princípio de funcionamento do medidor de vazão magnético está baseado na Lei de Faraday de Indução Magnética e está representado na Fig. An1.1.

Figura An1.1 – Princípio de Funcionamento do Medidor de Vazão Magnético

A tensão induzida (ΔV) no fluido é medida por meio de dois eletrodos sensores montados diametralmente opostos no medidor de vazão. A distância entre os dois eletrodos sensores é a medida do diâmetro interno do tubo (d). O fluxo de densidade (B) é proporcional à corrente na bobina (I), vezes uma constante (k). Assim sendo, a equação (45) torna-se:

$$\Delta V = I k d v \quad (46)$$

Sabendo-se que:

$$v = \frac{\text{vazão}}{\text{área}} = \frac{Q}{A} \quad (47)$$

Substituindo a equação (47) na equação (46), tem-se:

$$\Delta V = \frac{4QIk}{d^2} \quad (48)$$

Pode-se notar pela equação (48) que se a corrente I for constante, a voltagem induzida (ΔV) é diretamente proporcional à vazão (Q).

APÊNDICE 1 – CALIBRAÇÃO DOS ROTÂMETROS

- **Rotâmetro Primário**

A calibração do rotâmetro primário foi feita utilizando-se um balão de vidro com um volume interno de 24,368 l ao ser preenchido com água à 20°C.

O esquema da montagem do experimento para a realização da calibração experimental do rotâmetro primário é mostrado na Fig. Ap1.1.

Figura Ap1.1 – Esquema da Calibração do Rotâmetro Primário

O procedimento consistiu na realização de três medições, considerando-se a variação temporal do evento, para o preenchimento com água do volume de controle constante (balão de vidro). A medida de referência para o volume de 24,368 l, utilizando-se água à 20°C, é a marca de 41 mm na escala fixada no pescoço do balão de vidro, conforme Fig. Ap1.2. O fluido encontrava-se a 25°C durante a realização do experimento.

Figura Ap1.2 – Balão de Vidro com Escala Graduada

Medindo-se o tempo, por meio de um cronômetro de acionamento manual, para o preenchimento do volume do balão de vidro, foi possível a determinação da curva de calibração do rotâmetro primário, pois tem-se a vazão medida no

rotâmetro (VRp) e a vazão calculada através do volume do balão de vidro (VC). Para cada valor de vazão no rotâmetro (VRp) tem-se três medidas de vazão calculadas (VC), como é mostrado na Tabela Ap1.1. Observa-se que os resultados foram apresentados em l/h, uma vez que o instrumento apresenta essa unidade.

Tabela Ap1.1 – Vazões Medidas e Calculadas no Rotâmetro Primário

Vazão no Rotâmetro VRp (l/h)	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Tempo 3 (s)	Vazão 1 Calculada (VC1) (l/h)	Vazão 2 Calculada (VC2) (l/h)	Vazão 3 Calculada (VC3) (l/h)
25	3306	3302	3309	26.54	26.57	26.51
30	2872	2865	2871	30.54	30.62	30.56
40	2192	2185	2200	40.02	40.15	39.87
50	1734	1692	1742	50.59	51.85	50.36
60	1463	1438	1464	59.96	61.00	59.92
70	1276	1247	1275	68.75	70.35	68.80
80	1126	1110	1095	77.91	79.03	80.11
90	988	972	974	88.79	90.25	90.07
100	885	850	879	99.12	103.21	99.80
110	803	816	810	109.25	107.51	108.30
120	734	737	733	119.52	119.03	119.68
130	676	685	681	129.77	128.07	128.82
140	626	618	626	140.14	141.95	140.14
150	585	587	586	149.96	149.45	149.70
175	501	505	507	175.10	173.71	173.03
200	437	437	433	200.74	200.74	202.60

A partir dos valores tabelados acima e considerando-se um erro (2σ) para cada medida de vazão (VR_p), tem-se a curva de calibração do rotâmetro primário que é mostrada na Fig. Ap1.3.

Figura Ap1.3 – Curva de Calibração do Rotâmetro Primário

- **Rotâmetro Secundário**

No secundário da BCN está instalado um rotâmetro para leitura da vazão de água de resfriamento do trocador de calor (ver Fig. Ap1.4).

