

NAYARA LEITE RODRIGUES

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO
TÉRMICO DE NANOFUIDOS EM RADIADOR
AUTOMOTIVO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULTADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2015

NAYARA LEITE RODRIGUES

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO TÉRMICO DE
NANOFLUIDOS EM RADIADOR AUTOMOTIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos para a obtenção do título **de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Transferência de calor e
Mecânica dos fluidos

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

UBERLÂNDIA - MG

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R696a Rodrigues, Nayara Leite, 1988-
2015 Análise experimental de desempenho térmico de nanofluidos em
radiador automotivo / Nayara Leite Rodrigues. - 2015.
115 f. : il.

Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Nanofluidos - Teses. 3. Calor -
Transmissão - Teses. 4. Difusividade térmica - Teses. I. Bandarra Filho,
Enio Pedone. II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

À minha mãe Valdelice e à minha afilhada Júlia

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que me deu força e paciência ao longo desse trajeto.

Aos meus pais, irmãos e os demais familiares por acreditar no meu potencial e por me apoiarem em todas as minhas escolhas.

A Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, juntamente ao Programa de Pós-Graduação, pelo suporte e infra-estrutura dedicados para a realização de meus trabalhos.

Ao Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho pela oportunidade e orientação.

Ao Prof. Dr. Oscar Saul Hernandez Mendoza pelas dicas e sugestões durante o projeto.

Aos colegas do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e nanotecnologia, LEST-nano, pelo compartilhamento de conhecimento e amizade. Em especial ao Douglas pela disponibilidade de ajudar nos momentos necessários e conselhos nos momentos difíceis, e ao Guilherme pela ajuda no desenvolvimento do projeto.

Aos técnicos Renato e Reynaldo pela colaboração na construção da bancada.

À CAPES pelo apoio financeiro através de bolsa de estudos.

À empresa FIAT pelo financiamento do projeto.

Ao amigos e colegas de casa por tornarem minha estadia na cidade mais agradável.

RODRIGUES, N.L., **Análise Experimental de Desempenho Térmico de Nanofluidos em Radiador Automotivo.** 2015. 114 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Uma nova classe de fluido refrigerante, onde nanopartículas são dispersas em fluidos convencionais, tem sido estudada e promete revolucionar os sistemas de transferência de calor, devido à alta condutividade térmica atribuída a esses fluidos, chamados nanofluidos. Neste trabalho, nanopartículas de prata foram dispersas em uma mistura de água/etileno glicol (70/30 em vol.), com o objetivo de analisar o desempenho térmico destes aplicados em um radiador automotivo, através do coeficiente global de transferência de calor. Com essa finalidade, uma bancada experimental foi montada e instrumentada, sendo que os nanofluidos foram produzidas pelo método de dois passos. Os ensaios foram realizados em um radiador automotivo, alojado a um túnel de vento, utilizando amostras do fluido base e de nanofluidos com concentrações de 0,02% e 0,06% em vol., com o objetivo de comparar ambos os fluidos. Além de analisar o comportamento do nanofluido com diferentes temperaturas do líquido, neste tipo de aplicação, foi observado deposição de nanopartículas no circuito, operando com temperatura de 95 °C. Os resultados mostraram que os nanofluidos apresentam um coeficiente global de transferência de calor inferior ao fluido base para uma mesma vazão mássica do líquido e mesmas condições de operação, chegando a uma redução de 44,1% comparado com o fluido base, com exceção de um único caso, onde houve um incremento de 4,9% do coeficiente global de transferência de calor do nanofluido com relação ao fluido base.

Palavras chave: Nanofluido, radiador automotivo, transferência de calor.

RODRIGUES, N.L., **Experimental Analysis of Thermal Performance of nanofluids in Automotive Radiators.** 2015. 114 f. M. SC. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia

Abstract

A new class of refrigerant which nanoparticles are dispersed in a conventional fluid has been studied and promises to revolutionize heat transfer systems, due to high thermal conductivity attributed to these fluids, called nanofluids. In this work, silver nanoparticles were dispersed in a mixture of water / ethylene glycol (70/30 by vol.) In order to analyze the thermal performance applied to an automotive radiator, through the global coefficient of heat transfer. For this purpose, an experimental facility was assembled and instrumented, and the nanofluids were produced using a two step method. The tests were conducted in an automotive radiator, in a wind tunnel using samples of the base fluid and nanofluids at concentrations of 0.02% and 0.06 vol.%, in order to compare the two fluids. Besides analyzing the nanofluid behavior at different temperatures of the liquid in this type of application, deposition of nanoparticles was observed in the circuit when operating at temperature of 95 ° C. The results show that nanofluids have an overall heat transfer coefficient below in relation to the base fluid for the same liquid mass flow rate and the same operating conditions, reaching a reduction of 44.1% with the exception of one case, where an increase of 4.9% compared to the base fluid was observed.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Esquema do homogeneizador de alta pressão para a produção de nanofluido (HAWANG <i>et al</i> , 2008) | 7 |
| Figura 2.2 - Aparato experimental usado por Wang; Xu; Choi (1999) | 13 |
| Figura 2.3 - Sistema de arrefecimento de um motor | 21 |
| Figura 2.4 – Desenho esquemático de um radiador..... | 22 |
| Figura 3.1 - Esquema do túnel de vento utilizado nos ensaios..... | 28 |
| Figura 3.2 – Foto bancada experimental | 29 |
| Figura 3.3 – Conversor de potência..... | 29 |
| Figura 3.4 – Inversor de frequência do ventilador..... | 29 |
| Figura 3.5 – Desenho esquemático do circuito do fluido quente. | 30 |
| Figura 3.6 – Banho Térmico..... | 31 |
| Figura 3.7 – Foto circuito do fluido quente | 31 |
| Figura 3.8 –Termostato usado no banho térmico | 31 |
| Figura 3.9 – Microbomba e motor..... | 32 |
| Figura 3.10 – Inversor de frequência do motor que aciona a bomba | 32 |
| Figura 3.11 – Reservatório do fluido de trabalho | 32 |
| Figura 3.12 – Radiador ensaiado | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.13 – Chassi de aquisição | 33 |
| Figura 3.14 – Módulos de aquisição..... | 33 |
| Figura 3.15 – Plataforma de monitoramento no Labview | 34 |
| Figura 3.16 – Seção de gráficos de temperatura na plataforma de monitoramento no Labview. | 34 |
| Figura 3.17 – Sensor de temperatura modelo PT100 | 35 |
| Figura 3.18 – Desenho esquemático do posicionamento dos termopares no túnel de vento. .. | 35 |
| Figura 3.19 – Medidor de temperatura de bulbo úmido e umidade relativa | 36 |
| Figura 3.20 – medidor de vazão | 36 |
| Figura 3.21 – Seção de medida da vazão..... | 37 |
| Figura 3.22 - Vista tridimensional do pleno da seção de medida de vazão de ar..... | 37 |
| Figura 3.23 – Disposição dos bocais na placa | 38 |
| Figura 3.24 – Curva característica da placa de bocais..... | 39 |
| Figura 3.25 – Modelo físico da seção de testes. | 41 |
| Figura 3.26 – Mangueira após teste com nanofluido..... | 48 |
| Figura 3.27 – Homogeneizador de alta pressão..... | 50 |
| Figura 3.28 – Nanopartículas pesadas | 50 |
| Figura 3.29 – Balança de precisão..... | 50 |
| Figura 3.30 – Preparação do nanofluido..... | 51 |
| Figura 4.1 - Nanofluidos com concentração de 0,02%..... | 55 |
| Figura 4.2 – Nanofluidos com concentração de 0,06% durante os testes. | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.3 – Dados experimentais de Barbés <i>et al.</i> (2012) comparados com a Eq. (4.1) | 57 |
| Figura 4.4 – Comportamento do calor específico do fluido base e dos nanofluidos..... | 58 |
| Figura 4.5 – Comparação dos resultados do coeficiente global de transferência de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=60$ °C e $\dot{m}_{ar}=0,8$ kg/s. .. | 63 |
| Figura 4.6 - Comparação dos resultados do coeficiente global de transferência de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=80$ °C e $\dot{m}_{ar}=0,8$ kg/s. .. | 64 |
| Figura 4.7 - Comparação dos resultados do coeficiente global de transferência de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=60$ °C e $\dot{m}_{ar}=1,6$ kg/s. .. | 65 |
| Figura 4.8 - Comparação dos resultados do coeficiente global de transferência de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=80$ °C e $\dot{m}_{ar}=1,6$ kg/s. .. | 65 |
| Figura 4.9 - Comparação dos resultados do coeficiente global de transferência de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=96$ °C e $\dot{m}_{ar}=0,8$ kg/s. .. | 66 |
| Figura 4.10 - Comparação dos resultados do coeficiente global de transferência de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=96$ °C e $\dot{m}_{ar}=1,6$ kg/s. .. | 67 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 - Condutividade térmica de alguns materiais | 5 |
| Tabela 2.2 - Resultados experimentais de condutividade térmica apresentados na literatura.. | 15 |
| Tabela 2.3 - Modelos para viscosidade | 17 |
| Tabela 2.4: Resultados experimentais de viscosidade apresentados na literatura. | 18 |
| Tabela 2.5: Resultados de estudos em radiadores automotivos utilizando nanofluido | 26 |
| Tabela 3.1- Dimensões dos Bocais de Medida de vazão..... | 38 |
| Tabela 3.2 - Condições de operação da bancada | 47 |
| Tabela 3.3 – Incertezas dos parâmetros medidos | 52 |
| Tabela 3.4 – Incerteza parâmetros secundários | 53 |
| Tabela 4.1 – Resultados operando a $T_{e, liq} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{ar} = 0,8\text{ kg/s.}$ | 59 |
| Tabela 4.2 - Resultados operando a $T_{e, liq} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{ar} = 0,8\text{ kg/s.}$ | 59 |
| Tabela 4.3 - Resultados operando a $T_{e, liq} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{ar} = 1,6\text{ kg/s.}$ | 60 |
| Tabela 4.4 - Resultados operando a $T_{e, liq} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{ar} = 1,6\text{ kg/s.}$ | 61 |
| Tabela 4.5 - Resultados operando a $T_{e, liq} = 96\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{ar} = 0,8\text{ kg/s.}$ | 61 |
| Tabela 4.6 - Resultados operando a $T_{e, liq} = 96\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{ar} = 1,6\text{ kg/s.}$ | 62 |

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{m} Vazão mássica $\left[kg \cdot s^{-1} \right]$

\dot{Q} Taxa de transferência de calor $[W]$

A Área $[m]$

C Taxa de capacidade de calor $\left[W \cdot K^{-1} \right]$

C^* Razão entre as taxas de capacidade de calor mínima e máxima

C_D Coeficiente de descarga

c_p Calor específico $\left[J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1} \right]$

K Condutividade térmica $\left[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \right]$

m Massa $[kg]$

NTU número de unidade de transferência

Q Calor $[J]$

RH Umidade relativa

T Temperatura $[^{\circ}C]$

T_{BU} Temperatura de bulbo úmido $[^{\circ}C]$

U Coeficiente global de transferência de calor $\left[W \cdot m^{-2} \right]$

V Volume $\left[m^3 \right]$

| | |
|-----------------|--|
| h | Entalpia $[J \cdot kg^{-1}]$ |
| ΔP | Perda de pressão $[Pa]$ |
| ΔT_{ml} | Diferença de temperatura média logarítmica $[^{\circ}C]$ |
| μ | Viscosidade $[Pa \cdot s]$ |
| ϵ | Efetividade do trocador de calor |
| ρ | Massa específica $[kg \cdot m^{-3}]$ |
| ϕ | Concentração volumétrica |
| ψ | Esfericidade da nanopartícula |

Subscritos

| | |
|-------|-----------------|
| e | entrada |
| eff | efetivo |
| f | frio |
| fb | fluído base |
| nf | nanofluído |
| np | n nanopartícula |
| q | quente |
| s | saída |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | CAPÍTULO I..... | 1 |
| | Introdução | 1 |
| 1.1. | Motivação | 1 |
| 1.2. | Objetivos..... | 2 |
| 1.3. | Organização do texto | 2 |
| 2. | CAPÍTULO II | 4 |
| | Revisão Bibliográfica..... | 4 |
| 2.1 | Nanofluidos | 4 |
| 2.2 | Síntese de Nanofluidos | 5 |
| 2.2.1 | Método de um passo..... | 5 |
| 2.2.2 | Método de dois passos..... | 6 |
| 2.3 | Condutividade Térmica de Nanofluidos..... | 7 |
| 2.3.1 | Correlações para condutividade térmica de nanofluidos..... | 8 |
| 2.3.2 | Método de medições de condutividade térmica | 11 |
| 2.3.3 | Resultados Experimentais para Condutividade Térmica dos Nanofluidos . | 13 |
| 2.4 | Viscosidade..... | 15 |
| 2.4.1 | Correlações para Viscosidade | 17 |
| 2.4.2 | Resultados Experimentais para Viscosidade de Nanofluidos | 17 |
| 2.5 | Massa específica e Calor Específico de Nanofluidos | 19 |
| 2.6 | Sistema de Arrefecimento Automotivo | 20 |
| 2.7 | Nanofluido em Radiadores Automotivos | 22 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3. | CAPÍTULO III | 27 |
| | Metodologia | 27 |
| 3.1 | Bancada Experimental | 27 |
| 3.1.1 | Círculo de ar | 27 |
| 3.1.2 | Círculo do Fluido Quente | 30 |
| 3.2 | Sistema de Aquisição dos Dados | 33 |
| 3.3 | Parâmetros Medidos e Incertezas | 35 |
| 3.3.1 | Temperatura | 35 |
| 3.3.2 | Vazão do líquido | 36 |
| 3.3.3 | Pressão e diferencial de pressão | 36 |
| 3.3.4 | Vazão de ar | 37 |
| 3.4.4.1. | Determinação da vazão do ar | 39 |
| 3.4 | Formulação do Problema | 40 |
| 3.4.1 | Modelo físico | 40 |
| 3.4.2 | Modelo matemático | 42 |
| 3.5 | Cálculo do coeficiente global de transferência de calor | 43 |
| 3.6 | Procedimento | 45 |
| 3.7 | Condições de ensaio | 46 |
| 3.8 | Preparação dos Nanofluidos de Prata/Água-Etileno Glicol | 48 |
| 3.9 | ANÁLISE DE INCERTEZA | 51 |
| 4. | CAPÍTULO IV | 54 |
| | Resultados e discussões | 54 |
| 4.1 | Comportamento dos nanofluidos durante os ensaios | 54 |
| 4.2 | Calor específico | 56 |
| 4.3 | Coeficiente global de transferência de calor | 58 |
| 5. | CAPÍTULO V | 68 |
| | Conclusões e sugestões | 68 |

| | | |
|----|-------------------------------|----|
| 6. | REFERÊCIAS | 70 |
| 7. | Anexo A | 75 |
| | Resultados experimentais..... | 75 |
| 8. | Anexo B..... | 87 |
| | Calibração | 87 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Os sistemas de arrefecimento dos automóveis são de extrema importância para o bom funcionamento do carro. Uma alta eficiência térmica no trocador de calor do sistema de arrefecimento (conhecido como radiador), pode proporcionar o uso de motores mais potentes, menor emissão de gases, além de economia de combustível.

Os fluidos utilizados nesse sistema limitam a troca de calor devido à baixa condutividade térmica dos mesmos. O ar é utilizado do lado externo do radiador para retirar calor do fluido de arrefecimento, onde a maneira encontrada para aumentar essa troca térmica foi com a utilização de aletas na parte externa do radiador, com o objetivo de aumentar a área de troca térmica. No lado do fluido de arrefecimento é necessário buscar novas alternativas para melhorar a troca térmica, uma vez que a tecnologia que se referem às aletas já não apresenta inovações para esse tipo de aplicação.

Uma nova classe de fluidos, chamados nanofluidos, surgiu e ganhou ênfase nos últimos anos, sendo estes, dispersões de nanopartículas inferiores 100 nm em fluidos térmicos tradicionais, como água, etileno glicol e óleo.

As vantagens esperadas para tal fluido estão no incremento da transferência de calor, visto que são fluidos com condutividade térmica superior, podendo então, levar a redução do tamanho do trocador de calor e da potência de bombeamento. Nos automóveis é esperado que, com o aumento na transferência de calor, acarretará um aumento da eficiência da máquina térmica, levando assim a uma economia de combustível, e menores quantidades de emissões de gases de exaustão.

Uma vez que a preocupação com a emissão de gases vem crescendo, devido aos danos que estes trazem para a atmosfera, a busca por tecnologias que possam diminuir essa emissão está em alta, entre essas alternativas estão os nanofluidos.

As pesquisas na área de nanofluidos ainda são relativamente recentes, onde poucos estudos experimentais em sistemas foram realizados, e algumas divergências com os estudos das propriedades e comportamento dessa nova classe de nanofluidos. Novas pesquisas precisam ser realizadas, para o melhor entendimento do comportamento dos fluidos em aplicações práticas e avaliar as reais melhorias na troca térmica causada pelo uso desses fluidos.

1.2. Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho foi a avaliação do comportamento térmico dos nanofluidos aplicados em radiador automotivo, através da avaliação do coeficiente global de transferência de calor. Para que esse trabalho fosse concretizado, foram realizadas modificações e calibração da bancada experimental, possibilitando assim, realizar a análise dos seguintes itens:

- ✓ Comparar o desempenho térmico das amostras de nanofluidos em relação ao fluido base;
- ✓ Avaliar a influência da temperatura de entrada do líquido e das vazões mássicas, na diferença do coeficiente global de transferência de calor do nanofluido e do fluido base;
- ✓ Avaliar a influência da concentração de nanopartículas.

1.3. Organização do texto

O trabalho é composto, além dessa introdução, por uma revisão bibliográfica acerca dos nanofluidos e suas aplicações em sistemas de arrefecimentos, capítulo II. No capítulo III será apresentado a metodologia e detalhamento experimental no qual descreve os equipamentos utilizados, como foram realizadas as medições dos parâmetros de resposta e acompanhamento dos parâmetros de entrada, os modelos físicos e matemáticos para o problema em questão, o

preparo dos nanofluidos e metodologia adotada para os testes. Os resultados experimentais são apresentados e discutidos no capítulo IV, em seguida as conclusões obtidas a partir dos resultados e sugestões de trabalhos futuros estão expostas no capítulo V, e por fim, as referências bibliográficas utilizadas na realização deste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo foi realizada uma revisão acerca dos nanofluidos, onde são citados os métodos de preparação, além de discursões a respeito das propriedades destes fluidos, e, por fim, são citadas as pesquisas realizadas em radiadores automotivos.

2.1 Nanofluidos

Nanofluidos são dispersões de partículas sólidas de tamanho nanométrico (entre 1 e 100 nm) em fluidos comuns, tais como água, etileno glicol, óleos e outros fluidos de transferência de calor. Devido ao fato dos fluidos convencionais possuírem uma baixa condutividade térmica, uma maneira encontrada para aumentar essa propriedade, foi por meio da adição de partículas sólidas, uma vez que estas possuem uma alta condutividade térmica comparadas com os líquidos. A Tab. 2.1 apresentam alguns valores de condutividade térmica para sólidos e líquidos. Assim, as propriedades e estabilidade dos nanofluidos estão sendo estudadas e discutidas por pesquisadores durante as duas últimas décadas, pois estes possuem um grande potencial em aplicações na transferência de calor para diversas condições.

Anteriormente ao surgimento dos nanofluidos, tentativas de obter dispersões de partículas sólidas em líquido foram realizadas, porém com partículas milimétricas e micrométricas, uma vez que a tecnologia da época não era capaz de produzir partículas de tamanhos inferiores. Porém, tais dispersões provocavam entupimentos das tubulações, elevada perda de carga, desgaste do sistema de bombeamento e tubulações, sedimentação das partículas na tubulação (MURSHED; LEONG; YANG, 2008).

Tabela 2.1 - Condutividade térmica de alguns materiais (dados obtidos no programa EES – Engineering Equation Solver)

| SÓLIDOS | | LÍQUIDOS | |
|--------------------|-----------|----------------|-----------|
| Material | k (W/m.K) | Material | k (W/m.K) |
| Cobre | 396,5 | Água | 0,6 |
| Ferro | 80,52 | Etanol | 0,17 |
| Prata | 429 | Etileno Glicol | 0,26 |
| Dióxido de titânio | 8,4 | Propileno | 0,17 |

Alguns fatores estão relacionados com a estabilidade dos nanofluidos, e um dos fatores de grande relevância é o método de preparação das dispersões. A seguir são apresentados as descrições de alguns processos de síntese dessas substâncias.

2.2 Síntese de Nanofluidos

A produção de nanofluidos homogêneos e estáveis ainda é um desafio nesse campo de pesquisa. A preparação de nanofluido não se resume a uma simples mistura de líquido-sólido. Alguns requisitos são essenciais na preparação dos nanofluidos, tais como, suspensões estáveis e duráveis, aglomeração de nanopartículas desprezível, e nenhuma mudança química. Dois tipos de métodos são aplicados na produção de nanofluidos: método de um passo, onde as nanopartículas são formadas diretamente no fluido base e o método de dois passos, onde temos a fabricação de nanopartículas, que posteriormente são dispersas no fluido base. (HWANG *et al.*, 2008; SALEHI; HEYHAT; RAJABPOUR, 2013)

2.2.1 *Método de um passo*

Neste método as nanopartículas são produzidas e dispersas, simultaneamente, no fluido base. Geralmente é realizado através de redução química do metal precursor, formando assim as nanopartículas que são dispersas diretamente no fluido base. O método de um passo reduz

a aglomeração de nanopartículas, porém possui um alto custo de produção. (CHO *et al.*, 2005; OLIVEIRA, 2012)

Cho *et al.* (2005) prepararam nanofluido de nitrato de prata/etileno glicol utilizando o método de um passo por meio de redução química. Poli (acrilamida-co-ácido acrílico) foi usado como um estabilizador de dispersão para prevenir a agregação de nanopartículas de prata. Os nanofluidos se apresentaram estáveis e sem aglomerações.

Kumar *et al.* (2009) utilizaram o método de um passo por meio da redução de sulfato de cobre penta-hidratado com hipofosfito de sódio, como agente redutor, em etileno glicol, por meio de aquecimento convencional, apresentando suspensões estáveis e sem aglomerações.

Nanofluido de prata foi preparado seguindo o método químico de um passo por Salehi; Heyhat; Rajabpour (2013). O nanofluido de prata foi feito com nitrato de prata usado como fonte das nanopartículas de prata, água destilada como o fluido base e boro-hidreto de sódio e hidrazina como agente redutor por meio de aquecimento convencional usando polivinilpirrolidona (PVP) como surfactante, obtendo nanofluidos estáveis e sem aglomerações.

2.2.2 *Método de dois passos*

No método de dois passos, as nanopartículas são produzidas previamente na forma de pó seco ultrafino, e posteriormente são dispersas no fluido base por meio de processos físicos, tais como, agitador mecânico, banho ultrassônico, e homogeneizador de alta pressão. A vantagem desse método é a variedades de fluidos que podem ser produzidas, uma vez que, para determinado conjunto de nanopartículas produzidas, essas podem ser dispersas em fluidos bases diferentes, dando origem à nanofluidos diversificados, além de um controle da concentração de nanopartículas melhor. Possui também um menor custo de produção. Porém, possíveis oxidações e aglomerações podem ocorrer. (HWANG *et al.*, 2008; OLIVEIRA, 2012)

Dispersão de nanopartículas no fluido base

Banho ultrassônico: é um método em que o efeito de uma vibração com frequência na ordem de 10 kHz é transmitido à mistura através do fluido do banho.

Homogeneizador a alta pressão, ilustrado na Fig. 2.1 consiste em dois microcanais que dividem o escoamento líquido em dois e, posteriormente recombina em uma câmara

de mistura, onde um aumento significante na velocidade despressurização no fluxo nos microcanais resulta em um número de efeitos tais como: alto cisalhamento, alto impacto com a parede e formações de cavitações fortes no líquido que são responsáveis por quebrar efetivamente as aglomerações de partículas formando um fluido estável e homogêneo. (BANDARRA FILHO *et al.*, 2014; HWANG *et al.*, 2008)

Oliveira (2012) preparou nanofluidos pelo método de dois passos. Nanopartículas de prata com diâmetros médios 10 e 80 nm foram adquiridas da empresa Nanostructured & Amorphous Materiais, Inc., e dispersadas em água destilada utilizando um homogeneizador a alta pressão. Foi aplicada uma pressão de aproximadamente 400 bar e o processo levou cerca de 30 min até o fluido se homogeneizar completamente. Foram feitos nanofluidos com concentração de 0,1 e 0,3% em volume. Nanofluidos estáveis foram obtidos através desse método, sendo que somente após dois meses houve ligeira decantação das nanopartículas.