Figura Ap1.4 – Secundário da Bancada de Circulação Natural

O rotâmetro secundário foi aferido em situação de uso na BCN. Para tal, adotou-se a seguinte rotina experimental:

- Determinou-se um padrão para o volume de controle, ou seja, um recipiente com volume calibrado por meio de um balão de vidro graduado. Esse balão é o mesmo utilizado na calibração do rotâmetro primário. Na calibração desse recipiente, utilizou-se água a uma temperatura média de 25°C ($\rho = 996,58 \text{ kg/m}^3$);

- Nesse recipiente (ver Fig. Ap1.5) marcou-se os volumes 6 l , 12 l e 16 l;

Figura Ap1.5 – Recipiente Calibrado

- Fez-se circular, no secundário, uma determinada vazão, fixada através da leitura direta na escala do rotâmetro. Variou-se a vazão partindo de 30 l/h e assumiu-se, a seguir, degraus de 10 l/h até 250 l/h. Registrou-se os tempos, em segundos, para essas vazões completarem os níveis do recipiente calibrado (6 l , 12 l e 16 l);
- Com os resultados obtidos, montou-se a Tabela Ap1.2, que relaciona a vazão no rotâmetro (VRs) com as vazões calculadas. Os resultados são apresentados em l/h, uma vez que o instrumento utiliza essa unidade.

Tabela Ap1.2 – Vazões Medidas e Calculadas no Rotâmetro Secundário

Vazão Rotâmetro	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Tempo 3 (s)	Vazão 1 Calculada (VC1)	Vazão 2 Calculada (VC2)	Vazão 3 Calculada (VC3)
VRs (l/h)	6 l	12 l	16 l	(l/h)	(l/h)	(l/h)
30	775	1.593	2.142	27.87	27.12	26.89
40	556	1.138	1.538	38.85	37.96	37.45
50	416	864	1.180	51.92	50.00	48.81
60	378	765	1.039	57.14	56.47	55.44
70	343	680	904	62.97	63.53	63.72
80	282	563	759	76.60	76.73	75.89
90	244	500	669	88.52	86.40	86.10
100	212	434	589	101.89	99.54	97.79
110	202	404	541	106.93	106.93	106.47
120	185	371	495	116.76	116.44	116.36
130	173	342	457	124.86	126.32	126.04
140	164	325	433	131.71	132.92	133.03
150	142	286	386	152.11	151.05	149.22
160	136	273	366	158.82	158.24	157.38
170	121	249	336	178.51	173.49	171.43
180	116	234	320	186.21	184.62	180.00
190	112	221	302	192.86	195.48	190.73
200	105	212	288	205.71	203.77	200.00
210	104	204	273	207.69	211.76	210.99
220	97	189	254	222.68	228.57	226.77
230	94	190	257	229.79	227.37	224.12
240	90	182	244	240.00	237.36	236.07
250	88	180	240	245.45	240.00	240.00

A partir dos valores tabelados acima e considerando-se um erro (2σ) para cada medida de vazão (VRs), tem-se a curva de calibração do rotâmetro secundário, que é mostrada na Fig. Ap1.6.

Figura Ap1.6 – Curva de Calibração do Rotâmetro Secundário

Pelos resultados obtidos, conclui-se que os rotômetros utilizados no primário e secundário da BCN estão satisfatoriamente aferidos e dentro dos padrões esperados para leitura de vazão.

APÊNDICE 2 – CALIBRAÇÃO DE POTÊNCIA

Os testes efetuados para a calibração de potência permitiram estabelecer alguns resultados, relacionando temperaturas de saída e de entrada no aquecedor elétrico, para uma mesma vazão até o sistema atingir o regime permanente. A título de exemplo, os resultados abaixo são mostrados por meio da Fig. Ap2.1 e da Fig. Ap2.2, respectivamente para vazões de 49,57 l/h e 92,66 l/h.

Figura Ap2.1 – Temperaturas no Aquecedor com Vazão 49,57 l/h

Figura Ap2.2 – Temperaturas no Aquecedor com Vazão 92,66 l/h

Fazendo-se os ajustes das curvas necessários, para vazão igual a 49,57 l/h, têm-se taxas de temperatura iguais a 0,5 °C/h e 0,3 °C/h, respectivamente, para temperaturas de saída e entrada no aquecedor. Para vazão igual a 92,66 l/h tem-se taxas de temperatura iguais a 0,8 °C/h na saída e 0,05 °C/h na entrada do aquecedor. Esses resultados indicam que o sistema, em ambos os casos, atingiu o regime permanente.

APÊNDICE 3 – CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO MAGNÉTICO

Observou-se por meio da comparação da vazão no medidor de vazão e num rotâmetro montado em série, que o medidor de vazão apresenta um background (BG) dependente da temperatura do fluido. A relação entre a vazão no medidor de vazão, a vazão no rotâmetro e o fundo de escala é mostrada na Tabela Ap 3.1. A temperatura do fluido afeta diretamente a bobina do instrumento e, conseqüentemente, o comportamento do mesmo.