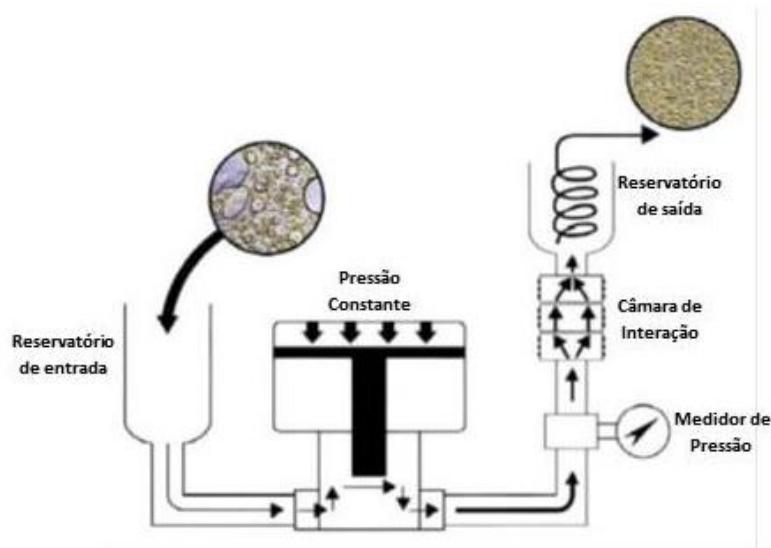


Figura 2.1 - Esquema do homogeneizador de alta pressão para a produção de nanofluido (HWANG *et al.*, 2008)

2.3 Condutividade Térmica de Nanofluidos

A elevada condutividade térmica dos nanofluidos foi o que despertou o interesse dos pesquisadores em desenvolver pesquisas relacionadas a tais fluidos, pois se trata de uma importante propriedade na aplicação de transferência de calor. Pesquisas teóricas e experimentais estão sendo realizadas para entender o aumento da condutividade térmica dessa

classe de fluidos, encontrados pelos primeiros pesquisadores a investigar essa propriedade. Os resultados ainda causam muitas discussões devido à inconsistência entre os dados experimentais e os modelos teóricos.

Características dos nanofluidos são avaliadas para verificar a influência de certos parâmetros no aumento da condutividade, tais como: material, tamanho, forma e concentração das nanopartículas, material do fluido base, aditivos, acidez e temperatura.

Özerinç; Kakaç; Yazıcıoğlu (2009), revisaram os modelos teóricos de condutividade térmica efetiva de nanofluidos e compararam com experimentos realizados, além de analisarem os fatores que influenciam em tal parâmetro. Foi notado que todos os resultados experimentais analisados pelos autores, apresentaram uma variação na condutividade térmica aproximadamente linear com relação à concentração de nanopartículas. Os resultados mostram uma discrepância significativa nos dados experimentais. Os modelos que consideram o movimento Browniano das partículas mostram que a condutividade térmica efetiva aumenta com a diminuição do tamanho das partículas, uma vez que partículas menores intensificam esse movimento. Porém, resultados com nanofluidos de Al_2O_3 mostraram que a condutividade térmica efetiva diminuiu com a diminuição do tamanho das partículas, os autores atribuíram esse fato devido às incontroladas formações de aglomerações, o que resulta em partículas maiores.

2.3.1 *Correlações para condutividade térmica de nanofluidos*

Tendo em vista o crescente interesse na pesquisa sobre os nanofluidos e suas possíveis aplicações, pesquisadores vêm desenvolvendo correlações para estimar a condutividade térmica dessa nova classe de fluidos e para entender melhor os mecanismos que causam o aumento na condutividade térmica. Muitos deles são derivados da equação de Maxwell (1873), utilizada para misturas de sólido-líquido com partículas esféricas, para calcular a condutividade efetiva. O modelo de Maxwell considera apenas as condutividades térmicas das partículas e do fluido base, e a fração de volume da partícula no líquido, o que nos fornece valores inferiores à maioria dos valores encontrados experimentalmente, pois o modelo considera fatores que são de grande relevância, tais como tamanho das nanopartículas, área superficial, geometria, movimento browniano, efeitos na interface sólido-líquido na superfície das nanopartículas, entre outros.

O modelo de Maxwell é apresentado na Eq. (2.1)

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} k_f \quad (2.1)$$

onde k_{eff} , k_p e k_f são a condutividade térmica do nanofluido, nanopartículas e fluido base respectivamente. ϕ é a fração de volume das partículas na mistura.

Hamilton; Crosser (1962) desenvolveram uma equação a partir do modelo de Maxwell, de modo a expandir o uso para misturas com partículas de diferentes formas, resultando na seguinte equação:

$$k_{eff} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \quad (2.2)$$

onde n é o fator de forma empírica e é definida da seguinte maneira:

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (2.3)$$

onde ψ é a esfericidade. A esfericidade é definida como a razão da área de superfície de uma esfera, com volume igual ao da partícula, pela a de superfície da partícula.

Porém, os modelos apresentados acima subestimam os valores das condutividades térmica encontrados experimentalmente presentes na literatura, levando os pesquisadores acreditarem que outros fatores têm maior influência em tal propriedade. Teorias surgiram para tentar justificar o aumento anômalo da condutividade térmica dos nanofluidos, tais como movimento Browniano de partículas, nanocamadas e aglomeração.

O movimento Browniano consiste no movimento das partículas através do líquido, com possíveis colisões, permitindo assim, que o calor seja transferido diretamente de uma partícula para outra. (KEBLINSKI *et al.*, 2002)

As nanocamadas são camadas do líquido na interface sólido, através da qual a estrutura atómica da camada de líquido, próxima a superfície da partícula é significativamente mais

ordenada que o líquido distante da interface sólido líquido. Dado que os sólidos cristalinos exibem transporte térmico bem melhor do que os líquidos de, tais camadas de líquido na interface, seria esperado dar origem a uma condutividade térmica mais elevada. (KEBLINSKI *et al.*, 2002)

Bhattacharya (2004) determinou a condutividade térmica efetiva de um nanofluido usando simulação dinâmica Browniana, considerando movimento Browniano de partículas. A condutividade térmica efetiva de nanofluidos de Cu/etileno glicol e Al₂O₃/etileno glicol foram calculados para diferentes frações de volume de partículas, e os resultados foram comparados com dados experimentais de dois autores, mostrando uma boa concordância.

Jain; Patel; Das (2009) também utilizaram a simulação dinâmica Browniano para estimar condutividade térmica de nanofluidos, e compararam com dados experimentais existentes na literatura e obtiveram resultados similares aos de Bhattacharya (2004), mostrando que o movimento Browniano tem grande influência no aumento da condutividade térmica efetiva, fazendo-os acreditar que o movimento Browniano de partículas é o fenômeno mais importante responsável pelo aumento anômalo na condutividade térmica dos nanofluidos.

Koo; Kleinstreuer (2005) desenvolveram um modelo para estimar a condutividade térmica de nanofluidos, que consideram os efeitos do tamanho e fração de volume de nanopartículas e dependência da temperatura, além das propriedades do fluido base e das nanopartículas, considerando o líquido circundante sem movimentando relativo com as nanopartículas, que se deslocam de forma aleatória. O modelo foi baseado na teoria da energia cinética, e foi comparado com dados experimentais. Os resultados mostram que o efeito do movimento Browniano é mais efetivo a altas temperaturas.

Xiao; Yang; Chen (2013) derivaram a expressão analítica para condutividade térmica dos nanofluidos levando em consideração o efeito da convecção de calor causado pelo movimento Browniano das nanopartículas, baseado na teoria da geometria fractal. Dados experimentais foram comparados com a correlação, apresentando uma boa concordância. Eles notaram que para partículas menores do que 16 nm, o efeito da condutividade térmica aumenta drasticamente e atribuíram esse fato ao movimento Browniano das nanopartículas, que é intensificado à medida que o tamanho das partículas diminui.

Segundo Kebinski *et al.* (2002) um aumento da condutividade térmica pode ser esperado devido ao movimento Browniano, embora, eles afirmem que o movimento das

partículas é muito devagar para transportar quantidades significativas de calor através de um nanofluido, esse movimento pode ter uma importância indireta na formação de aglomerações. O volume das aglomerações pode ser muito maior do que o volume físico das partículas, uma vez que dentro da aglomeração, o calor pode se mover muito rapidamente, a fração de volume da fase altamente condutora é maior que o volume do sólido, podendo assim explicar o aumento da condutividade térmica.

2.3.2 *Método de medições de condutividade térmica*

A condutividade térmica é a propriedade térmica que mais tem chamado a atenção dos pesquisadores, e pode ser medida utilizando métodos variados. A seguir serão descritos os mais usados na literatura.

Método fio quente transiente

O método de fio quente transiente compreende em um fio metálico imerso na amostra do líquido, que inicialmente se encontram em equilíbrio térmico. O fio metálico é conectado a uma fonte de voltagem contínua, gerando um fluxo de calor constante ao longo do mesmo. O aumento transiente da temperatura do fio depende da condutividade térmica do fluido ao redor, essa temperatura é medida pela mudança da resistência elétrica. (OLIVEIRA, 2012; SHALKEVICH *et al.*, 2010)

Método cilindros coaxiais

Essa técnica consiste em dois cilindros, um interno e outro externo, onde o espaço entre os cilindros é preenchido com uma amostra do fluido. As paredes do cilindro interno são aquecidas e, assim que o fluxo de calor que passa através do fluido entra em regime permanente, as diferenças de temperaturas dos cilindros são medidas. A condutividade térmica é calculada da seguinte forma:

$$k = C_{geom} \frac{Q_1 - Q_2}{\Delta T_1 - \Delta T_2} \quad (2.4)$$

sendo ΔT_1 e ΔT_2 diferenças de temperatura através da camada de fluido correspondentes aos fluxos de calor Q_1 e Q_2 respectivamente. C_{geom} é um fator geométrico.

Esse método foi usado por Glory *et al.* (2008) para medir a condutividade térmica de nanofluido de nanotubos de carbono/água, os autores afirmam que devido à alta condutividade térmica dos cilindros, a amostra não experimenta um gradiente de temperatura ao longo do eixo da célula, e a pequena diferença através da camada do fluido faz com que a transferência de calor associada à fluxo convectivos na folga anular se tornem insignificantes. Esse fato foi verificado, através de medições de condutividades térmica realizadas a diferentes potências de aquecimento. A temperatura da célula foi precisamente regulada em uma faixa extensa de temperatura permitindo medições estacionárias com longo tempo de duração para serem realizadas.

Barbés *et al.* (2012) utilizaram o mesmo método para medir a condutividade térmica de nanopartículas de Al_2O_3 dispersas em água. Segundo os autores, o método de cilindros coaxiais, embora tenha um processo de medição demorado, permite um bom controle da temperatura, e uma medição muito precisa do fluxo de calor que passa através da amostra. Em conjunto com uma boa calibração, é possível obter dados experimentais de condutividade térmica precisos e confiáveis.

Método de Placas Paralelas

Consiste em duas placas circulares, paralelas, com um espaço estreito entre elas, onde a amostra do fluido é inserida. A superfície do fluido é levemente maior do que a superfície inferior da placa superior, sendo que a superfície do líquido pode mover-se livremente acomodando a expansão térmica do fluido. A placa superior é aquecida, gerando um fluxo de calor da placa superior para a placa inferior. A temperatura da placa inferior é mantida uniforme através de outro aquecedor, além de dois aquecedores que são utilizados para manter a condição de equilíbrio térmico, de maneira a evitar perdas por convecção e radiação. A temperatura do fluido é medida utilizando termopares imersos dentro deste, assim a condutividade térmica global a partir da equação de condução de calor de uma direção relacionada com a potência do aquecedor utilizado para gerar o fluxo de calor (SANJAYA; WEE; TAMILSELVAN, 2011; WANG; XU; CHOI, 1999)

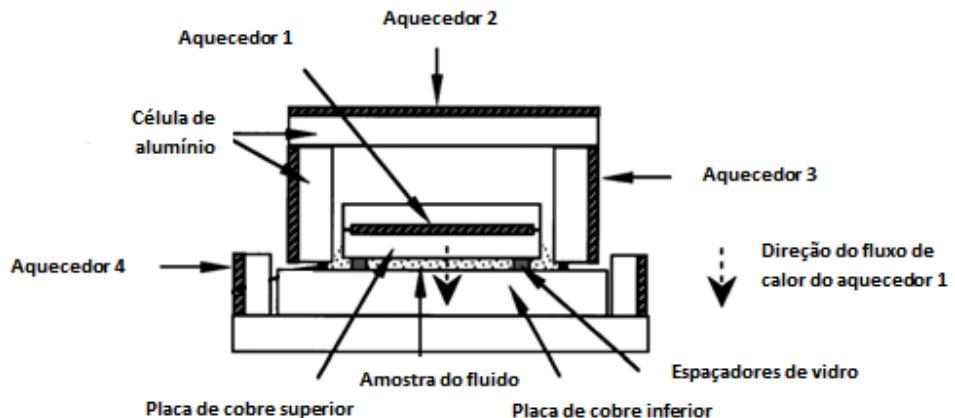


Figura 2.2 - Aparato experimental usado por Wang; Xu; Choi (1999)

2.3.3 Resultados Experimentais para Condutividade Térmica dos Nanofluidos

A condutividade térmica dos nanofluidos tem sido bastante pesquisada experimentalmente, e já existem diversos dados dessa propriedade para variados tipos de nanofluidos, sendo que os resultados obtidos dependem fortemente de alguns fatores, tais como tamanho da partícula, forma da partícula, método de preparo, material da nanopartículas e do fluido base. Porém, ainda não se tem concluído qual a real causa do incremento significativo na condutividade térmica.

Sharma *et al.* (2010) avaliaram a condutividade térmica de nanofluido de prata/etileno glicol com adição de estabilizante, poly(acrylamide-co-acrylicacid), a uma taxa de estabilizante/ AgNO_3 igual a 1, as medições foram efetuadas pelo método de fio quente. Os resultados mostraram um aumento de 10%, 16% e 18% para as respectivas concentrações de 1000 ppm, 5000 ppm e 10000 ppm em relação ao etileno glicol. Porém, após 30 dias esse aumento foi reduzido para 9%, 14% e 14% respectivamente.

Sundar *et al.* (2013a) estimaram experimentalmente a condutividade térmica de nanofluidos de etileno glicol/água- Al_2O_3 e etileno glicol/água- CuO a diferentes concentrações e temperaturas. O fluido base utilizado foi uma mistura de 50:50% (em massa) de etileno glicol e água. Os autores concluíram que a condutividade térmica aumenta tanto com o aumento da concentração e da temperatura. O nanofluido de Al_2O_3 (36,5 nm) apresentou um aumento de 17,89% e o nanofluido de CuO , 24,56% (27 nm), a uma concentração de 0,8% em volume e a uma temperatura de 15 e 50 °C, respectivamente.

Vajjha e Das (2009) realizaram um estudo experimental para determinar a condutividade térmica de três nanofluidos, contendo nanopartículas de óxido de alumínio, óxido de cobre e de óxido de zinco, dispersas em uma mistura de etileno-glicol e de água 60:40 (em peso). A concentração em volume de partículas variou entre 0% a 10% e a temperatura variou de 298 K a 363 K. Os dados mostraram que as condutividades térmicas dos nanofluidos de óxido de alumínio (Al_2O_3), com concentração de 10% a uma temperatura de 365 K, de óxido de zinco (ZnO) com concentração de 7%, a uma temperatura de 363 K e de óxido de cobre (CuO) com 6% a uma temperatura de 363 K, aumentaram comparados com o fluido base em 69%, 48,5% e 60%, respectivamente. Além disso, os dados obtidos para os três nanofluidos mostram que a condutividade térmica aumenta com o aumento da temperatura e da concentração volumétrica de partículas.

Pastoriza-Gallego *et al.* (2011) mediram a condutividade térmica de nanofluido de Al_2O_3 /etileno glicol. As nanopartículas apresentaram um tamanho médio de 43 nm, as medidas foram feitas variando a temperatura de 283,15 K a 323,15 K e a concentração de 1,5% a 8,6%, mostrando um aumento de 19% na condutividade térmica comparado com o fluido base.

Oliveira (2012) mediu a condutividade térmica de nanofluido de prata/água a diferentes concentrações encontrando um incremento de até 18% na condutividade térmica para uma concentração de 0,3% em volume.

A fim de resolver a inconsistência no banco de dados e ajudar no avanço do debate sobre as propriedades dos nanofluidos, Buongiorno *et al.* (2009) realizou uma pesquisa, onde a condutividade térmica de amostras idênticas de nanofluidos foram medidas por mais de trinta instituições de todo o mundo, usando diferentes abordagens experimentais. Os resultados mostraram que a condutividade térmica apresenta maior incremento com o aumento na concentração de nanopartículas, na razão de aspecto e com a diminuição na condutividade térmica do fluido base.

A Tab. 2.2 mostra alguns resultados de condutividade térmica de nanofluidos encontrados na literatura.

Tabela 2.2 - Resultados experimentais de condutividade térmica apresentados na literatura

| Autor (Ano) | Nanopartículas | Fluido base | Concentração | Tamanho (nm) | Incremento |
|------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------|--------------|------------|
| Hong <i>et al.</i> (2005) | Fe | EG | 0,55% (vol.) | 10 | 18% |
| Ju <i>et. al</i> (2008) | Al ₂ O ₃ | Água | 10% (vol.) | 30 | 15% |
| | Al ₂ O ₃ | EG/Água (60:40 massa) | 10% (vol.) | 53 | 69% |
| Vajjha; Das (2009) | CuO | EG/Água (60:40 massa) | 6% (vol.) | 29 | 60% |
| | ZnO | EG/Água (60:40 massa) | 7% (vol.) | 53 | 49% |
| | Al ₂ O ₃ | EG | 8,6% (vol.) | 43 | 19% |
| Oliveira (2012) | Ag | Água | 0,3% (vol.) | 10 e 80 | 18% |
| Mariano <i>et al.</i> (2013) | SnO ₂ | EG | 25% (massa) | 17 | 14% |
| Sundar <i>et al.</i> (2013a) | Al ₂ O ₃ | EG/Água (50:50% massa) | 0,8% (vol.) | 36,5 | 18% |
| | CuO | EG/Água (50:50% massa) | 0,8% (vol.) | 27 | 25% |
| Sundar <i>et al.</i> (2013b) | Fe ₃ O ₄ | Água | 2% (vol.) | 13 | 48% |
| Sundar <i>et al.</i> (2013c) | Fe ₃ O ₄ | EG/Água (20:80% massa) | 2% (vol.) | 13 | 46% |
| Paz (2014) | Ag | Água | 0,5% (vol) | 20 | 38% |

2.4 Viscosidade

A viscosidade dos nanofluidos é outra propriedade que vem sendo alvo de pesquisas, uma vez que essa propriedade é um fator influente na queda de pressão, e consequentemente

na potência de bombeamento necessária para o fluido escoar através do equipamento que será utilizado.

Estudos têm comprovado que a viscosidade aumenta com o aumento da concentração de nanopartículas e diminui com o aumento da temperatura (KOLE; DEY, 2010; YIAMSAWAS *et al.*, 2013). Além disso, foi observado por Yiamsawas *et al.* (2013) que a razão entre a viscosidade do nanofluido e do fluido base diminui à medida que aumenta a temperatura, mostrando que para aplicações que utilizam alta temperatura de trabalho o uso de nanofluido não implicará em grande aumento na perda de carga.

Alguns estudos mostraram que os nanofluidos apresentam comportamento de fluido Newtoniano tal como os resultados obtidos por Yiamsawas *et al.* (2013), que realizou os seus testes nanofluidos de TiO₂/Etileno Glicol-Água (20/80 em massa) e temperaturas de 15 a 60 °C. Porém, o estudo realizado por Kole; Dey (2010) mostrou um comportamento não-Newtoniano no fluido base (50:50 propileno glicol e água) quando se adiciona pequenas quantidades de nanopartículas de Al₂O₃ a baixas temperaturas, se tornando Newtoniano novamente quando se encontram a temperaturas superiores a 40 °C. A uma concentração maior que 0,4% o nanofluido apresentou comportamento Newtoniano em toda a faixa de temperatura (10 a 50 °C).

Devido as divergências em resultados com relação a viscosidade, Venerus *et al.* (2010) distribuiram amostras de diversos nanofluidos em laboratórios diferentes, de modo que eles medissem a viscosidade de tais nanofluidos, sem que houvesse diferença no preparo dessas amostras. Dois tipos de viscosímetros foram usados nessa pesquisa, em uma categoria, a deformação da amostra é não homogênea e da taxa (média) de deformação geralmente não é conhecida e na outra categoria são viscosímetros que se aplicam deformações controlada e praticamente uniforme nas amostras, que é o caso dos viscosímetros cone-placa. Dos experimentos realizados, apenas duas das dez amostras apresentaram comportamento não-Newtoniano. Todas as medições foram realizadas a temperatura ambiente, no qual variou de 20 a 26 °C. Uma mudança de cerca de 10% na viscosidade é possível para este intervalo de temperatura. No geral os resultados apresentaram boa concordância entre diversas instituições, com variações de aproximadamente ± 20%, que podem, em parte, ser justificado pela variação de temperatura de um laboratório para outro.

2.4.1 Correlações para Viscosidade

Modelos para a previsão da viscosidade de misturas sólido-líquido foram propostos por alguns autores, a maioria destes modelos são baseado na teoria de Einstein (1906), apresentado na Eq. (2.5).

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi)\mu_{fb} \quad (2.5)$$

onde μ_{nf} é a viscosidade do nanofluido, ϕ a concentração e μ_{fb} a viscosidade do fluido base.

Outros modelos são apresentados na Tab. 2.3.

Tabela 2.3 - Modelos para viscosidade

| Expressão | Referência |
|--|------------------|
| $\mu_{nf} = \frac{1}{(1-\phi)^{2,5}}\mu_{fb}$ | Brinkman (1952) |
| $\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi + 6,2\phi^2)\mu_{fb}$ | Batchelor (1977) |

Pesquisadores têm apresentado outras expressões específicas para nanofluido, porém a maioria delas é baseada em ajustes de curva de dados experimentais.

2.4.2 Resultados Experimentais para Viscosidade de Nanofluidos

Namburu *et al.* (2007) mediram a viscosidade de nanofluido preparado com óxido de cobre e uma mistura de 60:40 em massa de etileno glicol e água. Eles variaram a concentração em volume das nanopartículas de 0% a 6,12% em volume, e a temperatura de -35°C a 50° C. A viscosidade do nanofluido com concentração de 6,12% de óxido de cobre a uma temperatura de -35°C é de quatro vezes o valor do fluido base.

Yiamsawas *et al.* (2013) realizaram medições das viscosidades de nanopartículas de TiO_2 e Al_2O_3 suspensas em uma mistura de etileno glicol e água (20:80 em massa). O

experimento foi realizado para diferentes concentrações (0% a 4% em volume) e diferentes temperaturas de 15 °C a 60 °C.

Kole; Dey (2010) avaliaram o aumento da viscosidade de nanofluido preparado com nanopartículas de alumina e refrigerante comercial de carro (50:50 de propileno glicol e água), com diferentes concentrações (0% a 1,5%) e a diferentes temperaturas (10 °C a 50 °C). Os resultados de todos esses autores mostraram que a viscosidade sofre um aumento quando se aumenta a concentração de nanopartículas e ao diminuir a temperatura do fluido.

Oliveira (2012) realizou medições de viscosidade em nanofluido de Ag/água com concentrações de 0,1; 0,2 e 0,3% em vol., o maior incremento foi de 5% para concentração de 0,2%, porém todos os incrementos foram inferiores à incerteza do equipamento.

Tabela 2.4: Resultados experimentais de viscosidade apresentados na literatura.

| Autor (Ano) | Nanopartícula | Fluido base | Concentração | Comportamento | Incremento |
|------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------|--|------------|
| Prasher <i>et al.</i> (2006) | Al ₂ O ₃ | PG | 3% (vol) | Newtoniano | 38% |
| Chen <i>et al.</i> (2007) | TiO ₂ | EG | 8% (massa) | Newtoniano | 23% |
| Nguyen <i>et al.</i> (2008) | Al ₂ O ₃ | Água | 13% (vol) | - | 430% |
| Kole e Dey (2010) | Al ₂ O ₃ | EG | 1,5% (vol) | Newtoniano para $\phi > 0,4 \%$, abaixo disso fluido não- Newtoniano | 140% |
| Oliveira (2012) | Ag | Água | 0,2% | - | 5% |

Continua na próxima página

| | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------|------------|-----|
| Yiamsawas <i>et al.</i> (2013) | TiO ₂ | EG/Água (20/80% massa) | 4% (vol) | Newtoniano | 7% |
| | Al ₂ O ₃ | EG/Água (20/80% massa) | 4% (vol) | Newtoniano | 14% |
| Paz (2014) | Ag | Água | 0,5% | - | 4% |

*PG – Propileno Glicol; EG – Etileno Glicol

2.5 Massa específica e Calor Específico de Nanofluidos

A massa específica de dispersões pode ser calculada a partir de um balanço de concentrações, onde se utiliza as propriedades de cada componente puro para estimar tal propriedade da mistura, que seria apresentado da seguinte forma:

$$\rho = \sum \phi_i \rho_i \quad (2.6)$$

onde ϕ_i e ρ_i são a fração em volume e a massa específica de cada componente respectivamente.

Uma vez conhecida a concentração em volume de nanopartículas na mistura, ϕ , a massa específica da dispersão pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_{fb} + \phi \rho_{np} \quad (2.7)$$

onde o subscrito *nf* fazer referência a propriedade do nanofluido, *fb* do fluido base e *np* da nanopartículas.

Pak (1998) utilizou essa equação para comparar os resultados de medições da massa específica de nanofluido de dióxido de titânio e de alumina a base de água e encontraram um desvio máximo de 0,6%, das medições para os valores calculados.

O calor específico dos nanofluidos pode ser determinado assumindo-se que as nanopartículas e o fluido base estão em equilíbrio térmico entre si em qualquer instante, conforme apresentado na Eq. (2.8)

$$\begin{aligned}
 (\rho c_p)_{nf} &= \rho_{nf} \left(\frac{Q}{m\Delta T} \right)_{nf} = \rho_{nf} \left(\frac{Q_{np} + Q_{fb}}{(m_{np} + m_{fb})\Delta T} \right) \\
 &= \rho_{nf} \left(\frac{(mc_p)_{np}\Delta T + (mc_p)_{fb}\Delta T}{(m_{np} + m_{fb})\Delta T} \right) = \rho_{nf} \left(\frac{(\rho c_p)_{np}V_{np} + (\rho c_p)_{fb}V_{fb}}{\rho_{np}V_{np} + \rho_{fb}V_{fb}} \right)
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Chegando a Eq. (2.9) para calor específico para uma dispersão de nanopartículas.

$$c_{p,nf} = \frac{(1-\phi)\rho_{fb}c_{p,fb} + \phi\rho_{np}c_{p,np}}{\rho_{nf}} \tag{2.9}$$

Khanafer; Vafai (2011) compararam dados experimentais com resultados obtidos através da equação acima, mostrando que a estimativa realizada através dessa equação é bem coerente como os dados experimentais.