Tabela Ap3.1 – Comparação entre Vazões

Vazão no Medidor de Vazão (l/h)	Vazão no Rotâmetro (l/h)	Fundo (BG) (l/h)
116,73	60	56,73
136,71	80	56,71
156,70	100	56,70

A partir desses dados, estabeleceu-se um critério de determinação do “ponto de zero” do instrumento. A Fig. Ap3.1 mostra os elementos principais envolvidos nessa determinação.

Figura Ap3.1 – Elementos Envolvidos no Experimento

Os seguintes procedimentos foram adotados:

- O processo foi dividido em duas etapas, denominadas calibração a frio e calibração a quente;
- Na calibração a frio, circulamos fluido, à temperatura ambiente, pela bancada e registramos através da aquisição de dados, os respectivos valores médios das temperaturas TC 11, TC 12 e TC 20;
- Na calibração a quente, foi feito o mesmo processo, apenas com a diferença de ser fornecida uma potência ao circuito, por meio do aquecedor elétrico e, depois, deixar o sistema atingir o regime permanente.

Com esses dados, montou-se as curvas que mostram o “ponto de zero” do medidor de vazão magnético em função da temperatura do fluido.

APÊNDICE 4 – CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

A tabela Ap4.1, que relaciona os dados para a determinação das perdas de carga, apresenta todos os trechos selecionados restantes da BCN.

Tabela Ap4.1 – Dados para Perda de Carga - BCN

Trecho	2 – D - 1				1 - 2	2 – E - 1	4 - 1	3 - 4	2 - 3
	2 - S1	S1	S2	S2 - 1					
Diâmetro Hidráulico (m)	0,0208	0,0144	0,0630	0,0208	0,0208	0,0208	0,0208	0,0208	0,0208
Trecho Reto (m)	4,82	1,70	0,15	6,61	0,48	15,36	5,38	4,76	10,19
Válvula de Desvio (L/D=210)	–	–	–	1	–	1	–	–	–
Nipples (L/D=14)	4	–	–	8	4	12	7	2	5
(L/D=20)	–	–	–	1	–	1	1	17	2
(L/D=60)	1	–	–	3	2	5	1	2	1
União (L/D=18)	6	–	–	7	4	13	7	2	6
Curva (L/D=30)	3	–	–	1	–	4	1	–	4
Válvula de Esfera (L/D=240)	–	–	–	1	1	1	1	–	–
Medidor de Vazão (L/D=130)	–	–	–	–	–	–	1	–	–
Redução 1.1/2x3/8 1.1/2x3/4 2.1/2x3/4	–	–	1	–	–	–	–	1 1	–
Expansão 3/8x1.1/2 3/4x1.1/2 3/4x2.1/2	–	1	–	–	–	–	–	1 1	–
Compr. Equiv. Total (m)	11,35	3,23	0,35	25,70	10,63	42,24	20,02	17,61	18,48

A Tabela Ap4.2 indica o correlacionamento da perda de carga (ΔP) com o quadrado da velocidade (v^2) e na forma de fator de atrito (f) em função do número de Reynolds (Re), apresentando os resultados para cada trecho na correspondente figura.

Tabela Ap4.2 – Relação de Figuras

Trecho	$\Delta P \times v^2$	$f \times Re$
2 – D – 1	Fig. Ap4.1	Fig. Ap4.2
1 – 2 (Trecho Menor)	Fig. Ap4.3	Fig. Ap4.4
2 – E – 1	Fig. Ap4.5	Fig. Ap4.6
4 – 1	Fig. Ap4.7	Fig. Ap4.8
3 – 4	Fig. Ap4.9	Fig. Ap4.10
2 – 3	Fig. Ap4.11	Fig. Ap4.12

Figura Ap4.1 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ao Quadrado (v^2)

Figura Ap4.2 – Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)

Figura Ap4.3 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ao Quadrado (v^2)

Figura Ap4.4 – Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)

Figura Ap4.5 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ao Quadrado (v^2)

Figura Ap4.6 – Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)

Figura Ap4.7 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ao Quadrado (v^2)

Figura Ap4.8 – Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)

Figura Ap4.9 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ao Quadrado (v^2)

Figura Ap4.10 – Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)

Figura Ap4.11 – Perda de Carga (ΔP) x Velocidade ao Quadrado (v^2)

Figura Ap4.12 – Fator de Atrito (f) x Número de Reynolds (Re)

O fator de atrito, na faixa correspondente ao regime laminar, apresentou-se um pouco inferior ao da curva de Hagen-Poiseuille ($f=64/Re$), com exceção do trecho 4 – 1. Nota-se que nesse trecho, a região de mudança de regime se dá em torno de $Re \approx 3.000$. Isso se deve as poucas singularidades apresentadas por esse trecho. Na zona de transição ($Re \geq 2.000$), as curvas de fator de atrito são inferiores aos da curva de Blasius.