2.6 Sistema de Arrefecimento Automotivo

O sistema de arrefecimento de um motor é composto pelo radiador, válvula termostática, bomba do líquido de arrefecimento e ventoinha, além das mangueiras de ligação, sendo que, o fluido de arrefecimento é bombeado da parte inferior do radiador e forçado a circular ao redor das paredes e do cabeçote. Após trocar calor com o bloco de cilindros o fluido de arrefecimento passa pelo radiador, onde é resfriado pelo ar que cruza frontalmente o radiador, e desce até a mangueira inferior para começar o novo ciclo. A Fig. 2.3 mostra o

sistema de arrefecimento de um motor e a Fig. 2.4 mostra o desenho esquemático de um radiador automotivo, com os detalhes construtivos.

O radiador é um trocador de calor de corrente cruzada e tem como função retirar calor do fluido de arrefecimento que é usado para resfriar o motor. O núcleo do radiador é composto de tubos que carregam o fluido e aletas que são superfícies estendidas ao longo dos tubos, sendo essas responsáveis pelo aumento da eficiência de transferência do lado do ar. Uma outra alternativa para aumentar a eficiência de radiadores automotivos seria a troca do fluido de arrefecimento por um fluido com maior capacidade de troca térmica. O fluido de arrefecimento usado nos radiadores, geralmente, é uma mistura de água e etíleno glicol, estes possuem uma baixa condutividade térmica.

Um bom fluido de arrefecimento deve possuir condutividade térmica elevada, aumentando assim a troca térmica e a capacidade de transporte de energia térmica, viscosidade baixa, diminuindo o trabalho de bombeamento, apresentar baixo potencial de corrosão nas paredes do sistema, reter a mínima quantidade de depósito, oferecer lubrificação do sistema e apresentar capacidade anticongelante em situações de baixa temperatura. (CAMPOS, 2009).

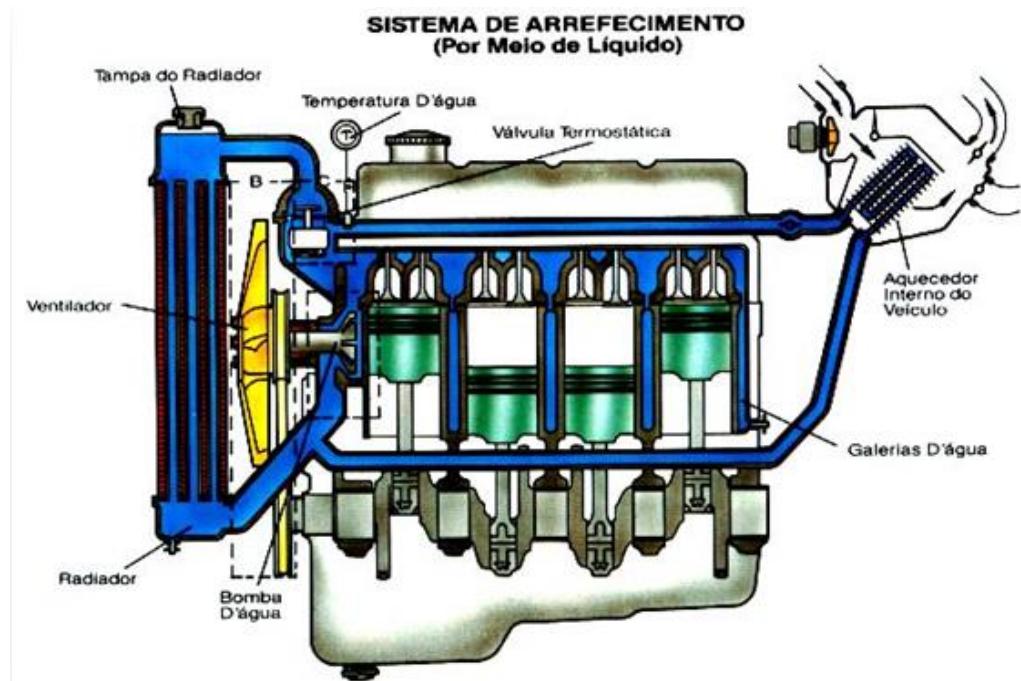


Figura 2.3 - Sistema de arrefecimento de um motor

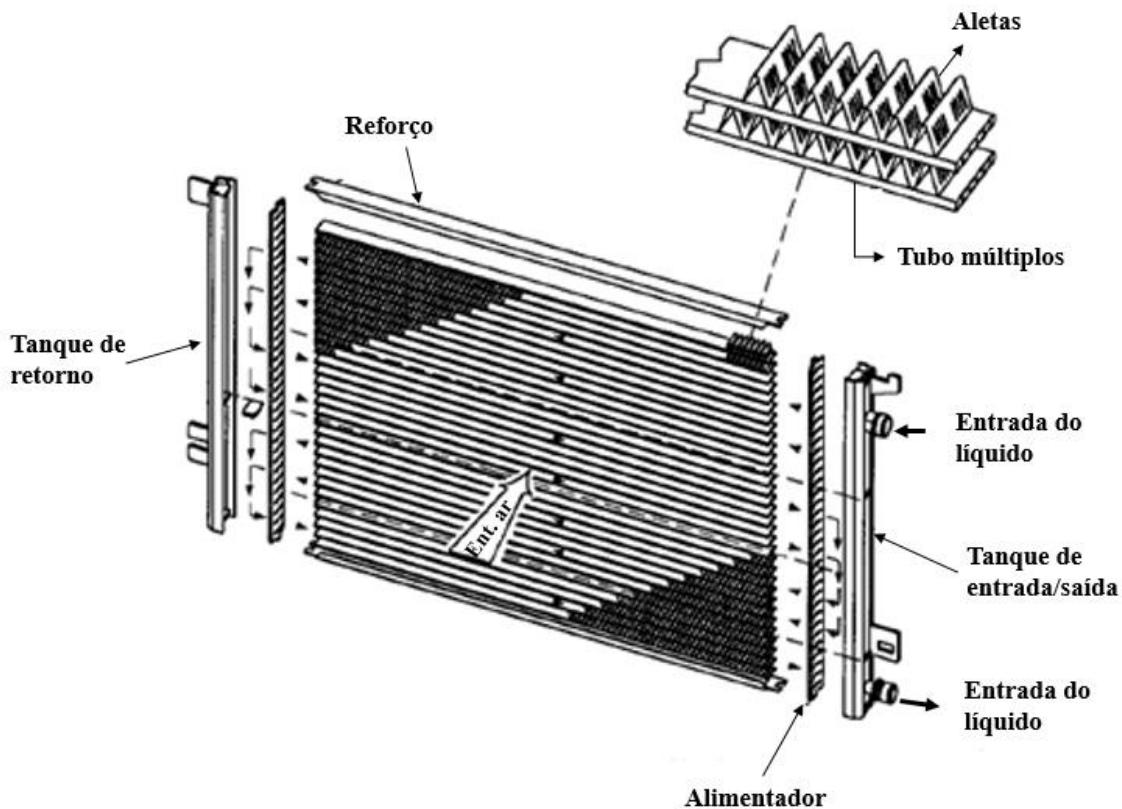


Figura 2.4 – Desenho esquemático de um radiador.

2.7 Nanofluidos em Radiadores Automotivos

Alguns estudos numéricos e experimentais foram realizados, analisando o desempenho térmico de radiador automotivo, utilizando nanofluidos como fluido de arrefecimento.

Leong *et al.* (2010) investigaram numericamente a aplicação de nanofluido de cobre/etileno glicol em sistema de arrefecimento automotivo, os dados de entrada e propriedades dos nanofluidos e correlações empíricas foram obtidos da literatura. Os resultados mostraram que o coeficiente de transferência de calor global aumenta com a fração de volume. O mesmo ocorre com a taxa de transferência de calor, sendo que este aumenta exponencialmente com a fração de volume. Observou-se um aumento de 3,8% na transferência de calor, que foi obtido com a adição de 2% de nanopartículas de cobre no etileno glicol com números de Reynolds de 6000 e 5000 para o ar e para o refrigerante, respectivamente. O coeficiente aumenta显著mente com o aumento do número de Reynolds do ar, chegando um acréscimo de 45,2% quando o número de Reynolds do ar é

elevado de 4000 para 6000, utilizando nanofluidos com 2% de concentração. Aumenta consideravelmente menos com o número de Reynolds do líquido, que chega somente a 0,4% de aumento para nanofluido com 2% de nanopartículas de cobre em etíleno glicol, quando o número de Reynolds do fluido é aumentado de 5000 a 7000. Foi avaliado, também, o efeito da presença de nanopartículas no fluido base na queda de pressão, que apresentou aumento quando nanopartículas de cobre foram acrescentadas, levando a um aumento de 12,3% na potência de bombeamento, quando utilizado nanofluido com 2% de concentração a uma vazão volumétrica 0,2 m³/s comparado com o mesmo radiador utilizando etíleno glicol puro. Os autores estimaram uma redução de 18,7% na área frontal do lado do ar quando nanofluido com 2% de cobre é usado a um número de Reynolds do ar igual a 6000 e o do fluido igual a 5000.

Peyghambarzadeh *et al.* (2011) realizaram experimentos com nanofluidos de Al₂O₃/água e Al₂O₃/etíleno glicol circulando em radiador automotivo, a concentração de nanopartículas variou entre 0,1 e 1% vol., além da vazão, entre 2 e 6 l/min e temperaturas de entrada do refrigerante. Os resultados mostraram um aumento de até 40% no número de Nusselt para ambos os nanofluidos com concentração de 1% em volume. Os autores notaram que a concentração e as condições de escoamento influenciam significativamente a transferência de calor, já a temperatura não tem grande influência em tal fenômeno. Outras observações foram feitas nesse experimento, tais como, a razão do número de Nusselt do nanofluido e do número de Nusselt do fluido base aumenta com o número de Reynolds, sendo que, para o nanofluido a base de água em altas concentrações o efeito do Reynolds se torna mais pronunciado, o mesmo não ocorre com o nanofluido a base de etíleno glicol que exibe uma tendência irregular diante do número de Reynolds. Outro ponto destacado é o fato das propriedades dos nanofluidos apresentarem um aumento pouco significativo para explicar o considerável aumento na transferência de calor. Alguns autores têm sugerido que o movimento Browniano é um dos fatores que tem mais influência no aumento da transferência de calor

Peyghambarzadeh *et al.* (2013) avaliaram experimentalmente o desempenho de transferência de calor de radiadores automotivos, usando nanofluidos de Cu/água e Fe₂O₃/água. Os resultados mostraram que o coeficiente global de transferência de calor apresenta um aumento de até 9%, utilizando nanofluido como refrigerante comparado com a água. Esse aumento é mais pronunciado a medida que aumenta a concentração de

nanopartículas, velocidade do ar e velocidade de nanofluidos, porém há uma diminuição no coeficiente global de transferência ao aumentar a temperatura de entrada do nanofluido, o que difere com resultados apresentados por outros autores.

Naraki *et al.* (2013) analisaram experimentalmente o coeficiente global de transferência de calor de nanofluido de CuO/água aplicado em radiadores de carro em regime laminar, utilizando o método ε -NTU. Um aumento máximo de 8% foi obtido comparado com a água. Foi observado que ao incrementar a concentração, o coeficiente aumenta. Além de aumentar, significantemente, com o aumento da vazão volumétrica do nanofluido e número de Reynolds do ar, e o mesmo é reduzido quando se aumenta a temperatura de entrada do fluido. As possíveis causas da diminuição do coeficiente global de transferência de calor, devido ao aumento da temperatura de entrada do nanofluido, segundo os autores, são: a densidade do nanofluido diminui muito pouco com o aumento da temperatura, enquanto a viscosidade diminui significantemente, levando a um número de Reynolds elevado à altas temperaturas; o rápido alinhamento das nanopartículas em baixas viscosidades leva a um contato entre partículas menores; e finalmente a redução das nanopartículas na fase líquida próxima da parede, levando a uma camada de condutividade térmica inferior à parede. Uma análise estatística usando o método Taguchi foi realizada para avaliar a influência de cada parâmetro no coeficiente global de transferência de calor com nanofluido. Os resultados mostram que a vazão volumétrica do ar tem uma influência de 42% na resposta, enquanto que a vazão volumétrica do nanofluido, a temperatura de entrada e a concentração de nanopartículas têm 23%, 22% e 13% de contribuição na resposta.

Hussein; Bakar; Kadirkama (2014) realizaram um estudo numérico e experimental, analisando o fator de atrito e transferência de calor por condução forçada de nanofluido de SiO₂/água em radiador automotivo. Foi encontrado um aumento máximo de 22% no fator de atrito e de 40% no número de Nusselt com o nanofluido com concentração de 2,5% em volume.

Chougule; Sahu (2014) avaliaram experimentalmente o desempenho térmico de radiador automotivo operando com nanotubo de carbono disperso em água. Os testes foram realizados mantendo a temperatura de entrada do líquido de 90 °C, e temperatura de entrada do ar a 35 °C, enquanto a vazão do líquido foi variada de 2 l/mim a 5 l/min, e a concentração de nanopartículas de 0,15% a 1%. Um incremento de 90,76% na transferência de calor foi alcançado com a aplicação de nanofluido, quando comparado com a água pura operando a

uma vazão de 5l/min. Foram ensaiados nanofluidos com diferentes pH (5,5; 6,5 e 9), sendo que, o valor menor apresentou o melhor desempenho térmico. E, por fim, dois métodos de produção de nanofluidos diferentes foram usados nos experimentos. Método de tratamento ácido de funcionalização, que consiste no tratamento de ácido simples, proporciona suspensões de nanotubos de carbono em água estáveis. A outra amostra foi preparada com surfactante, esse método evita o surgimento de aglomerações de nanopartículas, assim, 0,25% em massa de dodecil sulfato de sódio foi adicionado. Os ensaios com nanofluidos preparados pelo método de funcionalização apresentou melhor desempenho térmico comparado com o método de adição de surfactante.

Além do uso de nanofluidos em radiadores automotivos, pesquisadores testaram seu uso em outras partes do veículo Mishra *et al.* (2013) fez uma revisão desse uso, estão citados nanofluidos como refrigerante em sistemas de refrigeração do motor, onde autores relataram aumento da troca térmica fazendo com que uma maior quantidade de calor seja retirada do motor de alta potência com um radiador relativamente menor e, assim, um redimensionamento do radiador pode trazer benefícios para superar a resistência aerodinâmica, juntamente com aumento da economia de combustível, devido à diminuição no peso do veículo. Outra aplicação em veículos é como aditivo em combustíveis, podendo ajudar na economia do mesmo, uma vez que foi observado pelos pesquisadores a queima completa do combustível, e além da comprovação da baixa produção de gases nocivos (CO, NOx, dentre outros) quando nanofluido de alumina foi utilizado em combustível fóssil como aditivo. Nanopartículas dispersas em óleo mineral tem se mostrado eficiente como lubrificantes de veículos, contribuindo para o prolongamento da vida útil do veículo juntamente com o desempenho. Em amortecedores, são preparados nanofluidos especiais utilizando suspensões de nanopartículas magnéticas com o fluido base. E finalmente, são usados como fluido de freio, onde o nanofluido com sua alta capacidade de troca térmica evita o mau funcionamento dos freios que pode ser causado devido à enorme quantidade de calor gerada ao serem acionados os freios.

Tabela 2.5: Resultados de estudos em radiadores automotivos utilizando nanofluido

| Autor (Ano) | Aborda- gem | Nanof | Φ (%) | T ent. (°C) | Vazão fluído | Re fluído | \uparrow Máx. Nu | \uparrow Máx. U |
|--|----------------|--|------------------|--------------------|-----------------|------------------|-----------------------|----------------------|
| Leong <i>et al.</i> (2010) | Teórico | Cu EG | 0 a 2 0,1 a 1 | 70 a 95 35 a 50 | 5000 a 2 a 5 | 5000 a 9000 a | - 40% | 3,8% - |
| Peyghamb arzadeh <i>et al.</i> (2011) | Exp. | Al ₂ O ₃ Água | 0,1 a 1 | 45 a 60 | 1200 a 2 a 6 | 23000 2500 | - 40% | - - |
| Peyghamb arzadeh <i>et al.</i> (2013) | Exp. | CuO Água | 0,15 a 0,65 | 50 a 80 | 50 a 3 a 8,4 | 300 200 a | - - | 9% 7% |
| Naraki <i>et al.</i> (2013) | Exp. | CuO Água | 0 a 0,4 | 50 a 80 | 3,3 a 8,3 | - | - | 8% |
| Hussein <i>et al.</i> (2013) | Exp. | SiO ₂ Água | 1 a 2,5 | 60 a 80 | 2 a 8 | 500 a 1750 | 56% | - |
| Chougule; Sahu (2014) | Teórico | SiO ₂ Água | 1 a 2,5 | 60 a 80 | 2 a 8 | 500 a 1750 | 40% | - |
| | Exp. | CNT Água | 0,15 a 1 | 90 | 2 a 5 | - | 91% | - |

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Como o objetivo desse trabalho é levantar o desempenho térmico de nanofluidos de prata/água-etileno glicol em radiadores automotivos, o equipamento foi construído de maneira que fosse possível determinar o coeficiente global de transferência de calor. Dessa forma, esse capítulo apresenta uma descrição dos componentes que constituem equipamento experimental, além do modelo físico e matemático do tema em questão.

3.1 Bancada Experimental

A bancada experimental é composta de dois circuitos: um responsável pela circulação de ar, com o objetivo de controlar as condições desejadas de velocidade e temperatura do ar utilizado na seção de teste, o outro responsável por controlar as condições desejadas de temperatura e vazão do fluido que circula no interior do radiador ensaiado.

3.1.1 *Circuito de ar*

O circuito de ar mostrado na Fig. 3.1, possui um ventilador centrifugo com capacidade de 10.000 m³/h, a 200 mm.c.a., para fornecer a vazão de ar desejada no sistema de dutos retangulares de chapa de aço galvanizado.

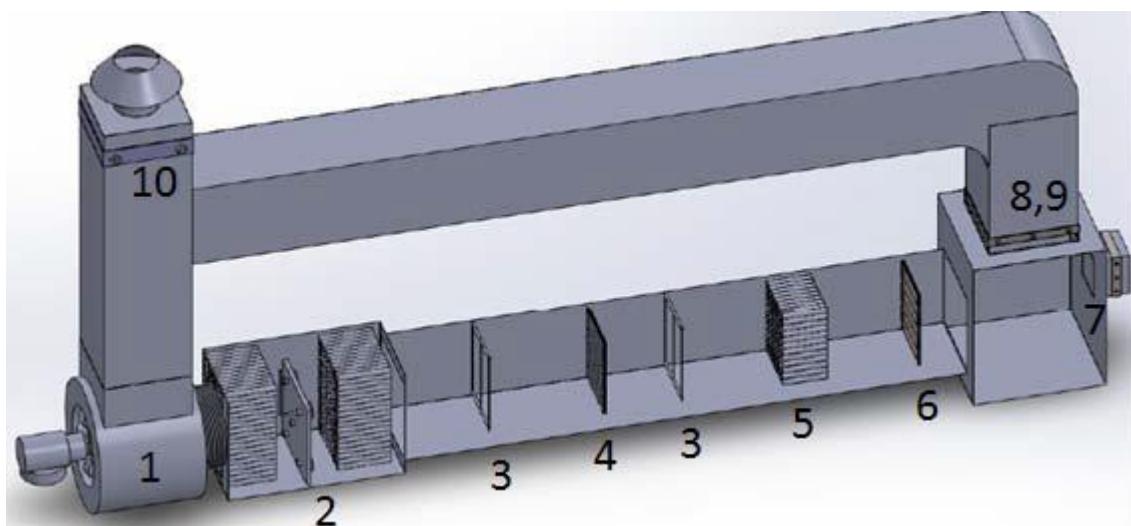


Figura 3.1 - Esquema do túnel de vento utilizado nos ensaios. 1-Ventilador. 2-Placa de bocais. 3-Medição de temperatura. 4-Trocador de calor. 5-Retificador de escoamento. 6-Resistências elétricas. 7-Registro de admissão. 8-Registro de retorno. 9- Serpentina de resfriamento. 10- Registro de descarga

O túnel possui três válvulas, que proporciona flexibilidade para trabalhar com o circuito fechado ou aberto, sendo: um no duto de descarga, à jusante do ventilador, um no duto de retorno do ar e o outro no duto de admissão. Após a válvula de entrada do ar foram instaladas resistências elétricas, na sequência uma seção de retificação de escoamento antes de entrar na seção de ensaio onde está localizado o radiador, além dos dispositivos de medição de temperatura, pressão diferencial na entrada e saída da seção de testes, dispositivo de medição da vazão do ar, que serão detalhados a seguir.

A temperatura de entrada do ar na seção de teste é controlada por intermédio de resistências elétricas, com potência total de 6 kW, a montante da seção de testes. Estas resistências são ligadas a um conversor de potência, Fig. 3.3, que controla a potência dissipada pelas resistências. Além disso, uma serpentina de resfriamento foi instalada no duto de retorno de ar, mostrado na Fig. 3.1, que utiliza água de uma torre de resfriamento, situada no exterior do laboratório, para auxiliar no ajuste de temperatura do ar incidente na seção de teste, quando a bancada opera em circuito fechado. O duto principal está isolado termicamente com manta de borracha elastométrica flexível, com o objetivo de reduzir as perdas para o ambiente, facilitando o controle do ar incidente no radiador.

O controle da vazão do ar é realizado pela variação da rotação do ventilador, por intermédio de um inversor de frequência, Fig. 3.4, e também por uma placa de bocais onde é possível trabalhar com apenas um ou cinco bocais abertos.

A Fig. 3.2 ilustra uma foto, mostrando todos os componentes instalados no lado interno do laboratório.



Figura 3.2 – Foto bancada experimental



Figura 3.3 – Conversor de potência



Figura 3.4 – Inversor de frequência do ventilador

3.1.2 Circuito do Fluido Quente

O circuito do fluido quente consiste em uma bomba magnética de 0,5 CV, Fig. 3.9, ligado a um inversor de frequência, Fig. 3.10, um medidor de vazão tipo Coriolis, uma serpentina com temperatura de parede constante, imersa em um banho térmico aquecido por uma resistência de 9 kW, que é acionado por um controlador PID, Fig. 3.8, controlado pelo sinal de alimentação de um termômetro de resistência, dotado de isolante térmico, onde é realizado o aquecimento do fluido de maneira a garantir uma temperatura de entrada do fluido no radiador estável. Possui, também, um reservatório de líquido, Fig. 3.11, utilizado em sistemas de arrefecimento automotivo, para operar com a pressão do sistema controlada, por intermédio de sua válvula reguladora de pressão e, por fim, o radiador. As Figs. 3.5 e 3.7 representam o desenho esquemático dos componentes do circuito e uma foto real, respectivamente.

O reservatório, instalado acima do nível de entrada do radiador, é conectado na entrada do radiador por de mangueiras de alta temperatura e pressão e com tubos de cobre que foram confeccionados de maneira a conectar um PT100 e um transdutor de pressão na entrada e na saída do radiador. A saída do radiador está conectada a bomba com as mesmas mangueiras, onde o fluido é bombeado para a serpentina, para aquecer o fluido e, em seguida, passando no medidor de vazão e retornando ao reservatório.

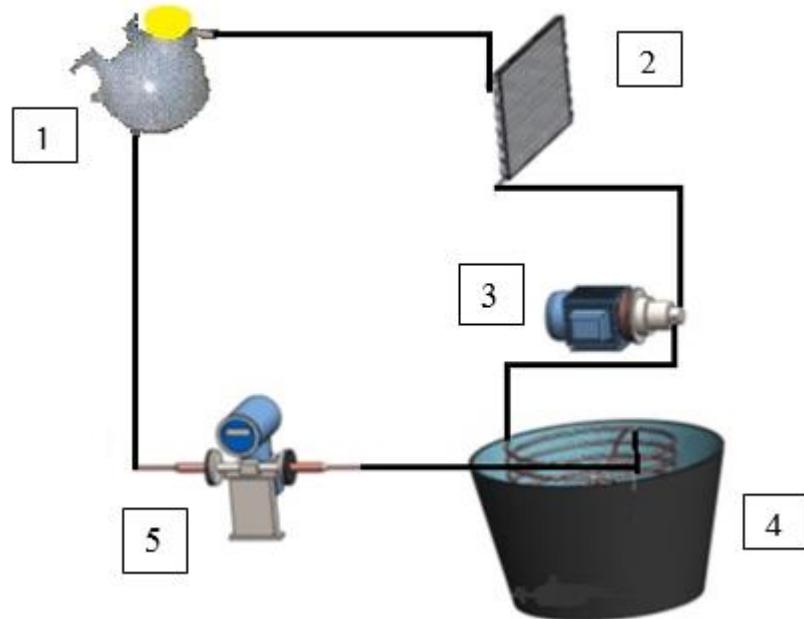


Figura 3.5 – Desenho esquemático do circuito do fluido quente: 1- reservatório, 2 - Radiador, 3 - Bomba magnética, 4 - Banho térmico com serpentina e 5 - Medidor de vazão.



Figura 3.6 – Banho Térmico



Figura 3.7 – Foto circuito do fluido quente



Figura 3.8 –Termostato usado no banho térmico



Figura 3.9 – Microbomba e motor

Figura 3.10 – Inversor de frequência do motor que aciona a bomba



Figura 3.11 – Reservatório do fluido de trabalho



Figura 3.12 – Radiador ensaiado

3.2 Sistema de Aquisição dos Dados

Para a realização de aquisição de dados, foram utilizados módulos acoplados a um chassi NI Compact cDAQ-9178XT da empresa NATIONAL INSTRUMENTS. Módulos com entrada analógica para RTD 100 Ω 24 bits foram usados para aquisição de dados para termopares (tipo T, K) e um módulo para aquisição do sinal analógico de pressão (ou diferencial de pressão) com entrada de ± 21 mA. Por meio de uma plataforma em Labview os dados são transferidos e armazenado em um computador, e onde é feito o monitoramento das variáveis.



Figura 3.13 – Chassi de aquisição



Figura 3.14 – Módulos de aquisição

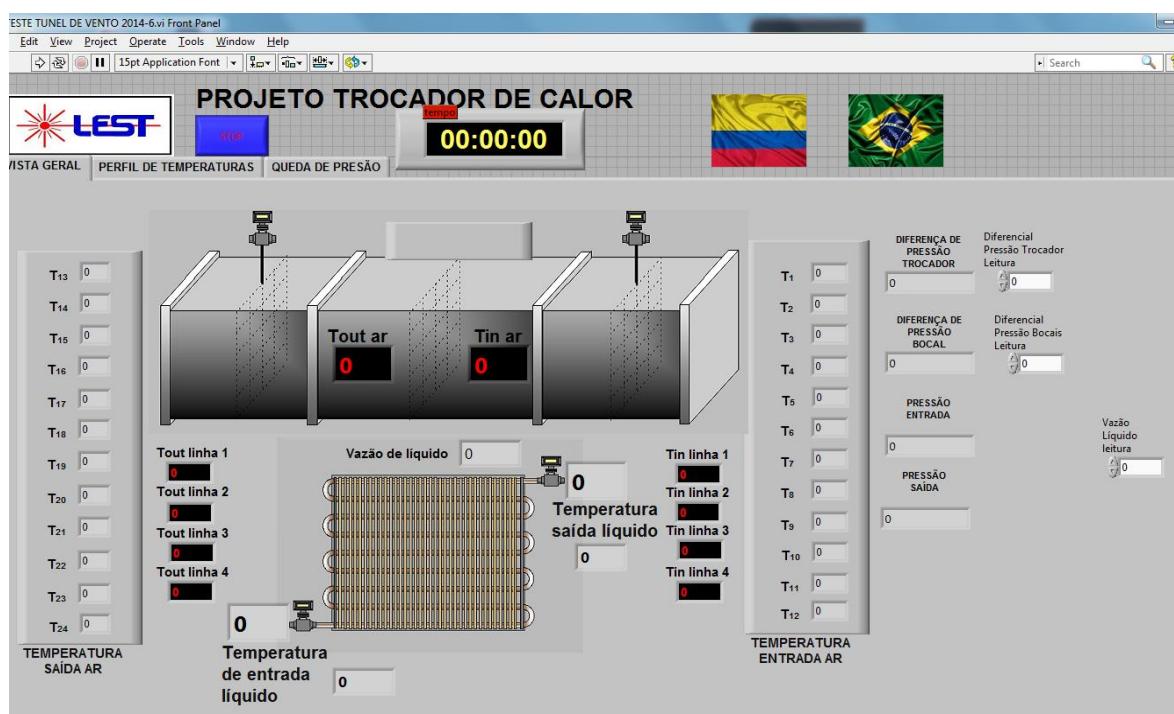


Figura 3.15 – Plataforma de monitoramento no Labview

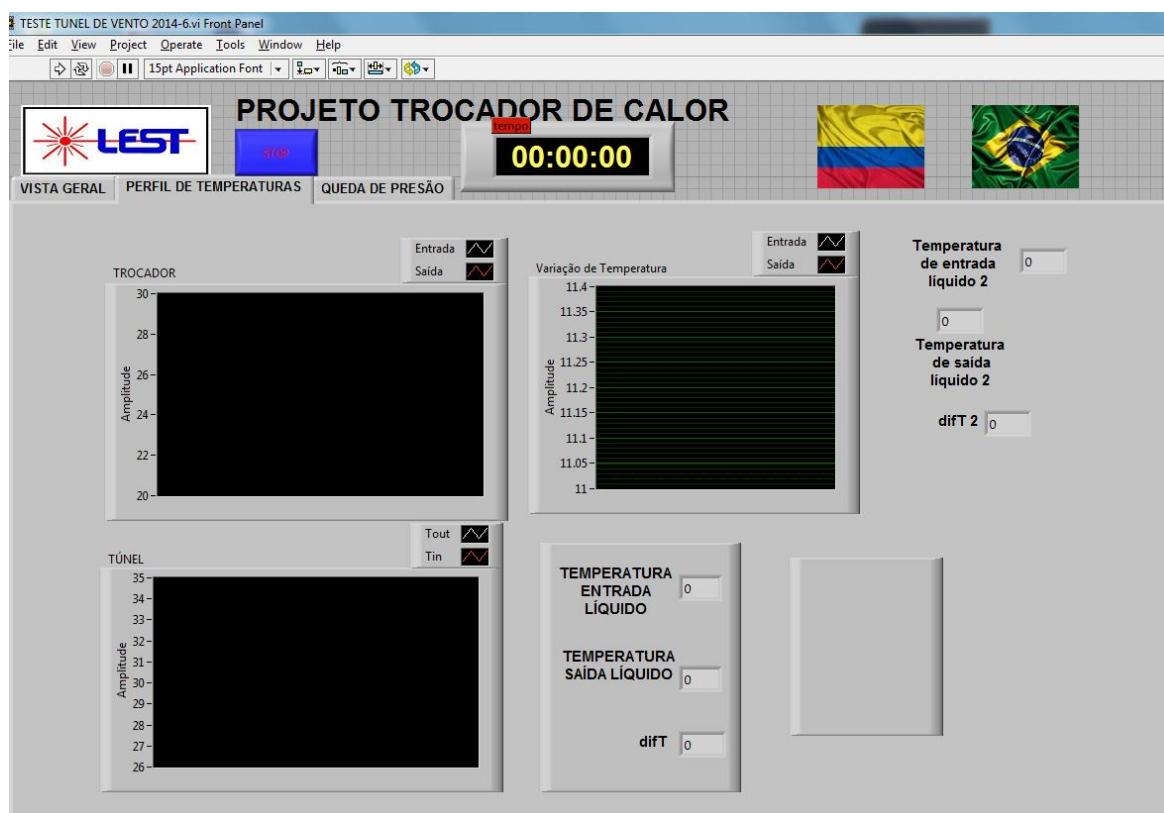


Figura 3.16 – Seção de gráficos de temperatura na plataforma de monitoramento no Labview.

3.3 Parâmetros Medidos e Incertezas

3.3.1 Temperatura

As medidas de temperatura do líquido foram realizadas, utilizando sensores de temperatura (Termoresistência) modelo PT 100, dispositivos do tipo RTD (Resistance Temperature Detector) de três fios (fornecidos por IOPE Instrumentos de Precisão Ltda.) localizados na entrada e saída do trocador, em uma extensão no tubo de cobre, onde são rosqueados os PT 100, estes possuem resolução de 0,1 °C.



Figura 3.17 – Sensor de temperatura modelo PT100

Para o lado do ar, foram utilizados 12 termopares tipo T distribuídos conforme ilustra a Fig. 3.18, devido à distribuição de temperatura na seção não ser uniforme, utilizando assim a média dos 12 termopares na entrada do ar. De maneira similar, outra malha de termopares foi instalada na saída do ar da seção de testes. O posicionamento dos termopares segue às recomendações da ASHRAE 33 (1978).

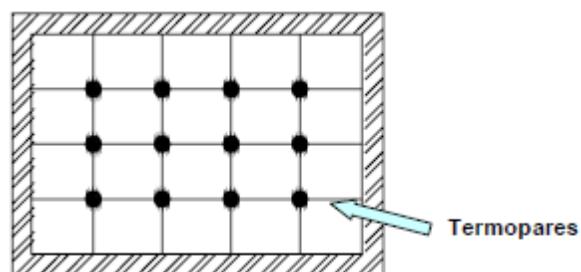


Figura 3.18 – Desenho esquemático do posicionamento dos termopares no túnel de vento. Retirado de Zoghbi Filho, J. R. B., (2004).

Para medir a temperatura de bulbo úmido e umidade relativa foi utilizado um termohigrômetro modelo RHXL3SD da Omega. A foto do mesmo é apresentada na Fig. 3.19.

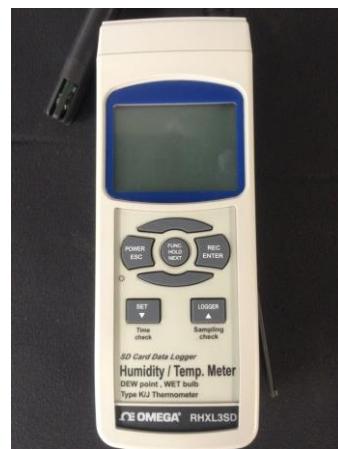


Figura 3.19 – Medidor de temperatura de bulbo úmido e umidade relativa

3.3.2 Vazão do líquido

A vazão mássica do fluido foi obtida por intermédio de um medidor do tipo efeito Coriolis da METROVAL controle de fluidos Ltda, este é constituído por um sensor modelo RHM03-4FS1PN e um conversor modelo CMM01



Figura 3.20 – medidor de vazão

3.3.3 Pressão e diferencial de pressão

Para obter a diferença de pressão na placa de bocais foi utilizado um manômetro em U e um transmissor de pressão diferencial da Smar, modelo LD301, com faixa de medição de -250 a +250 kPa.

Já para medir as pressões de entrada e saída do líquido foi instalado um transdutor diferencial de pressão, Modelo PSI 420 da ZURICH, com faixa de medição 0 de 100 Pa.

3.3.4 Vazão de ar

Uma placa com cinco bocais com tamanhos diferentes foi instalada no túnel de vento, onde pôde-se optar pela utilização dos cinco bocais abertos, quando se desejar operar a máxima vazão, ou operar com vazões menores, realizando o bloqueio de bocais de acordo com a vazão desejada.

A disposição dos bocais na placa está ilustrada na Fig.3.23, onde os mesmos foram distribuídos de acordo com a norma ASHRAE 41.2, segundo a qual, as distâncias entre centros de bocais, e entre o centro de um bocal e a parede de duto adjacente devem ser, respectivamente, superiores a três vezes o diâmetro da garganta do bocal e 1,5 vezes o diâmetro da garganta do bocal. A placa possui cinco bocais e suas dimensões estão listada na Tab. 3.1.



Figura 3.21 – Seção de medida da vazão

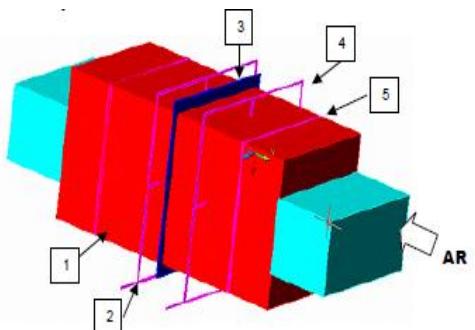


Figura 3.22 - Vista tridimensional do pleno da seção de medida de vazão de ar: (1) seção retificadora de escoamento a jusante, (2) tomada de pressão a jusante, (3) placa de bocais, (4) tomada de pressão a montante, (5) seção retificadora de escoamento a montante. Zoghbi Filho, J. R. B., (2004).

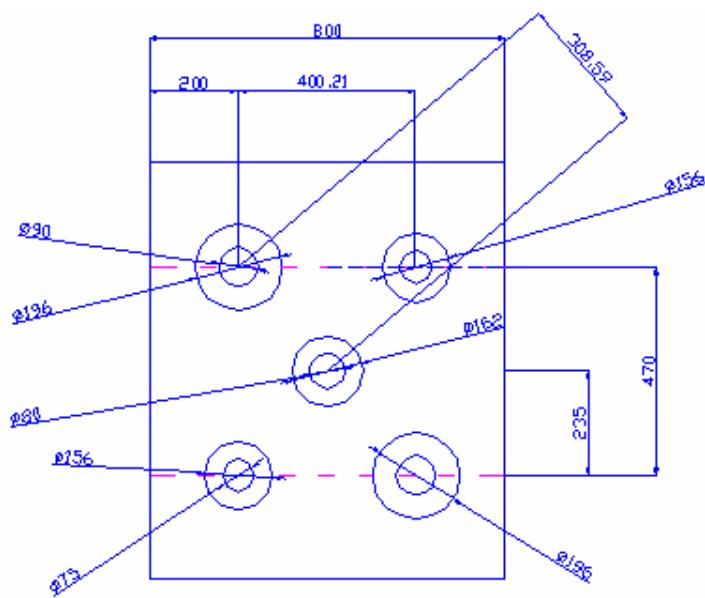


Figura 3.23 – Disposição dos bocais na placa Zoghbi Filho, J. R. B., (2004).

Tabela 3.1- Dimensões dos Bocais de Medida de vazão

| Número de Bocais | Diâmetro da Seção de Entrada do Bocal (mm) | Diâmetro da Seção de Saída do Bocal (mm) |
|------------------|--|--|
| 2 | 175,0 | 75 |
| 1 | 186,7 | 80 |
| 2 | 210,0 | 90 |

Curvas características da placa de bocais com distintas configurações, relacionadas ao número de bocais em operação, em termos de Vazão (m^3/h) versus ΔP (mm.c.a.) são apresentadas na Fig. 3.24. Essas curvas podem auxiliar na decisão sobre a configuração mais apropriada para determinada de vazão.

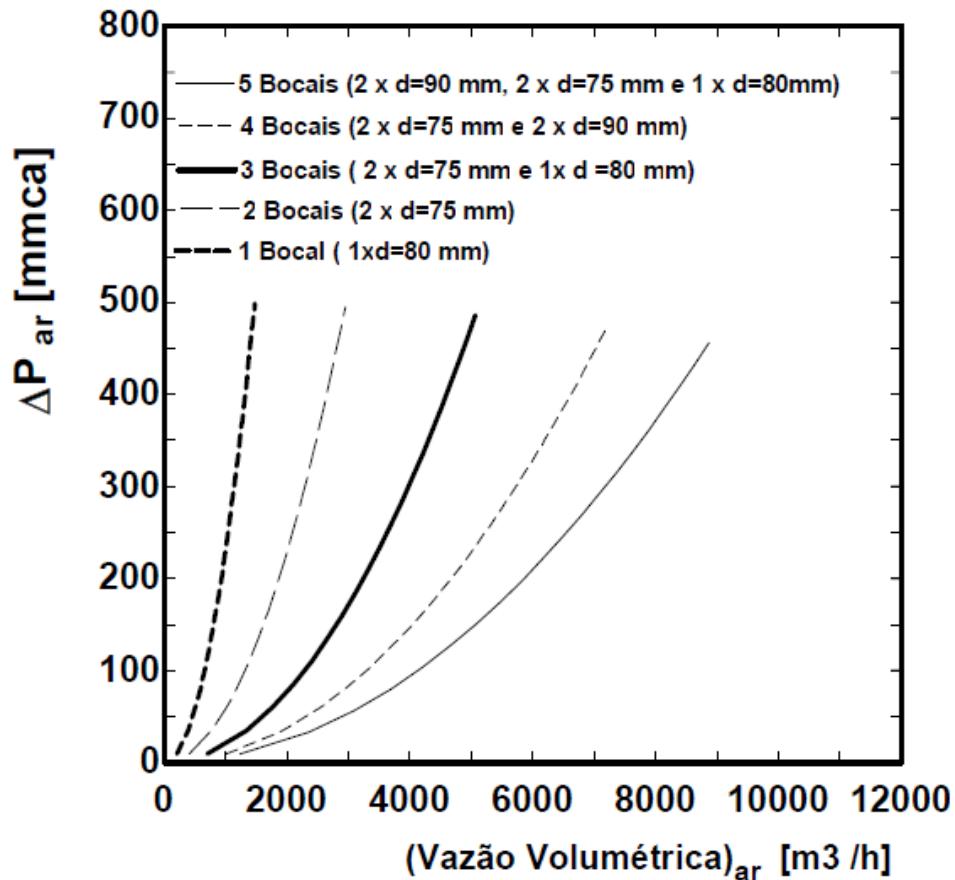


Figura 3.24 – Curva característica da placa de bocais. Zoghbi Filho, J. R. B., (2004).

3.4.4.1. Determinação da vazão do ar

A vazão de ar foi avaliada por dois métodos distintos apresentados a seguir.

Método calorimétrico: a vazão de ar é obtida por intermédio de um balanço de energia no trocador:

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\dot{Q}_{liq}}{c_{p,ar} (T_{s,ar} - T_{e,ar})} \quad (3.1)$$

sendo \dot{m}_{ar} a vazão mássica do ar, \dot{Q}_{liq} fluxo de calor retirado do líquido, $c_{p,ar}$ calor específico do ar e $T_{ar,s}$ e $T_{ar,e}$ são as temperaturas de saída e entrada do ar, respectivamente.

Placa de bocais: No qual foi descrita na seção 3.4.4.

$$\dot{m}_{ar} = \sum_i C_{D,i} \dot{m}_{t,i} \quad (3.2)$$

onde a vazão teórica através de cada bocal, $\dot{m}_{t,i}$, o coeficiente de descarga, $C_{D,i}$, são obtidos a partir das Eq. (3.3) e Eq. (3.4.)

$$\dot{m}_{t,i} = \frac{A_{Descarga,i} \sqrt{2 \rho_{ar,Bocais} \Delta P_{Placa}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_{Descarga,i}}{A_{placa}} \right)^2}} \quad (3.3)$$

$$C_{D,i} = 0,9975 - 0,00653 \left(\frac{10^6}{Re_{Descarga,i}} \right)^a \quad (3.4)$$

onde:

$$\text{para } Re_{Descarga,i} < 10^6 \Rightarrow a = 1/2$$

$$\text{para } Re_{Descarga,i} > 10^6 \Rightarrow a = 1/5$$

3.4 Formulação do Problema

Nessa seção serão apresentados o modelo físico, com as devidas hipóteses simplificadoras e a modelagem matemática.

3.4.1 Modelo físico

Na Fig. 3.25 é possível observar o volume de controle para análise.

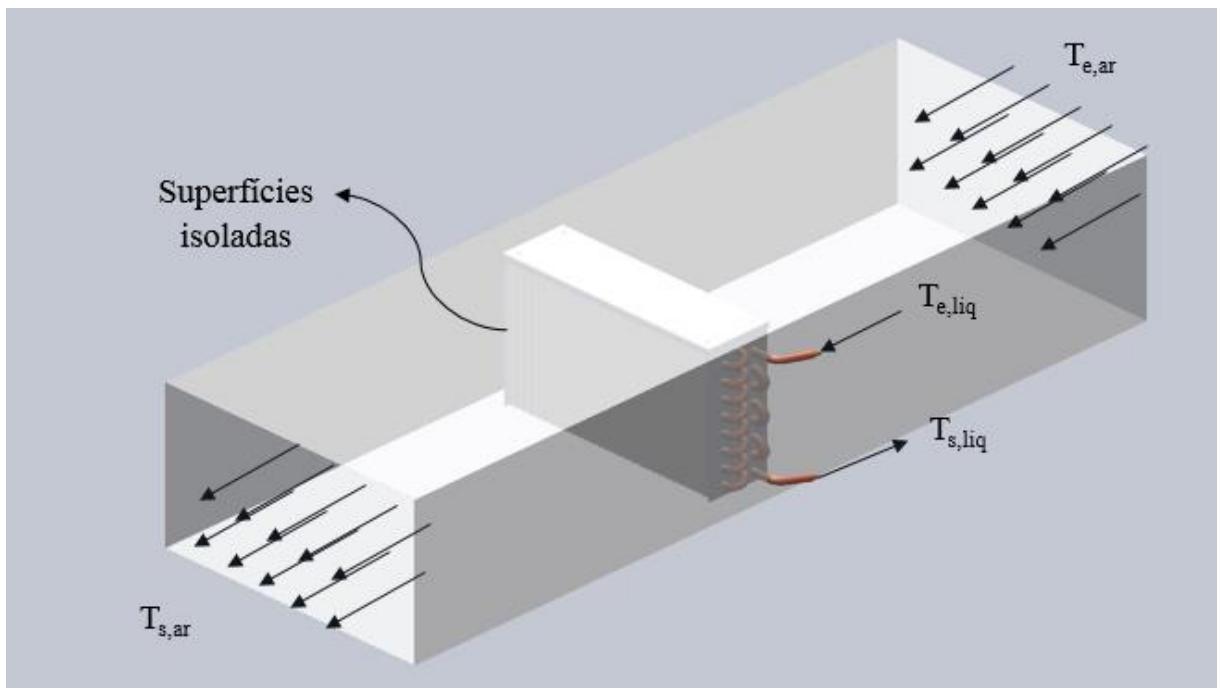


Figura 3.25 – Modelo físico da seção de testes.

Hipóteses:

- O radiador opera em modo estacionário (taxas de fluxo e temperatura do fluido constantes na entrada e no interior do radiador);
- Sistema adiabático;
- Não existem fontes de energia térmica ou dissipadores nas paredes do radiador ou fluidos, tais como aquecimento elétrico, reação química;
- Resistência térmica da parede é distribuída uniformemente em todo radiador;
- Não há mudança de fase nas correntes de fluido que escoa através do trocador;
- Os coeficientes de transferência de calor de cada lado do radiador e o global são constantes ao longo do radiador;
- O calor específico de cada fluido é constante ao longo do radiador, logo a taxa de capacidade de calor é considerada constante em cada lado;
- A eficiência das aletas é considerada constante e uniforme.
- A área de superfície de transferência de calor em cada lado é distribuída uniformemente.
- A velocidade e temperatura de entrada em cada lado do fluido são uniformes ao longo da seção transversal do escoamento

3.4.2 Modelo matemático

Para realizar a análise de transferência de calor em um trocador, o objetivo é relacionar a taxa de transferência de calor q , a área de superfície de transferência A , a taxa de capacidade de calor C de cada fluido, o coeficiente global de transferência de calor U , e temperaturas finais dos fluidos. Com esse propósito, duas relações básicas são usadas: balanço de energia baseado na primeira lei da termodinâmica, Eq. (3.5) e equações de taxa de transferência de calor.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p \Delta T \quad (3.5)$$

Para fluidos monofásicos em um trocador de calor, a taxa de entalpia é igual a $\dot{m}\Delta h = \dot{m}c_p \Delta T$. Em um sistema adiabático $\dot{Q}_q = \dot{Q}_f$, assim:

$$(\dot{m}c_p \Delta T)_q = (\dot{m}c_p \Delta T)_f \quad (3.6)$$

A Eq. (3.6) reflete a conservação de energia, sem perda para o ambiente. Os valores dos calores específicos foram obtidos pelo programa EES de acordo com as condições dos fluidos (ar, água e etileno glicol), para os nanofluidos o c_p foi calculado por intermédio da Eq. (2.8).

A taxa de transferência de calor é proporcional a área de transferência de calor A e diferença de temperatura média ΔT_m entre os fluidos, o valor desse parâmetro depende do arranjo de fluxo do trocador. O coeficiente de transferência de calor global U é o coeficiente de proporcionalidade da Eq. (3.7).

$$\dot{Q} = UA\Delta T_m \quad (3.7)$$

No caso de análises de trocadores de calor, tem-se três variáveis de respostas que são as temperaturas de saída dos fluidos quentes e frios, e a taxa de transferência de calor. Tem-se quatro variáveis de condições de operação que são as temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio e as taxas de capacidades de calor dos fluidos quentes e frios. E, por fim, temos

três parâmetros de projeto controlados: o coeficiente de transferência de calor global, área de superfície de troca e o arranjo do escoamento.

Análises de trocador de calor é de difícil entendimento, pois depende de um grande número de variáveis e parâmetros. Assim, alguns métodos são utilizados para a avaliação desempenho térmico de trocadores de calor, tais como ϵ -NUT, P-NUT e DTML, utilizando grupos adimensionais com o objetivo de simplificar as análises. Na literatura, o método mais utilizado para a análise de desempenho térmico e radiadores automotivos usando nanofluidos é o método de ϵ -NUT que está descrito a seguir.

3.5 Cálculo do coeficiente global de transferência de calor

Com os dados coletados durante os experimentos, foram calculados os valores das taxas de transferência de calor de ambos os lados dos trocadores, representados por \dot{Q}_{ar} (para a taxa de transferência de calor do lado do ar) e \dot{Q}_{liq} (para a taxa de transferência de calor do lado do líquido). Para os cálculos do coeficiente global de transferência de calor, calculado em função da área, com o objetivo de facilitar os cálculos, (uma vez que foi ensaiado um único radiador), foi utilizado a média das taxas de transferência de calor de ambos os lados.

O item a seguir descreve o método utilizado para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor.

Método ϵ -NUT

Nesse método, a taxa transferência de calor do fluido quente para o fluido frio no radiador é expressa como:

$$\dot{Q} = \epsilon C_{\min} (T_{e,q} - T_{e,f}) = \epsilon C_{\min} \Delta T_{\max} \quad (3.8)$$

onde ϵ é a efetividade do radiador, C_{\min} é o valor mínimo entre C_q e C_f , $\Delta T_{\max} = (T_{e,q} - T_{e,f})$ é a diferença das temperaturas de entrada dos fluidos.