1. BAPTISTA FILHO, B. D., ***Bancada de Circulação Natural***, IPEN – CNEN/SP, São Paulo, maio, 1996, (Proposta de Trabalho PED.RES.CNEN.024, PRTR.001.R00).
2. CRANE Co., ***Flow Fluids Through Valves, Fittings and Pipe***, Metric Edition, England, 1997.
3. GONÇALVES, I. M. P., ***Programa de Aquisição de Dados da Bancada de Circulação Natural***, IPEN – CNEN/SP, São Paulo, junho, 2001, (Relatório Técnico P&D.CENT.CENT.022.00, RELT.001.00).
4. GREIF. R., ***Natural Circulation Loops***, Journal of Heat Transfer, Vol. 110, p. 1243 – 1258, Novembro, 1998.
5. INFORME IPEN, ***Inauguração do Circuito Experimental de Sistemas de Resfriamento de Emergência de Reatores Avançados***, Informe Ano X, Nº 06, 19 de fevereiro de 1998.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Copyright International Atomic Energy Agency, ***Advanced Reactors – Fact Sheet***. Disponível em: <<http://www.iaea.org>>. 2000a.

7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Copyright International Atomic Energy Agency, **Advanced Reactors – Fact Sheet**. Disponível em: <<http://www.iaea.org>>. 2000b.
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Copyright International Atomic Energy Agency, **Annual Report 1995 – Nuclear Power**. Disponível em: <<http://www.iaea.org>>. 1995.
9. KLEIN, S.A., ALVARADO, F.L., **Engineering Equation Solver (EES)**, Version 5.226, Junho, 2000.
10. KREITH, F., **Princípios da Transmissão de Calor**, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1977.
11. LAVRADOR, M.B., **Análise Experimental de Circulação Natural em um Circuito Fechado**, Dissertação (Mestrado), Janeiro, 1994.
12. LAYMAN W.H., MARSTON W.H., SUGNET, W. R., **Update on the ALWR Program: The Future of Nuclear Power in the USA**, Nuclear Engineering International, Advanced Reactors, p.23 – 31, dezembro, 1991.

13. MACEDO L.A., BAPTISTA FILHO B.D., ***Atualização do Projeto da Bancada de Circulação Natural***, IPEN – CNEN/SP, São Paulo, março, 1997a (Relatório Interno PED.RES.CNEN.024, RELT. 002.R00).
14. MACEDO L.A., BAPTISTA FILHO B.D., ***Atualização do Projeto da Bancada de Circulação Natural***, IPEN – CNEN/SP, São Paulo, dezembro, 1997b, (Relatório Interno PED.RES.CNEN.024, RELT. 004.R00).
15. MACEDO L.A., BAPTISTA FILHO B.D., ***Aferição do Rotâmetro/Secundário da Bancada de Circulação Natural***, IPEN – CNEN/SP, São Paulo, junho, 1997c, (Relatório Interno PED.RES.CNEN.024, RELT. 003.R00).
16. NATIONAL INSTRUMENTS, ***Instrumentation Reference and Catalogue – Test and Measurement Process Monitoring and Control***, 1995a.
17. NATIONAL INSTRUMENTS, ***LabWindows/CVI – Visual Programing for Instrumentation – Programmer Reference Manual***, June Edition. 1995b.
18. RUBBIA, C. et al, ***Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier***, CERN/AT/95-44 (ET), September 1995.
19. SILVA, R. B., ***Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor***, 6ª Edição, Grêmio Politécnico, 1980.

20. SPARLING INSTRUMENTS Co., **Installation, Operation and Maintenance Manual**, USA, Julho, 1996.
21. WESTINGHOUSE ELETRIC COMPANY, Copyright Westinghouse Eletric Company.
AP600 - Passive Safety. Disponível em: <<http://www.ap600.westinghouse.com>>. 2000.
22. ZVIRIN, Y., **Natural Circulation Loops with Parallel Channels – Transient Behavior**, Nuclear Engineering and Design, p.73 – 81, 1985.
23. ZVIRIN, Y., RABINOVIZ, Y., **On the Behavior of Natural Circulation Loops with Parallel Channels**, p. 299 – 304, 1987.
24. ZVIRIN, Y., JEUCK III, P. R., SULLIVAN, C. W., DUFFEY, R. B., **Experimental and Analytical Investigation of a Natural Circulation System with Parallel Loops**, Journal of Heat Transfer, Vol. 103, p. 645 – 652, Novembro, 1981.

AUTORIZAÇÃO

Autorizo a reprodução e/ou divulgação total ou parcial da presente obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, **desde que citada a fonte**.

Luiz Alberto Macedo
lamacedo@ipen.br

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária
São Paulo – SP