Eficiência térmica é uma medida do desempenho térmico de um trocador de calor e é definida para um dado trocador com arranjo de fluxo qualquer como a razão entre a taxa de

transferência de calor efetiva (\dot{Q}) do fluido quente para o fluido frio e a máxima transferência de calor possível, termodinamicamente permitida (\dot{Q}_{max}):

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (3.9)$$

onde o \dot{Q} é dado pelo balanço energia no trocador de calor:

$$\dot{Q} = C_q (T_{e,q} - T_{s,q}) = C_f (T_{e,f} - T_{s,f}) \quad (3.10)$$

onde:

$$C_q = \dot{m}_q c_{p,q} \quad (3.11)$$

e

$$C_f = \dot{m}_f c_{p,f} \quad (3.12)$$

onde C_q e C_f são as taxas de capacidade de calor do fluido quente e do fluido frio, respectivamente.

A máxima taxa de transferência de calor, \dot{Q}_{max} , ocorre em um trocador em contracorrente com comprimento infinito, condições em que o fluido de menor capacidade térmica (C_{min}) sofre uma variação de temperatura equivalente à diferença de temperatura máxima no trocador.

$$\Delta T_{max} = T_{e,q} - T_{e,f} \quad (3.13)$$

Assim:

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} (T_{e,q} - T_{e,f}) \quad (3.14)$$

A eficiência térmica de trocador de calor é adimensional e, geralmente, é dependente do número de unidades de transferência, NUT, a razão da taxa de capacidade de calor, C^* , e o arranjo do escoamento para um trocador de calor tipo transferência direta.

O C^* é a razão entre a menor e a maior taxa de capacidade de calor dos dois fluxos, então $C^* < 1$.

$$C^* = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{(\dot{m}c_p)_{\min}}{(\dot{m}c_p)_{\max}} \quad (3.15)$$

O número de unidades de transferência NUT é definido como uma razão entre a condutividade térmica global e menor taxa de capacidade de calor:

$$NUT = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (3.16)$$

NUT designa o tamanho da transferência de calor adimensional ou o tamanho térmico do trocador adimensional. Embora, o NUT não indica, necessariamente, o tamanho físico do trocador de calor, ou seja, um valor elevado de NUT não significa que um trocador de calor é grande em tamanho físico. (SHAH, 2003)

A expressão para calcular a efetividade depende do arranjo do fluxo. Para arranjo de fluxo cruzado não misturados, que é o caso dos radiadores, tem-se (HESSELGREAVES, 2001; INCROPERA, 2003):

$$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\exp(-NUT^{0,78}C^*) - 1 \right) \frac{NUT^{0,22}}{C^*} \right] \quad (3.17)$$

3.6 Procedimento

A bancada experimental é colocada em operação da seguinte forma:

1. São ativados os controladores e o sistema de aquisição, para que se garanta o monitoramento de todos os parâmetros de medidas e controle.
2. É feito o ajuste da temperatura do banho térmico de acordo com a temperatura de entrada do fluido que se deseja trabalhar.
3. Acionam-se as máquinas de fluxo: bomba do circuito de fluido quente e o ventilador do túnel.
4. São ajustadas as vazões do líquido e do ar
5. Acionamento da resistência do banho térmico

Nos experimentos realizados, optou-se por trabalhar com o circuito de ar aberto, pela maior facilidade de se obter um regime permanente, embora algumas dificuldades como controle da temperatura de entrada do ar, foram encontrados durante o experimento com o regime permanente estabelecido, os dados foram coletados, que é o ponto em que o sistema encontra-se em operação estável, sem apresentar variações temporais de propriedades. Essa condição é estimada em função das variações de cada parâmetro do sistema, tais como sensores de temperatura, pressão e vazão mássica no intervalo de tempo do ensaio. As oscilações das variáveis podem ser observadas na plataforma do Labview, onde é realizado o monitoramento do sistema.

Na sequência, são apresentadas as condições de operação controláveis, bem como as condições de operação não controláveis. Estas últimas eram, em si, parte dos resultados dos ensaios das amostras no interior do radiador no túnel de vento.

3.7 Condições de ensaio

Após a calibração de toda instrumentação, foram realizados os testes, primeiramente, com o fluido base utilizado para a fabricação dos nanofluidos, no caso uma mistura de água/etileno-glicol (70/30%) e, posteriormente, foram realizados testes com nanofluidos com duas concentrações diferentes, com concentrações de 0,02% em vol. e 0,06% em vol.

A operação da microbomba foi realizada de maneira a se operar com vazões do líquido na faixa entre 0,03 kg/s a 0,065 kg/s. Os testes foram realizados com duas vazões de ar diferentes, de modo que todos os cinco bocais se encontravam abertos e as frequências do

ventilador utilizadas foram de 30 Hz e 70 Hz, proporcionando uma vazão mássica de ar de 0,8 kg/s e 1,6 kg/s, respectivamente. A princípio foram realizados ensaios com temperatura de entrada do fluido a 95 °C. Porém, como o nanofluido com concentração de 0,02% vol. apresentou deposição de nanopartículas no sistema, como mencionados anteriormente, os testes realizados com nanofluidos de 0,06% foram efetivados com temperaturas inferiores, no caso de 60 °C e 80°C. Na Tab. 3.2 são mostradas as condições em que a bancada foi operada durante a realização de todos os ensaios.

Tabela 3.2 - Condições de operação da bancada

| Amostra | \dot{m}_{ar} (kg/s) | \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{e,liq}$ (°C) |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|------------------|
| Água-EG | | 0,030 | |
| | 0,8 | 0,043 | 60 |
| | 1,6 | 0,054 | 80 |
| | | 0,066 | 95 |
| Água-EG/Prata φ=0,02% | | 0,03 | |
| | 0,8 | 0,043 | |
| | 1,6 | 0,054 | 95 |
| | | 0,066 | |
| Água-EG/Prata φ=0,06% | | 0,030 | |
| | 0,8 | 0,043 | 60 |
| | 1,6 | 0,054 | 80 |
| | | 0,066 | |

Foram realizados 4 ensaios com cada condição de operação, quantidade mínima de ensaios requerida pela norma ASHRAE 33 (1978), de maneira que, nem sempre era possível a repetição exata dos experimentos, uma vez que o sistema possui variáveis de entrada de difícil controle, tais como, umidade relativa e temperatura de bulbo úmido, conseguindo apenas observar a tendência dos resultados finais. Em meio as dificuldades, ainda assim foi possível encontrar semelhanças nas repetições.

Os testes foram realizados de forma aleatória com relação às vazões dos fluidos, porém não aleatórios em relação aos fluidos. Primeiramente, os ensaios foram realizados com o fluido base em todas as condições de testes referentes à vazão de ar e de líquido e temperaturas de entrada do líquido. Em seguida foram realizados os mesmos ensaios utilizando o nanofluido. A bateria de testes para cada fluido, variando as vazões do líquido e do ar, com as devidas repetições, duraram cerca 5 dias, dificultando a obtenção de condições idênticas do ar ambiente.

As mangueiras utilizadas no sistema do líquido foram substituídas a cada troca de nanofluido, uma vez que foram observadas deposições de nanopartículas na mesma, como pode ser verificado na Fig. 3.26.

Por meio dos quatro ensaios realizados para cada amostra foram selecionados os ensaios, nos quais os parâmetros de entrada do ar estavam mais próximos, para que fosse possível realizar às devidas comparações entre as amostras.



Figura 3.26 – Mangueira após teste com nanofluido.

3.8 Preparação dos Nanofluidos de Prata/Água-Etileno Glicol

Foram preparadas três amostras, uma de mistura de água e etileno glicol (denominado de fluido base) e duas de nanofluidos com diferentes concentrações, a primeira com uma concentração volumétrica de 0,02% e a outra de 0,06%. As nanopartículas de prata utilizadas, com tamanho médio de 10 nm, foram adquiridas da Nanostructured & Amorphous Materials

Inc. O fluido base foi uma mistura de água destilada (70% em volume) e de etileno glicol (30% em volume). Foram preparados cinco litros de cada amostra, sendo suficiente para os ensaios.

A quantidade de nanopartículas a ser acrescentada ao fluido base foi estimada pela Eq. (3.18). De posse dos resultados, é então adicionado 10% do valor encontrado, considerando as perdas durante o processo de sintetização dos nanofluidos. Tal valor, foi estimado levando-se em consideração as diversas preparações de amostras e devidas verificações da real concentração de nanofluidos após a preparação do homogeneizador de alta pressão.

$$m_{np} = \frac{\phi_{vc} V_{fb} \rho_{np}}{(1 - \phi_{vc})} \quad (3.18)$$

Onde ϕ_{vc} é a concentração volumétrica do nanofluido, V o volume, m a massa e ρ é a massa específica, sendo os subscritos np referente às nanopartículas, fb ao fluido base.

A quantidade de nanopartículas foram separadas em bêqueres e as massas foram medidas com uma balança de precisão (0,001 g), Toledo do Brasil Indústria de Balanças Ltda, onde foi feita a tara da balança utilizando os bêqueres em que as nanopartículas foram colocadas. E o fluido base foi adicionado em frascos de vidro.

Os nanofluidos foram sintetizados por intermédio do processo de homogeneização a alta pressão, que teve seu funcionamento explicado na seção 2.2.2.

O procedimento experimental utilizado no preparo das amostras de nanofluidos consiste nas seguintes etapas:

1. Cálculos da quantidade de nanopartículas necessária para a preparação do nanofluido para as concentrações volumétricas desejada (0,02% e 0,06%) para um total de cinco litros;
2. Medir a massa das nanopartículas e preparação da mistura usada como o fluido de base.
3. O fluido base é colocado no reservatório do homogeneizador de alta pressão e com o equipamento em funcionamento a uma pressão de 200 bar as nanopartículas são adicionadas em pequenas quantidades. A mistura é

recirculada no homogeneizador até que se obtenha uma mistura visualmente homogênea. O processo dura cerca de 7 horas.

Após a produção dos nanofluidos, três amostras com quantidades diferentes em volume foram pesadas e colocadas para secar, até que a evaporação de todo o líquido ocorresse, e assim, foi medida a massa das nanopartículas secas e feito o cálculo de concentração final das amostras.

$$\phi_{vc} = \frac{V_{np}}{V_{fb} + V_{np}} = \frac{m_{np} / \rho_{np}}{(m_{fb} / \rho_{fb}) + (m_{np} / \rho_{np})} \quad (3.19)$$

Onde ϕ_{vc} é a concentração volumétrica do nanofluido, V o volume, m a massa e ρ é a massa específica, sendo os subscritos np referente às nanopartículas, fb ao fluido base.



Figura 3.27 – Homogeneizador de alta pressão



Figura 3.28 – Nanopartículas pesadas



Figura 3.29 – Balança de precisão



Figura 3.30 – Preparação do nanofluido

3.9 Análise de incerteza

Os cálculos de incerteza dos parâmetros secundários foram realizados diretamente pelo software EES (Engineering Equation Solver), no qual utiliza o método de Kline e McClintock, apud (MOFFAT,1988), assim, sendo y um parâmetro secundário dependente de $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, assim:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.20)$$

Sendo,

$$y = y_m \pm \delta y \quad (3.21)$$

e, se cada um dos parâmetros x_i , for escrito como:

$$x_i = x_{mi} \pm \delta x_i \quad (3.22)$$

Onde, x_{mi} é o valor médio de x_i e δx_i é a incerteza de sua medida, portanto a incerteza do parâmetro y é dada por:

$$\delta y = \sqrt{[(Sx_1)(\delta x_1)]^2 + [(Sx_2)(\delta x_2)]^2 + [(Sx_3)(\delta x_3)]^2 + \dots + [(Sx_n)(\delta x_n)]^2} \quad (3.23)$$

Onde, Sx_i , é a denominada sensibilidade de y com relação à média x_i denominada por:

$$Sx_i = \frac{\delta y}{\delta x_i} \quad (3.24)$$

As incertezas das variáveis medidas são apresentadas na Tab. 3.3, e as incertezas calculadas para o parâmetro secundário na Tab. 3.4, Ressaltando que o intervalo de confiança adotado nas variáveis independentes foi de 95%, sendo considerado este valor nas incertezas dos resultados.

Tabela 3.3 – Incertezas dos parâmetros medidos

| Parâmetro | Instrumento | Faixa de medição | Incerteza |
|---------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| $T_{ar}(n)$ | Termopar tipo T | -200 a 350 °C | $\pm 0,1$ °C |
| $T_{e,liq}$ e $T_{s,liq}$ | PT100 | -200 a 500 °C | $\pm 0,12$ °C |
| \dot{m} | Medidor de vazão tipo coriolis | 1,7 a 83,3 g/s | $\pm 0,5$ g/s |
| T_{BU} | Termo higrômetro | -21,6 a 50 °C | ± 1 °C |
| RH | Termo higrômetro | 5 a 95% | $\pm 5\%$ |
| ΔP | Perda de pressão | 0 a 510 mm c.a | $\pm 0,4$ mm c.a |

Tabela 3.4 – Incerteza parâmetros secundários

| Parâmetro | Incerteza \dot{m}_{liq} |
|-----------------|---------------------------|
| \dot{Q}_{ar} | 0,24 kW |
| \dot{Q}_{liq} | 0,12 kW |
| \dot{Q}_{med} | 0,12 kW |
| UA | 1,4 W/K |

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCURSÕES

Neste capítulo são relatados o comportamento dos nanofluidos após a dispersão, bem como desempenho térmico dos nanofluidos, comparando os resultados com aqueles obtidos para o fluido base.

4.1 Comportamento dos nanofluidos durante os ensaios

Com o objetivo de analisar a estabilidade e homogeneidade das amostras, foram reservados dois volumes das amostras com concentrações volumétricas de 0,02% e 0,06%. Ambas amostras mostraram-se visualmente homogêneas e estáveis por período de tempo superior que um mês. Vale ressaltar que as amostras com concentrações de 0,02% vol. e 0,06% vol. foram preparadas, respectivamente, em novembro de 2014 e em janeiro de 2015. Porém, a estabilidade observada nas amostras que não foram submetidas à agitação, não foi a mesma para as amostras utilizadas no radiador e submetidas a altas temperaturas, levando a acreditar que temperaturas elevadas influenciam na estabilidade do nanofluidos.

Após a utilização das amostras de nanofluidos no radiador, sob uma temperatura de entrada de 95 °C, observou-se que as nanopartículas ficaram retidas no circuito do escoamento de líquido. Ao retirar o nanofluido do circuito do escoamento de líquido, o mesmo apresentou visualmente menor concentração, o que demonstra que nanopartículas permaneceram no interior da bancada. Além disso, observou-se que realmente, havia nanopartículas no interior do circuito, sendo necessária uma limpeza deste circuito, por meio

de ar comprimido. A Fig. 4.1 mostra o nanofluido com concentração de 0,02% vol. antes e após os testes realizados a 95 °C.

Após observar o comportamento do nanofluido a 95 °C foram realizados experimentos com temperaturas inferiores para avaliar se tal fato iria se repetir. Quando os testes foram realizados nas temperaturas de 60 °C e 80 °C, o nanofluido permaneceu visualmente homogêneo e estável. Um acúmulo de nanopartículas foi observado na superfície do reservatório, conforme Fig. 4.2.



(a) Nanofluido antes dos ensaios (b) Nanofluido após os ensaios

Figura 4.1 - Nanofluidos com concentração de 0,02%.



(a) Nanofluido no final do dia de ensaio (b) Nanofluido no dia anterior aos testes.

Figura 4.2 – Nanofluidos com concentração de 0,06% durante os testes.

4.2 Calor específico

Os valores do calor específico dos nanofluidos foram estimados por meio da Eq. (4.1), cuja validade foi comprovada experimentalmente por Barbés *et al.* (2012), conforme Fig. 4.3

$$c_{p,nf} = \frac{(1-\phi)\rho_{fb}c_{p,fb} + \phi\rho_{np}c_{p,np}}{\rho_{nf}} \quad (4.1)$$

Na Fig. 4.4 são apresentadas as curvas dos valores do calor específico para as três amostras utilizadas nos ensaios. Os valores das propriedades do líquido e das nanopartículas utilizados nos cálculos, foram obtidas no EES (*Engineering Equation Solver*) em função da temperatura. Conforme pode ser observado nesta figura, o calor específico dos nanofluidos e do fluido base aumentou com a temperatura, sendo que, as curvas do calor específico dos nanofluidos e fluido base são paralelas. Além disso, a diferença entre o calor específico do fluido base e do nanofluido não é tão grande, visto que a concentração volumétrica dos nanofluidos é baixa.

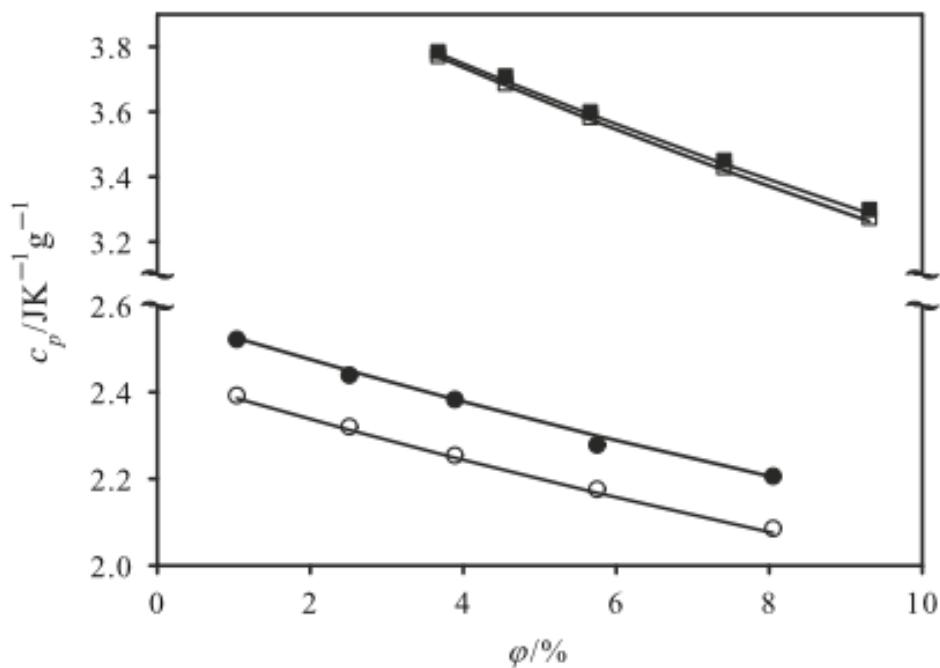


Figura 4.3 – Dados experimentais de Barbés *et al.* (2012) comparados com a Eq. (4.1)

Na Fig. 4.4 são apresentadas as curvas dos valores do calor específico para as três amostras utilizadas nos ensaios. Os valores das propriedades do líquido e das nanopartículas utilizados nos cálculos, foram obtidas no EES (*Engineering Equation Solver*) em função da temperatura. Conforme pode ser observado nesta figura, o calor específico dos nanofluidos e do fluido base aumentou com a temperatura, sendo que, as curvas do calor específico dos nanofluidos e fluido base são paralelas. Além disso, a diferença entre o calor específico do fluido base e do nanofluido não é tão grande, visto que a concentração volumétrica dos nanofluidos é baixa.

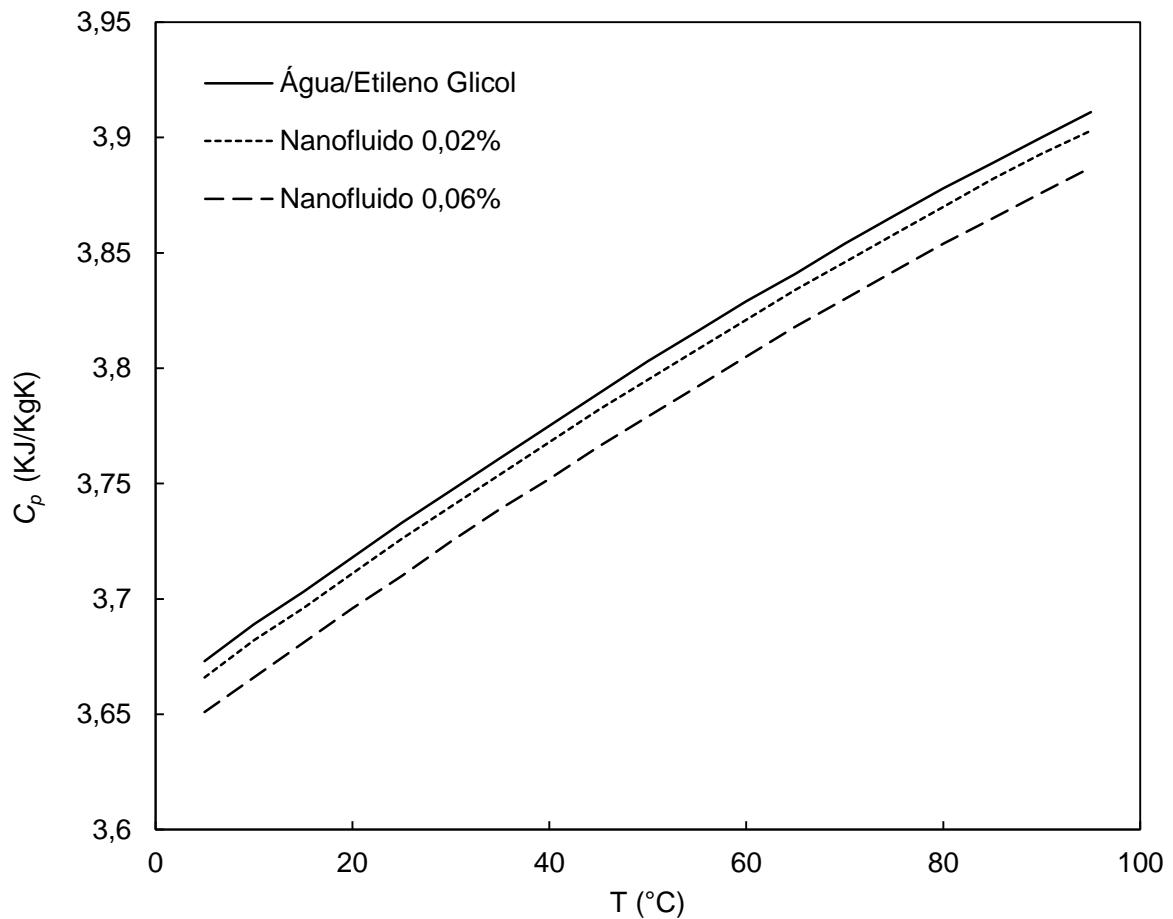


Figura 4.4 – Comportamento do calor específico do fluido base e dos nanofluidos.

4.3 Coeficiente global de transferência de calor

A seguir são apresentados os resultados, comparando os coeficientes global de transferência de calor utilizando o fluido base e nanofluido em função da vazão mássica do líquido.

Os resultados obtidos e selecionados para comparação e utilizados para plotar os gráficos, são apresentados nas Tabs. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

Tabela 4.1 – Resultados operando a $T_{e, liq} = 60$ °C e $\dot{m}_{ar} = 0,8$ kg/s.

| AGUA/ETILENO GLICOL | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------|
| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
| 0,030 | 16,9 | 18,1 | 43,34 | 55,8 | 48,2 | 23,92 | 25,82 | 59,92 | 47,93 | 11,99 | 1,898 | 50,49 | 1,523 | 1,38 | 1,45 | 0,097 |
| 0,043 | 17,6 | 19,6 | 42,94 | 55,2 | 44,5 | 25,14 | 27,62 | 60,01 | 49,54 | 10,47 | 2,485 | 65,41 | 1,981 | 1,71 | 1,85 | 0,148 |
| 0,054 | 17,6 | 19,4 | 43,09 | 52,4 | 43,2 | 25,09 | 28,04 | 60,15 | 50,02 | 10,13 | 2,947 | 78,11 | 2,352 | 2,08 | 2,22 | 0,123 |
| 0,066 | 17,8 | 18,4 | 43,23 | 55 | 45,7 | 24,15 | 27,62 | 59,9 | 49,73 | 10,17 | 3,473 | 92,54 | 2,779 | 2,55 | 2,67 | 0,085 |

| NANOFLUIDO PRATA/AGUA-ETILENO GLICOL ($\phi = 0,06$ %) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------|
| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
| 0,030 | 19 | 19,6 | 43,21 | 57,1 | 51,6 | 25,06 | 26,22 | 59,94 | 52,66 | 7,279 | 1,158 | 28,96 | 0,93 | 0,84 | 0,89 | 0,097 |
| 0,043 | 18,6 | 19,5 | 43,31 | 54,8 | 47,6 | 25,12 | 26,81 | 59,99 | 52,08 | 7,904 | 1,689 | 44,18 | 1,35 | 1,29 | 1,32 | 0,046 |
| 0,054 | 17,9 | 19,1 | 43,12 | 49,6 | 41,8 | 25,12 | 27,42 | 60 | 51,83 | 8,178 | 2,298 | 59,49 | 1,84 | 1,68 | 1,76 | 0,088 |
| 0,066 | 18,5 | 19,8 | 43,33 | 54,4 | 45,4 | 25,16 | 28,05 | 60,01 | 51,23 | 8,779 | 2,893 | 78,17 | 2,32 | 2,20 | 2,26 | 0,050 |

Tabela 4.2 - Resultados operando a $T_{e, liq} = 80$ °C e $\dot{m}_{ar} = 0,8$ kg/s.

| ÁGUA/ETILENO GLICOL | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------|
| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
| 0,03 | 17,5 | 19,6 | 43,27 | 56,4 | 44,2 | 23,85 | 26,56 | 79,98 | 65,28 | 14,7 | 2,707 | 41,34 | 2,17 | 1,73 | 1,95 | 0,226 |
| 0,043 | 19,5 | 21 | 42,88 | 55,2 | 42,3 | 26,02 | 29,7 | 80,07 | 65,34 | 14,72 | 3,681 | 60,08 | 2,93 | 2,43 | 2,68 | 0,186 |
| 0,054 | 20,8 | 21,7 | 43,17 | 64,9 | 46,8 | 25,84 | 30,56 | 80,05 | 64,87 | 15,18 | 4,716 | 78,59 | 3,77 | 3,16 | 3,46 | 0,178 |
| 0,066 | 18,8 | 20,6 | 43,09 | 54 | 40,3 | 25,43 | 31,13 | 79,92 | 64,54 | 15,38 | 5,702 | 96,42 | 4,54 | 3,90 | 4,22 | 0,152 |

Continua na próxima página

NANOFLUIDO PRATA/ÁGUA-ETILENO GLICOL ($\phi = 0,06 \%$)

| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| 0,03 | 17,4 | 18,6 | 43,18 | 53,2 | 44,6 | 23,81 | 25,76 | 80,01 | 68,62 | 11,39 | 1,943 | 29,28 | 1,56 | 1,33 | 1,45 | 0,154 |
| 0,043 | 19,2 | 20,8 | 42,56 | 50,6 | 40,1 | 26,3 | 29,13 | 80,04 | 68,42 | 11,61 | 2,831 | 44,91 | 2,24 | 1,92 | 2,08 | 0,155 |
| 0,054 | 18,8 | 20,8 | 42,92 | 52,2 | 39,1 | 25,9 | 29,61 | 80,06 | 67,7 | 12,36 | 3,709 | 60,06 | 2,95 | 2,57 | 2,76 | 0,138 |
| 0,066 | 20,3 | 21,9 | 42,95 | 66 | 48,8 | 25,28 | 30,02 | 80,07 | 67,32 | 12,76 | 4,742 | 76,48 | 3,78 | 3,24 | 3,51 | 0,155 |

Tabela 4.3 - Resultados operando a $T_{e, liq} = 60$ °C e $\dot{m}_{ar} = 1,6$ kg/s.

ÁGUA/ETILENO GLICOL

| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| 0,03 | 19,8 | 20 | 194,5 | 51,8 | 48,4 | 26,79 | 27,51 | 59,94 | 52,28 | 7,663 | 0,72 | 36,81 | 1,24 | 0,89 | 1,06 | 0,330 |
| 0,043 | 20,6 | 21,2 | 195 | 60 | 56,5 | 26,32 | 27,33 | 60,1 | 51,67 | 8,428 | 1,01 | 53,74 | 1,73 | 1,38 | 1,55 | 0,226 |
| 0,054 | 19,9 | 21 | 194,2 | 58,7 | 54,8 | 26,31 | 27,64 | 59,93 | 51,06 | 8,865 | 1,33 | 72,05 | 2,27 | 1,82 | 2,04 | 0,217 |
| 0,066 | 19,9 | 20,4 | 192,9 | 50,2 | 45,1 | 27,62 | 29,23 | 60,04 | 51,08 | 8,957 | 1,61 | 92,33 | 2,73 | 2,25 | 2,49 | 0,193 |

NANOFLUIDO PRATA/ÁGUA-ETILENO GLICOL ($\phi = 0,06 \%$)

| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| 0,03 | 21,8 | 21,9 | 196,6 | 68 | 61,8 | 26,83 | 27,49 | 59,94 | 51,94 | 8,002 | 0,6661 | 36,13 | 1,15 | 0,92 | 1,03 | 0,217 |
| 0,043 | 22,6 | 22,8 | 199,5 | 76,2 | 69,6 | 26,53 | 27,45 | 59,92 | 51,96 | 7,961 | 0,918 | 50,09 | 1,59 | 1,29 | 1,44 | 0,209 |
| 0,054 | 21,7 | 22,4 | 195,1 | 69,1 | 62,4 | 26,4 | 27,59 | 60,03 | 51,69 | 8,335 | 1,191 | 65,33 | 2,04 | 1,71 | 1,88 | 0,177 |
| 0,066 | 19 | 19,6 | 193,6 | 40,7 | 36,8 | 28,32 | 29,66 | 59,94 | 51,83 | 8,119 | 1,341 | 80,59 | 2,27 | 2,04 | 2,16 | 0,107 |

Tabela 4.4 - Resultados operando a $T_{e, liq} = 80^\circ\text{C}$ e $\dot{m}_{ar} = 1,6 \text{ kg/s}$

| ÁGUA/ETILENO GLICOL | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------|
| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
| 0,030 | 20,7 | 21,4 | 193,2 | 48,2 | 42 | 28,51 | 29,85 | 79,97 | 65,83 | 14,14 | 1,34 | 45,27 | 2,27 | 1,66 | 1,97 | 0,314 |
| 0,043 | 20,4 | 21,1 | 193,3 | 49,3 | 42,2 | 27,99 | 29,8 | 80 | 65,56 | 14,44 | 1,82 | 62,69 | 3,08 | 2,39 | 2,73 | 0,253 |
| 0,054 | 20,1 | 21,2 | 193,1 | 46 | 39,7 | 28,37 | 30,7 | 79,93 | 65,11 | 14,82 | 2,33 | 82,23 | 3,94 | 3,08 | 3,51 | 0,246 |
| 0,066 | 20,6 | 21,5 | 195,6 | 60,4 | 50,5 | 26,29 | 29,19 | 79,98 | 64,38 | 15,6 | 2,91 | 101,3 | 4,98 | 3,96 | 4,47 | 0,228 |

| NANOFLUIDO PRATA/ÁGUA-ETILENO GLICOL ($\phi = 0,06 \text{ \%}$) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------|
| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
| 0,030 | 20,6 | 21,2 | 194,4 | 51,1 | 46,5 | 27,79 | 28,92 | 79,97 | 67,49 | 12,48 | 1,127 | 32,45 | 1,92 | 1,46 | 1,69 | 0,271 |
| 0,043 | 20,6 | 21,5 | 193,6 | 50 | 43,6 | 28,22 | 29,76 | 79,99 | 67,55 | 12,44 | 1,54 | 46,16 | 2,62 | 2,05 | 2,34 | 0,242 |
| 0,054 | 20,9 | 21,9 | 192,9 | 47,5 | 41,6 | 29,1 | 31,02 | 80 | 67,09 | 12,91 | 1,923 | 62,26 | 3,26 | 2,68 | 2,97 | 0,193 |
| 0,066 | 19,8 | 21,2 | 195,1 | 53,8 | 43,9 | 26,49 | 29,07 | 80,05 | 65,75 | 14,3 | 2,578 | 81,33 | 4,40 | 3,63 | 4,02 | 0,192 |

Tabela 4.5 - Resultados operando a $T_{e, liq} = 96^\circ\text{C}$ e $\dot{m}_{ar} = 0,8 \text{ kg/s}$

| ÁGUA/ETILENO GLICOL | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------|
| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
| 0,031 | 20,5 | 22,9 | 42,97 | 57,1 | 41,7 | 26,7 | 30,79 | 95,99 | 74,92 | 21,08 | 4,09 | 51,67 | 3,26 | 2,56 | 2,91 | 0,243 |
| 0,043 | 20,4 | 22,9 | 42,61 | 56,5 | 40,7 | 26,62 | 32,00 | 96,2 | 75,52 | 20,68 | 5,38 | 68,9 | 4,26 | 3,48 | 3,87 | 0,201 |
| 0,055 | 20,3 | 23 | 42,71 | 52,1 | 36,3 | 26,76 | 33,53 | 96,65 | 75,72 | 20,93 | 6,77 | 88,14 | 5,36 | 4,46 | 4,91 | 0,183 |
| 0,063 | 20,5 | 23,3 | 42,97 | 53,7 | 35,3 | 26,94 | 34,63 | 96,77 | 75,83 | 20,94 | 7,69 | 101,6 | 6,10 | 5,13 | 5,62 | 0,173 |

Continua na próxima página

| NANOFLUIDO PRATA/AGUA-ETILENO GLICOL ($\phi = 0,02 \%$) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
| 0,031 | 23,1 | 24,1 | 42,99 | 72,5 | 63,1 | 26,69 | 30,52 | 95,87 | 75,62 | 20,25 | 3,832 | 48,6 | 3,07 | 2,45 | 2,76 | 0,223 |
| 0,043 | 21,5 | 23,5 | 43,6 | 70,6 | 59,5 | 26,32 | 31,12 | 96,29 | 76,66 | 19,62 | 4,8 | 62,34 | 3,86 | 3,30 | 3,58 | 0,156 |
| 0,055 | 22 | 23,9 | 43,02 | 69,2 | 55,7 | 26,66 | 32,74 | 96,54 | 76,67 | 19,87 | 6,077 | 80,18 | 4,85 | 4,24 | 4,54 | 0,135 |
| 0,063 | 22,3 | 24,2 | 42,62 | 67,9 | 57,1 | 27,02 | 33,99 | 96,64 | 76,8 | 19,84 | 6,97 | 92,73 | 5,53 | 4,86 | 5,19 | 0,130 |

Tabela 4.6 - Resultados operando a $T_{e, liq} = 96$ °C e $\dot{m}_{ar} = 1,6$ kg/s

| AGUA/ETILENO GLICOL | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
| 0,029 | 21,3 | 22,6 | 193,5 | 51,2 | 44,5 | 28,82 | 30,77 | 95,73 | 74,75 | 20,98 | 1,947 | 51,79 | 3,31 | 2,38 | 2,84 | 0,325 |
| 0,039 | 21,4 | 22,8 | 192,8 | 50,7 | 41,3 | 28,91 | 31,37 | 96,23 | 76 | 20,23 | 2,462 | 65,35 | 4,17 | 3,09 | 3,63 | 0,299 |
| 0,053 | 21,1 | 22,4 | 193,2 | 50,4 | 41,2 | 28,6 | 31,79 | 96,62 | 75,98 | 20,65 | 3,19 | 527,6 | 5,45 | 4,22 | 29,36 | 0,171 |
| 0,066 | 21 | 22,7 | 192,3 | 49,5 | 38,4 | 28,73 | 32,69 | 96,78 | 75,75 | 21,03 | 3,954 | 109,5 | 6,68 | 5,39 | 6,03 | 0,214 |

| NANOFLUIDO PRATA/AGUA-ETILENO GLICOL ($\phi = 0,02 \%$) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| \dot{m}_{liq} (kg/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
| 0,029 | 22,7 | 23,1 | 191,7 | 57,8 | 54,3 | 29,16 | 30,51 | 95,65 | 77,08 | 18,57 | 1,349 | 39,1 | 2,283 | 2,103 | 2,19 | 0,082 |
| 0,039 | 23,4 | 24,1 | 192,6 | 65,1 | 55 | 28,8 | 30,58 | 96,22 | 78,08 | 18,15 | 1,775 | 50,63 | 3,016 | 2,762 | 2,89 | 0,088 |
| 0,052 | 22,2 | 23 | 193,3 | 62,5 | 55,2 | 27,95 | 30,41 | 96,57 | 77,78 | 18,79 | 2,456 | 69,59 | 4,177 | 3,84 | 4,01 | 0,084 |
| 0,066 | 21,1 | 23,7 | 193,4 | 56,2 | 41,3 | 27,8 | 31,42 | 96,69 | 75,68 | 21,01 | 3,616 | 102,6 | 6,143 | 17,15 | 5,756 | 0,1344 |

Com exceção de uma determinada condição de ensaio, que apresentou um incremento de 4,9% no coeficiente global de transferência de calor em relação ao fluido base, os demais resultados apresentaram um menor coeficiente global de transferência de calor com relação ao fluido base, conforme pode ser visto nas Figs. 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, chegando a uma redução de 44,1%.

Este fato deve ser notado com certo cuidado, pois, para uma mesma vazão mássica, o número de Reynolds do nanofluido é menor do que o número de Reynolds do fluido base, uma vez que os nanofluidos possuem uma viscosidade superior conforme constado por Namburu *et al.* (2007) e Yiamsawas *et al.* (2013). Os efeitos advectivos são reduzidos no escoamento de nanofluidos em relação ao escoamento do fluido base, para uma mesma vazão mássica. Portanto, ainda que os resultados no coeficiente global de transferência de calor tenham sido menores no nanofluido em relação ao fluido base para uma mesma vazão mássica, tais resultados podem ser diferentes se a comparação fosse realizada em função do número de Reynolds.

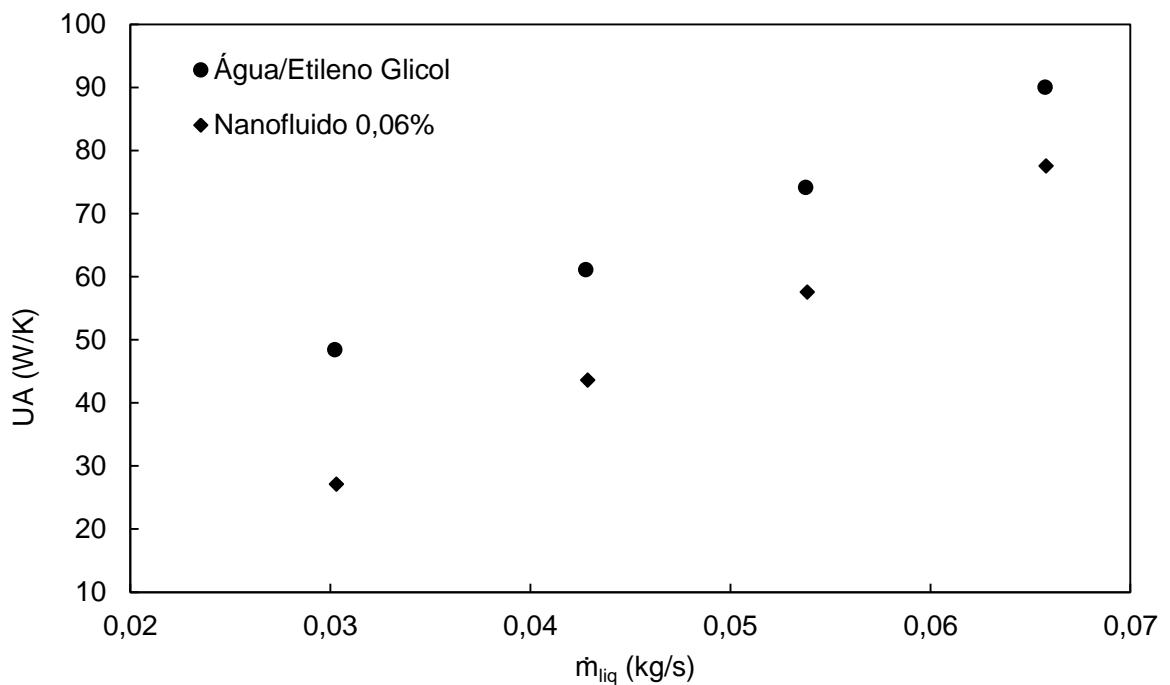


Figura 4.5 – Comparação dos resultados do coeficiente global de transferência de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=60$ °C e $\dot{m}_{ar}=0,8$ kg/s.

Para os ensaios realizados com vazão mássica de 0,8 kg/s, utilizando o nanofluido com concentração de 0,06%, Figs. 4.4 e 4.5, a redução do coeficiente global em relação ao fluido base diminui à medida que a vazão mássica do líquido aumenta. Quando opera a uma

temperatura de entrada do líquido de 60 °C, a variação mínima foi de 13,9% e a variação máxima de 44,1% para vazões mássicas do líquido a 0,066 kg/s e a 0,03 kg/s, respectivamente. Para 80 °C, a variação mínima foi de 20,8% e a variação máxima de 26,2%, para vazões mássicas do líquido a 0,066 kg/s, e a 0,03 kg/s, respectivamente.

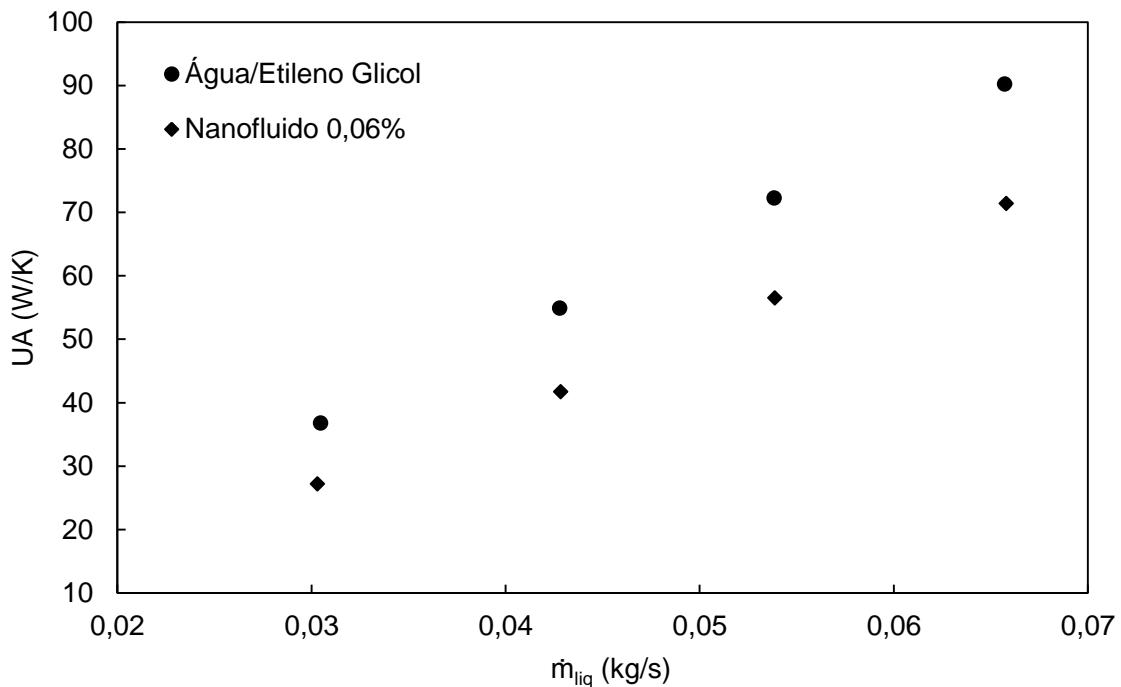


Figura 4.6 - Comparaçāo dos resultados do coeficiente global de transferência de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=80$ °C e $\dot{m}_{ar}=0,8$ kg/s.

Os resultados dos ensaios para a vazão mássica do ar de 1,6 kg/s, tanto para temperatura de entrado do líquido de 60 °C, Fig. 4.6, e para 80 °C, Fig. 4.7, o coeficiente global de transferência de calor do nanofluido se aproxima ao do fluido base, comparado com os ensaios efetuados com as mesmas temperaturas, porém, com vazão mássica do ar de 0,8 kg/s. Para o caso de 60 °C, houve um incremento de 4,9 % em relação ao fluido base, quando operando uma vazão mássica do líquido a 0,03 kg/s, entretanto, para as demais vazões mássicas do líquido, houve redução do coeficiente global de transferência de calor, sendo que esse decréscimo aumenta com a vazão mássica do líquido, chegando a uma redução de 8,3 % para vazão mássica do líquido a 0,066 kg/s, contrário ao mencionado anteriormente para a mesma temperatura de entrada do líquido e vazão mássica do ar de 0,8 kg/s. Para a temperatura de entrada do líquido de 80 °C e vazão mássica do ar de 1,6 kg/s, a redução do coeficiente global de transferência de calor com relação ao fluido base segue a mesma tendência ao testes com vazão mássica do ar de 0,8 kg/s, diminui com o aumento da vazão

mássica do líquido, apresentando uma redução mínima de 9,7% e máxima de 15%, para vazões mássicas do líquido a 0,066 kg/s e a 0,03 kg/s e, respectivamente.

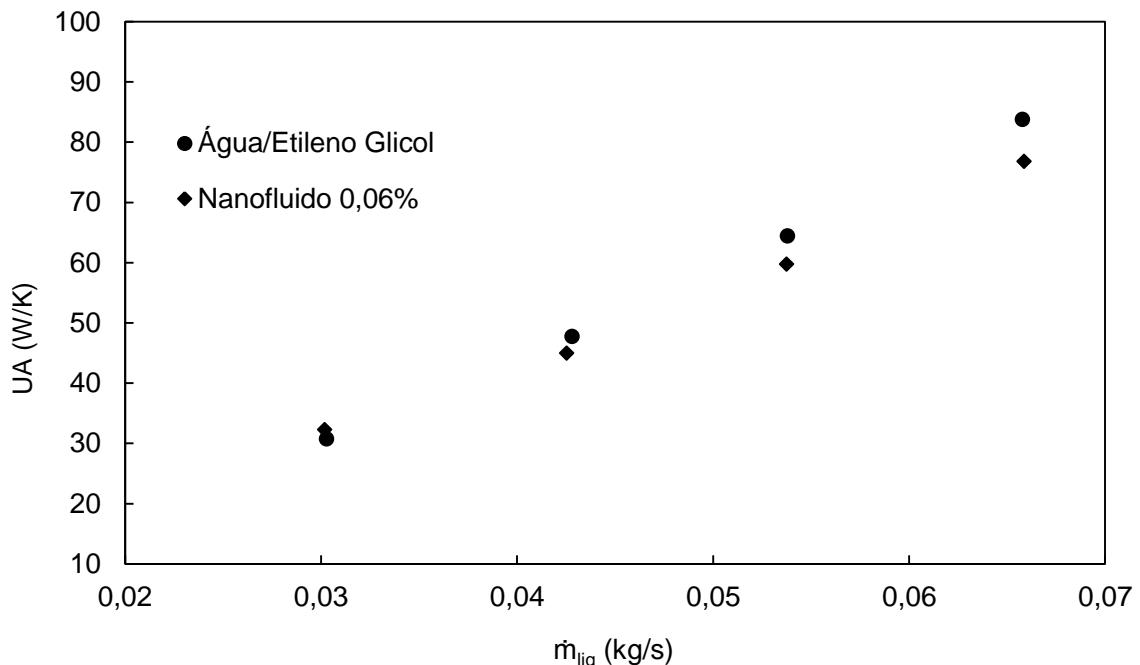


Figura 4.7 - Comparação dos resultados do coeficiente global de transferência de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=60$ °C e $\dot{m}_{ar}=1,6$ kg/s.

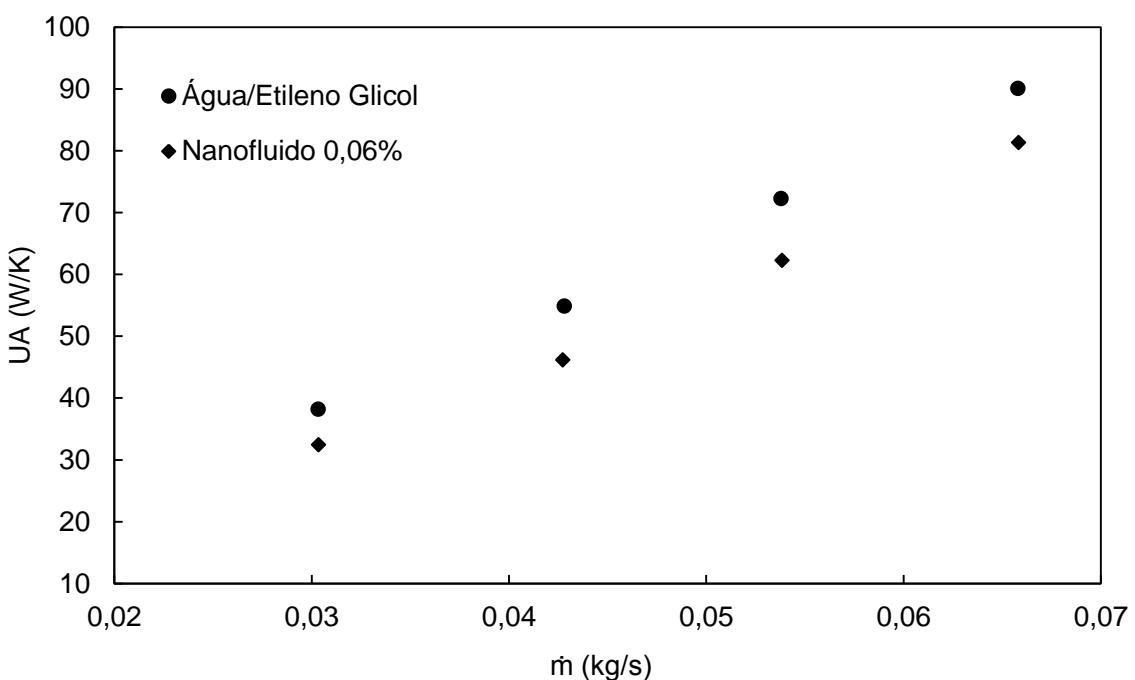


Figura 4.8 - Comparação dos resultados do coeficiente global de transferência de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=80$ °C e $\dot{m}_{ar}=1,6$ kg/s.

Para o nanofluido com 0,02% de concentração em volume comparado com o fluido base, o coeficiente global de transferência de calor apresentam valores menores, sendo que esse decréscimo aumentou com a vazão mássica do líquido para os testes realizados com vazão do ar de 0,8 kg/s, Fig. 4.8, apresentando uma variação mínima de 4,8% e máxima de 6,3%, para vazões mássicas do líquido de 0,03 kg/s e de 0,066 kg/s, respectivamente. Entretanto, operando a uma vazão mássica do ar de 1,6 kg/s, Fig. 4.9, essa tendência se inverte, mostrando uma diminuição nessa redução à medida que a vazão mássica aumenta, apresentando uma redução mínima de 1,9% e máxima de 13,3%, para vazões mássicas do líquido de 0,066 kg/s e de 0,03 kg/s, respectivamente.

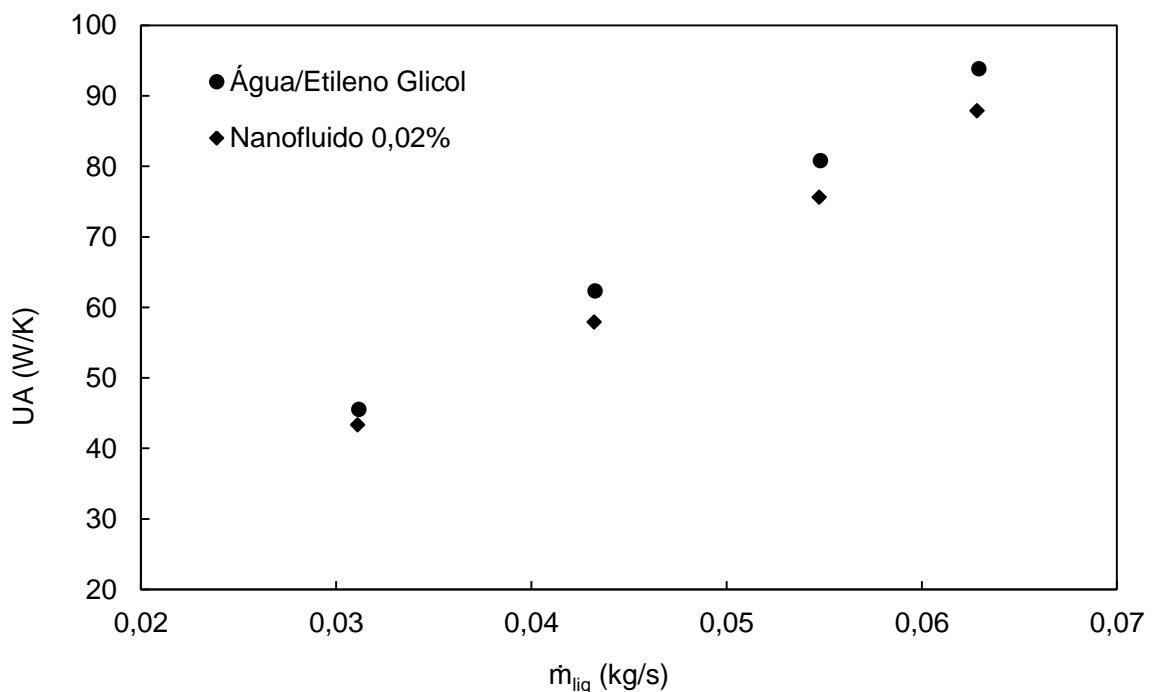


Figura 4.9 - Comparação dos resultados do coeficiente global de transferência de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=96$ °C e $\dot{m}_{ar}=0,8$ kg/s.

Não foi possível realizar uma comparação com relação aos efeitos da concentração de nanopartículas do sistema em questão, uma vez que, para os nanofluidos de concentração distintas não foram ensaiadas nas mesmas condições de operação.

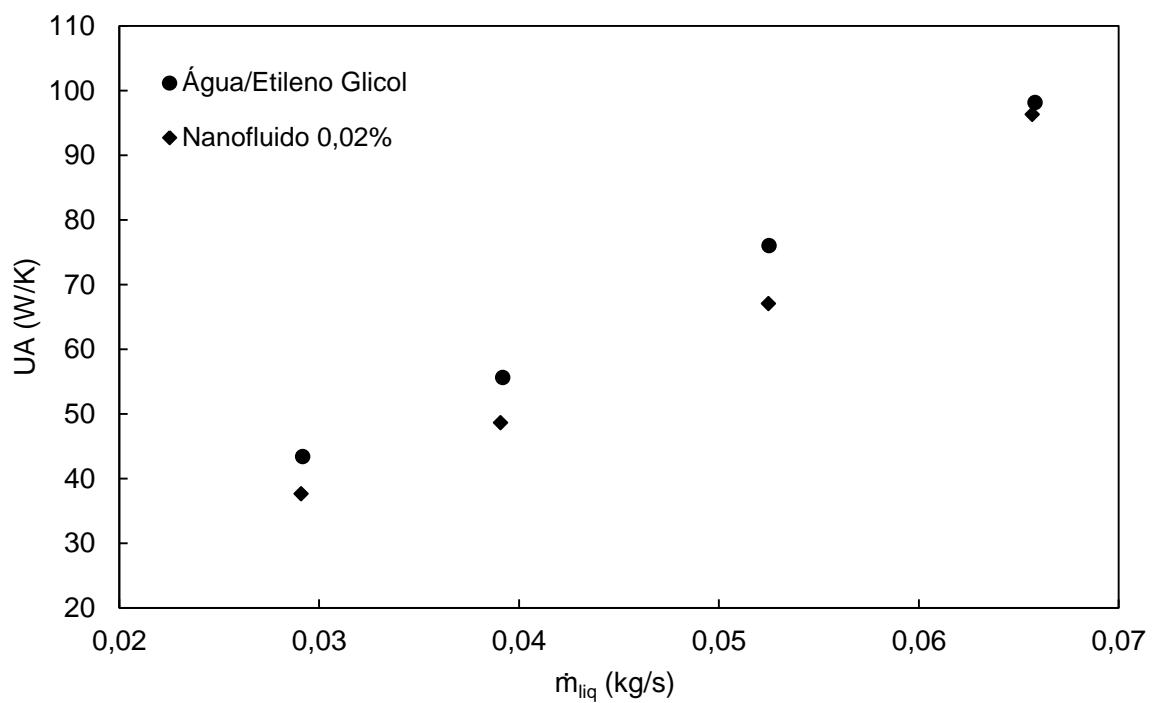


Figura 4.10 - Comparaçāo dos resultados do coeficiente global de transferênciā de calor para amostras do fluido base e do nanofluido (UA x \dot{m}) operando a $T_{e, liq}=96$ °C e $\dot{m}_{ar}=1,6$ kg/s.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Esta dissertação apresentou resultados de ensaios em um radiador automotivo utilizando nanofluidos de prata com duas concentrações diferentes e a comparou com o fluido base puro, sendo este uma mistura de água/etileno glicol (70/30% em volume).

Os nanofluidos foram produzidos em um homogeneizador a alta pressão. Estes se mantiveram visualmente estáveis por 4 meses, para as amostras que não foram utilizadas nos ensaios. A bancada experimental foi adaptada e instrumentada para ensaiar o radiador com o objetivo de avaliar o desempenho térmico dos nanofluidos como fluido refrigerante, por intermédio do coeficiente global de transferência de calor. Quanto às amostras que foram utilizadas no ensaio a 95 °C, houve deposição das nanopartículas no sistema durante a realização dos testes. À temperaturas inferiores a 80 °C as amostras seguiram visualmente estáveis.

Os resultados mostraram que o coeficiente global de transferência de calor, usando nanofluido, foi inferior ao fluido base, quando esses foram comparados para uma mesma vazão mássica, exceto para uma única condição de operação que apresentou um incremento com relação ao fluido base. Porém, essa tendência pode ser invertida, quando comparado com mesmo número de Reynolds. Para maior vazão mássica de ar, os resultados mostraram que o coeficiente global de transferência de calor do nanofluido tende a se aproximar ao do fluido base.

Com relação à tendência dos resultados para diferentes temperaturas de entrada do líquido em função da vazão mássica do líquido, são necessários mais ensaios afim de se obter resultados mais conclusivos. Sendo que, quatro dos seis casos aqui apresentados, o coeficiente global de transferência de calor do nanofluido tende a se aproximar ao do

fluido base com o aumento da vazão mássica do líquido, os outros dois, essa tendência é contraria. Comparações com relação à concentração dos nanofluidos não puderam ser efetivadas devido à falta de ensaios a mesmas condições de operação.

Levando em consideração o aprendizado durante o trabalho, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros a seguir:

- ✓ Estudo do comportamento do nanofluido de prata/água-etileno glicol a alta temperatura, além de outras formas de preparo, como, por exemplo, adição de dispersante, para solucionar o problema de decantação de nanopartículas no sistema quando opera com temperaturas elevadas;
- ✓ Realizar caracterização dos nanofluidos para uma análise de resultados comparando o mesmo número de Reynolds;
- ✓ Realizar experimentos com nanofluidos com diferentes concentrações;
- ✓ Ensaiar outros tipos de radiadores;
- ✓ Análise de desgaste e vida útil da bomba e demais equipamentos.

REFERÊCIAS

ASHRAE Standard 33, (1978), Method of Testing Forced Circulation Air Cooling and Air Heating Coils, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA.

BANDARRA FILHO, E. P. et al. Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system. **Energy Conversion and Management**, v. 84, p. 261–267, 2014

BARBÉS, B. et al. Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of Al₂O₃ nanofluids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 111, n. 2, p. 1615–1625, 2012

BATCHELOR, B. G. K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. **Journal of Fluid Mech.** v. 83, 1977.

BHATTACHARYA, P. Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 95, n. 11, 2004.

BRINKMAN, H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. **The Journal of Chemical Physics**, v. 20, n. 4, p. 571, 1952.

BUONGIORNO, J. et al. A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 106, n. 9, 2009.

CAMPOS, E. R. V. **Modelagem do Uso de Nanofluidos no Sistema de Arrefecimento de Motores a Combustão Interna**, 2009. 97 f. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.

CHEN, H. et al. Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids. **Chemical Physics Letters**, v. 444, n. 4-6, p. 333–337, 2007.

CHO, T. et al. Preparation of nanofluids containing suspended silver particles for enhancing fluid thermal conductivity of fluids.pdf. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 11, n. 3, p. 400–406, 2005.

CHOUGULE, S. S.; SAHU, S. K. Thermal Performance of Automobile Radiator Using Carbon Nanotube-Water Nanofluid—Experimental Study. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, v. 6, n. 4, 2014.

EINSTEIN, A. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. **Annalen der Physik**, v. 236, p. 180–193, 1906.

GLORY, J. et al. Thermal and electrical conductivities of water-based nanofluids prepared with long multiwalled carbon nanotubes. **Journal of Applied Physics**, v. 103, n. 9, 2008.

HAMILTON, R.; CROSSER, O. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. **Industrial & Engineering chemistry**, v. 1, n. 3, p. 187–191, 1962.

HESSELGREAVES, J. E. **Compact Heat Exchangers - Selection, Design and Operation**. New York: Pergamon, 2001.

HONG, T.-K.; YANG, H.-S.; CHOI, C. J. Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 97, n. 6, 2005. 398p.

HUSSEIN, A. M. et al. Experimental measurement of nanofluids thermal properties. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, v. 7, n. 1, p. 850–863, 2013.

HUSSEIN, A. M.; BAKAR, R. A.; KADIRGAMA, K. Study of forced convection nanofluid heat transfer in the automotive cooling system. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 2, p. 50–61, 2014.

HWANG, Y. et al. Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. **Powder Technology**, v. 186, n. 2, p. 145–153, 2008.

INCROPERA, F. P., DeWitt, D. P. **Fundamentals Of Heat And Mass Transfer**, 5. Ed. N.Y., John Wiley & Sons, 2003,

JAIN, S.; PATEL, H. E.; DAS, S. K. Brownian dynamic simulation for the prediction of effective thermal conductivity of nanofluid. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 11, n. 4, p. 767–773, 2009.

JU, Y. S. Experimental Study of Heat Conduction in Aqueous Suspensions of Aluminum Oxide. **Journal of Heat Transfer**. v. 130, p. 1–6, 2008.

KEBLINSKI, P. et al. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v. 45, p. 855–863, 2002.

KHANAFER, K.; VAFAI, K. International Journal of Heat and Mass Transfer A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 19-20, p. 4410–4428, 2011.

KOLE, M.; DEY, T. K. Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 34, n. 6, p. 677–683, 2010.

KOO, J.; KLEINSTREUER, C. A new thermal conductivity model for nanofluids. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 6, n. 6, p. 577–588, 2005.

KUMAR, S. A. et al. Synthesis and characterization of copper nanofluid by a novel one-step method. **Materials Chemistry and Physics**, v. 113, n. 1, p. 57–62, 2009.

LEONG, K. Y. et al. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 17-18, p. 2685–2692, 2010.

MARIANO, A. et al. Thermal conductivity, rheological behaviour and density of non-Newtonian ethylene glycol-based SnO₂ nanofluids. **Fluid Phase Equilibria**, v. 337, p. 119–124, 2013.

MAXWELL, J. A treatise on electricity and magnetism. **University of Oxford**, 1873.

MISHRA, P. C. et al. Application and Future of Nanofluids in Automobiles : An Overview on Current Research. p. 2–5.

MURSHED, S., LEONG, K.; YANG, C. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review. **Applied Thermal Engineering**, 28 (17-18), 2109–2125, 2008.

NAMBURU, P. et al. Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, n. 2, p. 397–402, 2007.

NARAKI, M. et al. Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 66, p. 82–90, 2013.

NGUYEN, C. et al. Viscosity data for Al₂O₃–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 47, n. 2, p. 103–111, 2008.

OLIVEIRA, G. A. **Síntese e Caracterização de Nanofluidos de Prata Síntese e Caracterização de Nanofluidos de Prata**, 2012. 121 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais.

ÖZERİNÇ, S.; KAKAÇ, S.; YAZİCİOĞLU, A. G. Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review. **Microfluidics and Nanofluidics**, v. 8, n. 2, p. 145–170, 4 nov. 2009.

PAK, B. C. Y. I. C. HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE. **Experimental Heat Transfer**, n. October 2012, p. 37–41, 1998.

PASTORIZA-GALLEGOS, M. J. et al. Thermal conductivity and viscosity measurements of ethylene glycol-based Al₂O₃ nanofluids. **Nanoscale research letters**, v. 6, n. 1, p. 221, 2011.

PAZ, A. J.G. **Avaliação experimental da transferência de calor e perda de pressão de nanofluidos de prata escoando no interior de tubos horizontais**. 2014. 161 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PEYGHAMBARZADEH, S. M. et al. Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2011.

PEYGHAMBARZADEH, S. M. et al. Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator. **Applied Thermal Engineering**, v. 52, n. 1, p. 8–16, 2013.

PRASHER, R. et al. Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications. **Applied Physics Letters**, v. 89, n. 13, 2006.

SALEHI, J. M.; HEYHAT, M. M.; RAJABPOUR, A. Enhancement of thermal conductivity of silver nanofluid synthesized by a one-step method with the effect of polyvinylpyrrolidone on thermal behavior. **Applied Physics Letters**, v. 102, n. 23, p. 231907, 2013.

SANJAYA, C. S.; WEE, T.-H.; TAMILSELVAN, T. Regression analysis estimation of thermal conductivity using guarded-hot-plate apparatus. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 10, p. 1566–1575, jul. 2011.

SHAH, R. K. **Fundamentals of heat exchanger design**. New Jersey: Jonh Wiley & Sons, 2003. 972p.

SHALKEVICH, N. et al. On the thermal conductivity of gold nanoparticle colloids. **Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids**, v. 26, n. 2, p. 663–70, 2010.

SHARMA, P. et al. Enhancement of thermal conductivity of ethylene glycol based silver nanofluids. **Powder Technology**, v. 208, n. 1, p. 7–19, 2010.

SUNDAR, L. S. et al. Experimental thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based low volume concentration of Al₂O₃ and CuO nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 41, p. 41–46, 2013a.

SUNDAR, L. S.; SINGH, M. K.; SOUSA, A. C. M. Thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based Fe₃O₄ nanofluid. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 49, p. 17–24, 2013b.

SUNDAR, L.S.; SINGH, M. K.; SOUSA, A. C. M. Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe₃O₄ nanofluid for heat transfer applications. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 44, p. 7–14, 2013c.

VAJJHA, R. S.; DAS, D. K. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, n. 21-22, p. 4675–4682, 2009.

VENERUS, D. C. et al. Viscosity measurements on colloidal dispersions (nanofluids) for heat transfer applications. **Applied Rheology**, v.20, n. 4, 2010.

WANG, X.; XU, X.; S. CHOI, S. U. Thermal Conductivity of Nanoparticle - Fluid Mixture. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, v. 13, n. 4, p. 474–480, 1999.

XIAO, B.; YANG, Y.; CHEN, L. Developing a novel form of thermal conductivity of nanofluids with Brownian motion effect by means of fractal geometry. **Powder Technology**, v. 239, p. 409–414, 2013.

YIAMSAWAS, T. et al. Experimental studies on the viscosity of TiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles suspended in a mixture of ethylene glycol and water for high temperature applications. **Applied Energy**, v. 111, p. 40–45, 2013.

ZOGHBI FILHO, J. R. B. **Avaliação Teórico/Experimental do Desempenho Termo-Hidráulico do Ar em Trocadores de Calor Tipo Serpentina**, 2004, 298 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ANEXO A

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

| ÁGUA/ETILENO GLICOL ($\dot{m}_{ar}=0,8 \text{ kg/s}$; $T_{e,líq}=60 \text{ }^{\circ}\text{C}$) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU,e}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{BU,s}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e,ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s,ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{e,liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s,liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{liq} ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{ar} ($^{\circ}\text{C}$) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | <i>Erro</i> |
| 30,24 | 16,9 | 18,1 | 43,34 | 55,8 | 48,2 | 23,92 | 25,82 | 59,92 | 47,93 | 11,99 | 1,898 | 50,49 | 1,523 | 1,38 | 1,45 | 0,097 |
| 30,34 | 17,8 | 18,7 | 43,2 | 55,3 | 47,7 | 24,1 | 26,05 | 59,99 | 48,21 | 11,78 | 1,952 | 50,92 | 1,565 | 1,36 | 1,46 | 0,138 |
| 30,32 | 18 | 19 | 43,01 | 52,1 | 45,4 | 24,84 | 26,74 | 60,02 | 48,64 | 11,38 | 1,898 | 50,08 | 1,516 | 1,32 | 1,42 | 0,141 |
| 30,32 | 17,5 | 19 | 43,34 | 52,5 | 45,4 | 24,87 | 26,79 | 60,03 | 48,69 | 11,34 | 1,918 | 50,38 | 1,537 | 1,31 | 1,42 | 0,159 |
| 42,78 | 17,6 | 19,6 | 42,94 | 55,2 | 44,5 | 25,14 | 27,62 | 60,01 | 49,54 | 10,47 | 2,485 | 65,41 | 1,981 | 1,71 | 1,85 | 0,148 |
| 42,79 | 18,5 | 19,3 | 43,07 | 51,5 | 44,5 | 25,27 | 27,74 | 60,01 | 49,58 | 10,43 | 2,474 | 65,43 | 1,975 | 1,70 | 1,84 | 0,148 |
| 42,9 | 17,8 | 19 | 43,12 | 52,4 | 44,5 | 24,63 | 27,1 | 60 | 49,61 | 10,4 | 2,463 | 63,82 | 1,969 | 1,70 | 1,84 | 0,146 |
| 42,81 | 18,9 | 20,1 | 43,18 | 61,1 | 51,7 | 25,43 | 28,04 | 60,03 | 49,27 | 10,76 | 2,613 | 69,4 | 2,09 | 1,76 | 1,92 | 0,173 |
| 53,7 | 17,8 | 19,2 | 43,21 | 55,3 | 46,3 | 24,2 | 27,18 | 60,08 | 49,55 | 10,53 | 2,978 | 78,42 | 2,385 | 2,16 | 2,27 | 0,100 |

Continua na próxima página

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| 53,72 | 17,6 | 19,3 | 43 | 54,5 | 46,2 | 24,19 | 27,15 | 60,08 | 49,56 | 10,52 | 2,958 | 77,97 | 2,363 | 2,16 | 2,26 | 0,091 |
| 53,76 | 18,1 | 19,4 | 43,2 | 53,2 | 44,1 | 24,72 | 27,66 | 59,92 | 49,71 | 10,22 | 2,938 | 78,07 | 2,35 | 2,10 | 2,22 | 0,115 |
| 53,78 | 17,6 | 19,4 | 43,09 | 52,4 | 43,2 | 25,09 | 28,04 | 60,15 | 50,02 | 10,13 | 2,947 | 78,11 | 2,352 | 2,08 | 2,22 | 0,123 |
| 65,75 | 17,8 | 18,4 | 43,23 | 55 | 45,7 | 24,15 | 27,62 | 59,9 | 49,73 | 10,17 | 3,473 | 92,54 | 2,779 | 2,55 | 2,67 | 0,085 |
| 65,67 | 18,1 | 19,4 | 43,28 | 52,4 | 44,6 | 24,74 | 28,23 | 59,92 | 49,99 | 9,929 | 3,486 | 93,11 | 2,79 | 2,49 | 2,64 | 0,114 |
| 65,78 | 17 | 19,1 | 43,2 | 51,8 | 43,5 | 24,43 | 27,91 | 59,9 | 49,96 | 9,94 | 3,484 | 92,17 | 2,784 | 2,50 | 2,64 | 0,110 |
| 65,87 | 18,8 | 20,1 | 43,17 | 60,3 | 52,9 | 25,26 | 28,87 | 59,96 | 49,91 | 10,05 | 3,608 | 97,44 | 2,883 | 2,53 | 2,70 | 0,132 |

ÁGUA/ETILENO GLICOL ($\dot{m}_{ar}=1,6\text{kg/s}$; $T_{e,liq}=60^\circ\text{C}$)

| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| 30,29 | 19,8 | 20 | 194,5 | 51,8 | 48,4 | 26,79 | 27,51 | 59,94 | 52,28 | 7,663 | 0,72 | 36,81 | 1,24 | 0,89 | 1,06 | 0,330 |
| 30,27 | 19,7 | 20 | 193,9 | 51 | 47,4 | 27,11 | 27,81 | 59,97 | 52,33 | 7,64 | 0,70 | 36,31 | 1,19 | 0,88 | 1,04 | 0,296 |
| 30,28 | 18,5 | 18,7 | 194,5 | 57,8 | 54,1 | 25,04 | 25,77 | 59,91 | 51,95 | 7,961 | 0,73 | 35,74 | 1,25 | 0,92 | 1,09 | 0,305 |
| 30,24 | 18,6 | 18,7 | 195 | 57,4 | 54,1 | 25,06 | 25,78 | 59,91 | 51,95 | 7,957 | 0,73 | 35,62 | 1,25 | 0,92 | 1,08 | 0,301 |
| 42,83 | 19,4 | 20,1 | 193,2 | 49,1 | 45,9 | 27,54 | 28,55 | 60,13 | 51,92 | 8,212 | 1,01 | 55,02 | 1,72 | 1,34 | 1,53 | 0,246 |
| 42,82 | 19,4 | 20,5 | 193,1 | 49,1 | 45,7 | 27,53 | 28,55 | 60,13 | 51,92 | 8,213 | 1,02 | 55,09 | 1,72 | 1,34 | 1,53 | 0,248 |
| 42,84 | 20,8 | 21,3 | 194,4 | 59,5 | 53,4 | 26,97 | 27,97 | 60,11 | 51,8 | 8,312 | 1,00 | 54,14 | 1,71 | 1,36 | 1,53 | 0,228 |
| 42,81 | 20,6 | 21,2 | 195 | 60 | 56,5 | 26,32 | 27,33 | 60,1 | 51,67 | 8,428 | 1,01 | 53,74 | 1,73 | 1,38 | 1,55 | 0,226 |
| 53,82 | 19,2 | 19,9 | 195,9 | 57,9 | 52,6 | 25,17 | 26,55 | 60 | 50,89 | 9,111 | 1,38 | 72,17 | 2,37 | 1,87 | 2,12 | 0,237 |
| 53,81 | 19,9 | 21 | 194,2 | 58,7 | 54,8 | 26,31 | 27,64 | 59,93 | 51,06 | 8,865 | 1,33 | 72,05 | 2,27 | 1,82 | 2,04 | 0,217 |
| 53,82 | 19,7 | 20,4 | 194,1 | 58,6 | 53,5 | 25,91 | 27,26 | 59,91 | 50,98 | 8,926 | 1,35 | 72 | 2,30 | 1,83 | 2,07 | 0,225 |
| 53,76 | 19,1 | 19,1 | 194,3 | 56,6 | 51,1 | 25,33 | 26,68 | 59,88 | 50,87 | 9,012 | 1,35 | 71,14 | 2,31 | 1,85 | 2,08 | 0,220 |
| 65,85 | 19,2 | 19,8 | 194,3 | 55,5 | 49,4 | 25,75 | 27,42 | 59,97 | 50,65 | 9,318 | 1,67 | 90,92 | 2,85 | 2,34 | 2,60 | 0,196 |
| 65,79 | 19,9 | 20,4 | 192,9 | 50,2 | 45,1 | 27,62 | 29,23 | 60,04 | 51,08 | 8,957 | 1,61 | 92,33 | 2,73 | 2,25 | 2,49 | 0,193 |

Continua na próxima página

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|-------|
| 65,79 | 18,6 | 20 | 194,8 | 57,3 | 51,1 | 25,4 | 27,08 | 59,93 | 50,56 | 9,372 | 1,68 | 90,63 | 2,87 | 2,35 | 2,61 | 0,199 |
| 65,8 | 19,2 | 19,4 | 194,3 | 57,5 | 56,6 | 25,48 | 27,14 | 59,93 | 50,57 | 9,359 | 1,66 | 90,08 | 2,83 | 2,35 | 2,59 | 0,186 |

| ÁGUA/ETILENO GLICOL ($\dot{m}_{ar}=0,8 \text{ kg/s}$; $T_{e,líq}=80 \text{ }^{\circ}\text{C}$) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|--|---|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------|
| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU, e}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{BU, s}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s, ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{e, líq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s, líq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{liq} ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{ar} ($^{\circ}\text{C}$) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
| 30,47 | 17,5 | 19,6 | 43,27 | 56,4 | 44,2 | 23,85 | 26,56 | 79,98 | 65,28 | 14,7 | 2,707 | 41,34 | 2,17 | 1,73 | 1,95 | 0,226 |
| 30,35 | 18 | 19,6 | 43,04 | 53 | 42,2 | 24,67 | 27,31 | 79,99 | 65,39 | 14,61 | 2,641 | 41,13 | 2,11 | 1,71 | 1,91 | 0,209 |
| 30,22 | 18,4 | 19,9 | 42,82 | 48 | 40,1 | 25,96 | 28,58 | 80,02 | 65,58 | 14,44 | 2,619 | 41,6 | 2,08 | 1,69 | 1,88 | 0,211 |
| 30,43 | 18,6 | 20 | 43,33 | 59,3 | 48,6 | 24,29 | 26,9 | 79,93 | 65,38 | 14,55 | 2,608 | 40,63 | 2,09 | 1,71 | 1,90 | 0,202 |
| 42,88 | 18 | 19,8 | 43,33 | 55,9 | 43 | 24,18 | 27,9 | 80,03 | 65,13 | 14,9 | 3,716 | 58,79 | 2,98 | 2,47 | 2,72 | 0,188 |
| 42,87 | 18,1 | 19,9 | 43,26 | 53 | 41,4 | 24,41 | 28,12 | 80,03 | 65,15 | 14,88 | 3,703 | 58,86 | 2,97 | 2,46 | 2,71 | 0,186 |
| 42,7 | 18 | 19,9 | 42,98 | 52,8 | 39,9 | 24,81 | 28,48 | 80,04 | 65,25 | 14,79 | 3,665 | 58,56 | 2,92 | 2,44 | 2,68 | 0,180 |
| 42,79 | 19,5 | 21 | 42,88 | 55,2 | 42,3 | 26,02 | 29,7 | 80,07 | 65,34 | 14,72 | 3,681 | 60,08 | 2,93 | 2,43 | 2,68 | 0,186 |
| 53,85 | 20,8 | 21,7 | 43,17 | 64,9 | 46,8 | 25,84 | 30,56 | 80,05 | 64,87 | 15,18 | 4,716 | 78,59 | 3,77 | 3,16 | 3,46 | 0,178 |
| 53,87 | 18 | 20,6 | 42,99 | 54,2 | 41 | 24,72 | 29,43 | 80,03 | 64,7 | 15,33 | 4,707 | 76,96 | 3,75 | 3,19 | 3,47 | 0,163 |
| 53,74 | 18,2 | 20,2 | 42,86 | 50,9 | 38,1 | 25,11 | 29,76 | 79,97 | 64,78 | 15,18 | 4,657 | 76,59 | 3,70 | 3,15 | 3,43 | 0,162 |
| 53,79 | 18,8 | 20,7 | 42,97 | 56,8 | 44,6 | 24,86 | 29,55 | 80 | 64,68 | 15,32 | 4,686 | 77 | 3,74 | 3,18 | 3,46 | 0,161 |
| 65,77 | 18,5 | 19,8 | 43,18 | 56,9 | 43,1 | 24,47 | 30,24 | 79,99 | 64,33 | 15,67 | 5,77 | 96,18 | 4,61 | 3,98 | 4,29 | 0,147 |
| 65,77 | 18,3 | 20,5 | 43,17 | 57,4 | 43,2 | 24,32 | 30,13 | 79,98 | 64,3 | 15,69 | 5,813 | 96,39 | 4,64 | 3,98 | 4,31 | 0,153 |
| 65,67 | 18,1 | 20,2 | 42,8 | 51,1 | 37,3 | 25,09 | 30,85 | 79,96 | 64,45 | 15,51 | 5,765 | 96,55 | 4,58 | 3,93 | 4,25 | 0,151 |
| 65,71 | 18,8 | 20,6 | 43,09 | 54 | 40,3 | 25,43 | 31,13 | 79,92 | 64,54 | 15,38 | 5,702 | 96,42 | 4,54 | 3,90 | 4,22 | 0,152 |

| ÁGUA/ETILENO GLICOL ($\dot{m}_{ar}=1,6\text{kg/s}$; $T_{e,liq}=80^\circ\text{C}$) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU, e}$ (°C) | $T_{BU, s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ (°C) | $T_{s, ar}$ (°C) | $T_{e, liq}$ (°C) | $T_{s, liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | <i>Erro</i> |
| 30,34 | 20,7 | 21,4 | 193,2 | 48,2 | 42 | 28,51 | 29,85 | 79,97 | 65,83 | 14,14 | 1,34 | 45,27 | 2,27 | 1,66 | 1,97 | 0,314 |
| 30,33 | 20,6 | 21,3 | 194,8 | 56,3 | 48,8 | 27,27 | 28,65 | 79,96 | 65,69 | 14,26 | 1,38 | 45,1 | 2,35 | 1,67 | 2,01 | 0,338 |
| 30,32 | 18,7 | 19,5 | 196,1 | 53 | 47,1 | 25,4 | 26,75 | 79,99 | 65,46 | 14,52 | 1,35 | 43,3 | 2,31 | 1,70 | 2,01 | 0,305 |
| 30,38 | 20,6 | 21,2 | 193,6 | 49,9 | 44,6 | 28,09 | 29,42 | 80,03 | 65,85 | 14,18 | 1,33 | 44,76 | 2,27 | 1,66 | 1,96 | 0,307 |
| 42,75 | 20,5 | 24,5 | 192,9 | 48,2 | 41,1 | 28,49 | 30,34 | 80,04 | 65,62 | 14,42 | 1,85 | 64,1 | 3,15 | 2,38 | 2,76 | 0,277 |
| 42,91 | 20,4 | 21,5 | 194,1 | 67,8 | 58,5 | 24,91 | 26,79 | 80,04 | 65,13 | 14,9 | 1,88 | 61,27 | 3,22 | 2,47 | 2,85 | 0,265 |
| 42,76 | 18,8 | 19,5 | 195,4 | 54,1 | 48,2 | 25,19 | 27,07 | 80,03 | 65,19 | 14,84 | 1,88 | 61,3 | 3,21 | 2,45 | 2,83 | 0,269 |
| 42,81 | 20,4 | 21,1 | 193,3 | 49,3 | 42,2 | 27,99 | 29,8 | 80 | 65,56 | 14,44 | 1,82 | 62,69 | 3,08 | 2,39 | 2,73 | 0,253 |
| 53,79 | 20,1 | 21,2 | 193,1 | 46 | 39,7 | 28,37 | 30,7 | 79,93 | 65,11 | 14,82 | 2,33 | 82,23 | 3,94 | 3,08 | 3,51 | 0,246 |
| 53,79 | 19,9 | 20,8 | 193,5 | 46,4 | 39,5 | 28,15 | 30,49 | 79,91 | 65,08 | 14,84 | 2,34 | 82,13 | 3,96 | 3,08 | 3,52 | 0,250 |
| 53,79 | 19,3 | 20,1 | 194,3 | 52,8 | 44,2 | 25,99 | 28,36 | 79,94 | 64,74 | 15,2 | 2,37 | 80,25 | 4,04 | 3,16 | 3,60 | 0,247 |
| 53,78 | 19,7 | 21 | 195,3 | 53,3 | 44,9 | 26,41 | 28,78 | 79,96 | 64,82 | 15,14 | 2,37 | 80,78 | 4,05 | 3,14 | 3,59 | 0,251 |
| 65,74 | 20,1 | 21,2 | 193 | 46 | 38,7 | 28,32 | 31,19 | 80,05 | 64,81 | 15,24 | 2,87 | 103 | 4,86 | 3,87 | 4,37 | 0,228 |
| 65,8 | 20,6 | 21,5 | 195,6 | 60,4 | 50,5 | 26,29 | 29,19 | 79,98 | 64,38 | 15,6 | 2,91 | 101,3 | 4,98 | 3,96 | 4,47 | 0,228 |
| 65,86 | 19,3 | 19,9 | 196,4 | 59,8 | 51 | 24,86 | 27,81 | 79,88 | 64,06 | 15,83 | 2,94 | 100,1 | 5,05 | 4,02 | 4,54 | 0,228 |
| 65,92 | 20,3 | 21,4 | 193,9 | 52,2 | 43,2 | 27,14 | 30,03 | 80,05 | 64,6 | 15,45 | 2,90 | 101,9 | 4,93 | 3,93 | 4,43 | 0,225 |

| ÁGUA/ETILENO GLICOL ($\dot{m}_{ar}=0,8 \text{ kg/s}$; $T_{e,liq}=96 \text{ }^{\circ}\text{C}$) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|--|---|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU, e}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{BU, s}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s, ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{e, liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s, liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{liq} ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{ar} ($^{\circ}\text{C}$) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | <i>Erro</i> |
| 29,94 | 23,9 | 25,1 | 42,85 | 55,6 | 51,1 | 30,71 | 34,36 | 95,82 | 72,04 | 23,78 | 3,65 | 55,81 | 2,90 | 2,77 | 2,83 | 0,045 |
| 29,96 | 24,4 | 25,7 | 43,16 | 55,4 | 50,9 | 31,5 | 34,8 | 95,9 | 75,3 | 20,6 | 3,3 | 48,37 | 2,63 | 2,40 | 2,51 | 0,090 |
| 29,98 | 24,5 | 25,9 | 43,25 | 55,1 | 50,5 | 31,7 | 35 | 95,9 | 75,4 | 20,5 | 3,3 | 48,43 | 2,63 | 2,39 | 2,51 | 0,095 |
| 30,75 | 22,8 | 24,5 | 42,64 | 56,9 | 47 | 29,6 | 33,1 | 95,9 | 73,7 | 22,2 | 3,5 | 51,29 | 2,77 | 2,66 | 2,71 | 0,043 |
| 31,17 | 20,5 | 22,9 | 42,97 | 57,1 | 41,7 | 26,7 | 30,79 | 95,99 | 74,92 | 21,08 | 4,09 | 51,67 | 3,26 | 2,56 | 2,91 | 0,243 |
| 43,8 | 22,3 | 23,7 | 43,32 | 48,6 | 44,2 | 30,77 | 35,45 | 96,42 | 76,78 | 19,64 | 4,671 | 66,44 | 3,71 | 3,35 | 3,53 | 0,103 |
| 43,01 | 22,3 | 24,7 | 42,93 | 45,9 | 42,6 | 32,48 | 37,06 | 96,48 | 77,15 | 19,33 | 4,583 | 66,28 | 3,62 | 3,24 | 3,43 | 0,111 |
| 43 | 22,5 | 24,5 | 43,01 | 45,8 | 41 | 32,59 | 37,17 | 96,47 | 77,17 | 19,3 | 4,589 | 66,43 | 3,62 | 3,23 | 3,43 | 0,114 |
| 42,12 | 24,9 | 26,1 | 43,18 | 88,1 | 75,4 | 26,96 | 31,42 | 96,35 | 76,36 | 19,99 | 4,456 | 60,34 | 3,58 | 3,28 | 3,43 | 0,088 |
| 43,28 | 20,4 | 22,9 | 42,61 | 56,5 | 40,7 | 26,62 | 32,00 | 96,2 | 75,52 | 20,68 | 5,38 | 68,9 | 4,26 | 3,48 | 3,87 | 0,201 |
| 42,92 | 21,00 | 23,5 | 42,74 | 34,7 | 39 | 27,52 | 32,77 | 96,44 | 76,27 | 20,17 | 5,25 | 67,39 | 4,16 | 3,37 | 3,77 | 0,210 |
| 53,61 | 21,4 | 22,2 | 42,82 | 69,7 | 59,9 | 25,44 | 31,15 | 96,66 | 76,31 | 20,35 | 5,713 | 75,99 | 4,55 | 4,25 | 4,40 | 0,069 |
| 53,6 | 21,4 | 22,6 | 43,03 | 69,1 | 60,3 | 25,57 | 31,27 | 96,65 | 76,34 | 20,32 | 5,709 | 76,14 | 4,56 | 4,24 | 4,40 | 0,073 |
| 53,6 | 21,4 | 22,5 | 43,19 | 68,3 | 60,2 | 25,56 | 31,26 | 96,66 | 76,34 | 20,31 | 5,702 | 76,14 | 4,56 | 4,24 | 4,40 | 0,073 |
| 53,58 | 21,4 | 22,6 | 42,83 | 68,8 | 61 | 25,67 | 31,39 | 96,65 | 76,36 | 20,29 | 5,724 | 76,2 | 4,56 | 4,23 | 4,40 | 0,074 |
| 54,81 | 20,3 | 23 | 42,71 | 52,1 | 36,3 | 26,76 | 33,53 | 96,65 | 75,72 | 20,93 | 6,77 | 88,14 | 5,36 | 4,46 | 4,91 | 0,183 |
| 66,54 | 20,2 | 22,1 | 42,7 | 49,9 | 44,3 | 27,65 | 34,62 | 96,72 | 76,01 | 20,7 | 6,967 | 98,87 | 5,50 | 5,36 | 5,43 | 0,026 |
| 66,82 | 21,2 | 23,1 | 42,62 | 54,2 | 42,9 | 28 | 35,3 | 96,1 | 74,7 | 21,4 | 7,30 | 106 | 5,76 | 5,56 | 5,66 | 0,035 |
| 66,16 | 22,5 | 24,7 | 42,54 | 57,7 | 45,4 | 28,2 | 35,3 | 96,2 | 75,2 | 21 | 7,10 | 102,7 | 5,61 | 5,41 | 5,51 | 0,037 |
| 62,93 | 20,5 | 23,3 | 42,97 | 53,7 | 35,3 | 26,94 | 34,63 | 96,77 | 75,83 | 20,94 | 7,69 | 101,6 | 6,10 | 5,13 | 5,62 | 0,173 |
| 65,59 | 19,9 | 23,00 | 42,83 | 53 | 33,33 | 26,97 | 34,85 | 96,84 | 76,05 | 20,8 | 7,88 | 104,5 | 6,24 | 5,31 | 5,78 | 0,161 |

| ÁGUA/ETILENO GLICOL ($\dot{m}_{ar}=1,6 \text{ kg/s}$; $T_{e,liq}=96 \text{ }^{\circ}\text{C}$) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|--|---|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU, e}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{BU, s}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s, ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{e, liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s, liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{liq} ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{ar} ($^{\circ}\text{C}$) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | <i>Erro</i> |
| 29,91 | 22,6 | 23,7 | 191,4 | 47,8 | 46,9 | 31,53 | 32,99 | 95,78 | 75,53 | 20,25 | 1,46 | 45,55 | 2,457 | 2,356 | 2,41 | 0,042 |
| 29,87 | 22,6 | 23,2 | 191,2 | 48,2 | 45,7 | 31,53 | 32,96 | 95,76 | 75,57 | 20,19 | 1,43 | 44,93 | 2,405 | 2,346 | 2,38 | 0,024 |
| 29,95 | 22,9 | 23,3 | 191,2 | 48,3 | 45,8 | 31,45 | 32,92 | 95,76 | 75,66 | 20,1 | 1,47 | 45,44 | 2,473 | 2,342 | 2,41 | 0,054 |
| 30,68 | 23,9 | 24,5 | 199 | 64 | 59,3 | 28,8 | 30,7 | 95,8 | 71,5 | 24,3 | 1,9 | 58,19 | 3,284 | 2,90 | 3,09 | 0,125 |
| 29,19 | 21,3 | 22,6 | 193,5 | 51,2 | 44,5 | 28,82 | 30,77 | 95,73 | 74,75 | 20,98 | 1,947 | 51,79 | 3,31 | 2,38 | 2,84 | 0,325 |
| 42,11 | 23,4 | 24,1 | 194 | 81 | 77 | 26,34 | 28,39 | 96,33 | 76,22 | 20,11 | 2,044 | 58,17 | 3,504 | 3,30 | 3,40 | 0,061 |
| 42,1 | 23,4 | 24,1 | 193,7 | 80,7 | 76 | 26,41 | 28,47 | 96,34 | 76,24 | 20,1 | 2,064 | 58,47 | 3,533 | 3,293 | 3,41 | 0,070 |
| 42,11 | 23,7 | 24,2 | 193,5 | 80,1 | 75,7 | 26,59 | 28,66 | 96,33 | 76,26 | 20,07 | 2,065 | 58,62 | 3,534 | 3,29 | 3,41 | 0,071 |
| 42,1 | 23,8 | 24,3 | 193,5 | 80,8 | 75,1 | 26,75 | 28,81 | 96,34 | 76,28 | 20,06 | 2,065 | 58,73 | 3,534 | 3,286 | 3,41 | 0,072 |
| 39,19 | 21,4 | 22,8 | 192,8 | 50,7 | 41,3 | 28,91 | 31,37 | 96,23 | 76 | 20,23 | 2,462 | 65,35 | 4,17 | 3,09 | 3,63 | 0,299 |
| 53,68 | 22,5 | 22,8 | 193 | 69,8 | 64,7 | 26,47 | 29,05 | 96,4 | 76,01 | 20,39 | 2,574 | 74,57 | 4,388 | 4,26 | 4,32 | 0,030 |
| 53,69 | 22,5 | 22,9 | 193,1 | 69,9 | 65 | 26,55 | 29,11 | 96,41 | 76,03 | 20,39 | 2,551 | 74,31 | 4,35 | 4,26 | 4,31 | 0,021 |
| 53,73 | 22,5 | 22,8 | 192,9 | 68,1 | 64,8 | 26,59 | 29,17 | 96,43 | 76,05 | 20,38 | 2,576 | 74,69 | 4,388 | 4,261 | 4,33 | 0,029 |
| 53,72 | 22,4 | 22,8 | 193,5 | 68,5 | 66,7 | 26,42 | 29 | 96,44 | 76,03 | 20,41 | 2,576 | 74,59 | 4,397 | 4,267 | 4,33 | 0,030 |
| 52,52 | 21,1 | 22,4 | 193,2 | 50,4 | 41,2 | 28,6 | 31,79 | 96,62 | 75,98 | 20,65 | 3,19 | 527,6 | 5,45 | 4,22 | 29,36 | 0,171 |
| 66,44 | 21,4 | 22,1 | 192,2 | 45,2 | 41,8 | 30,61 | 33,92 | 96,77 | 76,01 | 20,76 | 3,317 | 102 | 5,58 | 5,369 | 5,48 | 0,039 |
| 66,96 | 21,8 | 23,2 | 196 | 52,8 | 45,7 | 29,4 | 32,8 | 96,2 | 74,5 | 21,7 | 3,4 | 106,6 | 5,799 | 5,652 | 5,73 | 0,026 |
| 66,44 | 22,6 | 24,1 | 196 | 56,2 | 53 | 29,5 | 32,8 | 96,4 | 75,1 | 21,3 | 3,3 | 103 | 5,636 | 5,506 | 5,57 | 0,023 |
| 62,86 | 20,9 | 22,4 | 194,1 | 50 | 40,6 | 28,38 | 32,25 | 96,71 | 75,6 | 21,1 | 3,875 | 106 | 6,58 | 5,16 | 5,87 | 0,241 |
| 65,83 | 21 | 22,7 | 192,3 | 49,5 | 38,4 | 28,73 | 32,69 | 96,78 | 75,75 | 21,03 | 3,954 | 109,5 | 6,68 | 5,39 | 6,03 | 0,214 |

NANOFUIDO PRATA/ÁGUA-ETILENO GLICOL ($\varphi = 0,06\%$; $\dot{m}_{ar}=0,8\text{ kg/s}$; $T_{e,liq}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$)

| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU,e}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{BU,s}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e,ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s,ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{e,liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s,liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{liq} ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{ar} ($^{\circ}\text{C}$) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| 30,31 | 19 | 19,6 | 43,21 | 57,1 | 51,6 | 25,06 | 26,22 | 59,94 | 52,66 | 7,279 | 1,158 | 28,96 | 0,93 | 0,84 | 0,89 | 0,097 |
| 30,24 | 18,8 | 19,6 | 43,39 | 55,4 | 49,7 | 25,37 | 26,47 | 59,96 | 52,73 | 7,228 | 1,105 | 28,39 | 0,89 | 0,83 | 0,86 | 0,062 |
| 30,4 | 18,5 | 19,4 | 43,41 | 64,1 | 57,1 | 23,52 | 24,73 | 60 | 52,72 | 7,278 | 1,207 | 28,27 | 0,97 | 0,84 | 0,91 | 0,141 |
| 30,26 | 17,4 | 18,1 | 43,31 | 46,8 | 42 | 25,17 | 26,31 | 60 | 52,98 | 7,021 | 1,136 | 28,07 | 0,91 | 0,81 | 0,86 | 0,115 |
| 42,85 | 19,1 | 20,2 | 42,96 | 55,4 | 47,3 | 25,58 | 27,29 | 60,11 | 52,25 | 7,861 | 1,715 | 44,79 | 1,37 | 1,29 | 1,33 | 0,063 |
| 42,88 | 18,6 | 19,5 | 43,31 | 54,8 | 47,6 | 25,12 | 26,81 | 59,99 | 52,08 | 7,904 | 1,689 | 44,18 | 1,35 | 1,29 | 1,32 | 0,046 |
| 42,74 | 18,4 | 19,5 | 43,19 | 56,1 | 48,9 | 24,63 | 26,36 | 59,98 | 52,29 | 7,696 | 1,733 | 43,29 | 1,39 | 1,26 | 1,32 | 0,101 |
| 42,79 | 18,2 | 19,4 | 43,27 | 53,3 | 47,1 | 24,74 | 26,49 | 59,98 | 52,31 | 7,672 | 1,745 | 43,58 | 1,40 | 1,25 | 1,33 | 0,111 |
| 53,67 | 19 | 20,3 | 43,1 | 54,4 | 46,1 | 25,54 | 27,81 | 59,98 | 51,61 | 8,375 | 2,269 | 60,81 | 1,81 | 1,72 | 1,76 | 0,056 |
| 53,86 | 18,7 | 19,7 | 43,22 | 55,1 | 46,6 | 25,13 | 27,41 | 59,96 | 51,53 | 8,426 | 2,28 | 60,55 | 1,83 | 1,73 | 1,78 | 0,053 |
| 53,86 | 18,7 | 19,8 | 43,21 | 63,8 | 54,6 | 23,65 | 26,01 | 59,96 | 51,52 | 8,446 | 2,359 | 58,91 | 1,89 | 1,74 | 1,82 | 0,087 |
| 53,85 | 17,9 | 19,1 | 43,12 | 49,6 | 41,8 | 25,12 | 27,42 | 60 | 51,83 | 8,178 | 2,298 | 59,49 | 1,84 | 1,68 | 1,76 | 0,088 |
| 65,7 | 19,2 | 20,1 | 43,12 | 54,8 | 46,3 | 25,62 | 28,55 | 60,04 | 51,4 | 8,639 | 2,931 | 78,95 | 2,34 | 2,17 | 2,25 | 0,078 |
| 65,79 | 18,5 | 19,8 | 43,33 | 54,4 | 45,4 | 25,16 | 28,05 | 60,01 | 51,23 | 8,779 | 2,893 | 78,17 | 2,32 | 2,20 | 2,26 | 0,050 |
| 65,78 | 18,4 | 19,7 | 43,26 | 57,7 | 48,7 | 23,97 | 26,97 | 60,03 | 51,21 | 8,811 | 2,999 | 76,82 | 2,41 | 2,21 | 2,31 | 0,084 |
| 65,87 | 17,9 | 19,3 | 42,96 | 50,6 | 42,6 | 24,98 | 27,9 | 59,96 | 51,37 | 8,593 | 2,916 | 76,97 | 2,33 | 2,16 | 2,24 | 0,074 |

| NANOFLUIDO PRATA/ÁGUA-ETILENO GLICOL ($\varphi = 0,06\%$; $\dot{m}_{ar} = 1,6\text{kg/s}$; $T_{e,liq} = 60^\circ\text{C}$) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|--------------------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU,e}$ (°C) | $T_{BU,s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e,ar}$ (°C) | $T_{s,ar}$ (°C) | $T_{e,liq}$ (°C) | $T_{s,liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | <i>Erro</i> |
| 30,34 | 19,9 | 20,4 | 195,9 | 52,3 | 50 | 26,93 | 27,53 | 59,91 | 52,81 | 7,106 | 0,595 | 31,75 | 1,02 | 0,82 | 0,92 | 0,213 |
| 30,19 | 21,8 | 21,9 | 196,6 | 68 | 61,8 | 26,83 | 27,49 | 59,94 | 51,94 | 8,002 | 0,6661 | 36,13 | 1,15 | 0,92 | 1,03 | 0,217 |
| 30,13 | 21,1 | 21,5 | 197,5 | 74,3 | 70,3 | 24,95 | 25,66 | 59,93 | 51,72 | 8,213 | 0,7114 | 35,81 | 1,23 | 0,94 | 1,09 | 0,263 |
| 30,23 | 20,9 | 21,1 | 199,1 | 75,4 | 69,1 | 24,8 | 25,5 | 59,93 | 51,69 | 8,24 | 0,707 | 35,7 | 1,23 | 0,95 | 1,09 | 0,255 |
| 42,53 | 22,6 | 22,8 | 199,5 | 76,2 | 69,6 | 26,53 | 27,45 | 59,92 | 51,96 | 7,961 | 0,918 | 50,09 | 1,59 | 1,29 | 1,44 | 0,209 |
| 42,83 | 19,7 | 19,2 | 193,5 | 40,9 | 37,8 | 28,72 | 29,58 | 60,05 | 52,87 | 7,172 | 0,8603 | 48,35 | 1,46 | 1,17 | 1,32 | 0,216 |
| 42,83 | 19,5 | 19,8 | 193,5 | 40,7 | 38,3 | 28,85 | 29,7 | 60,02 | 52,88 | 7,141 | 0,8442 | 48 | 1,43 | 1,17 | 1,30 | 0,202 |
| 42,84 | 19,4 | 20,1 | 193 | 41,1 | 37,8 | 29,01 | 29,86 | 60,06 | 52,94 | 7,121 | 0,8498 | 48,29 | 1,44 | 1,17 | 1,30 | 0,209 |
| 53,76 | 21,7 | 22,1 | 195,6 | 69,3 | 63,2 | 25,99 | 27,17 | 60,02 | 51,66 | 8,362 | 1,177 | 64,18 | 2,02 | 1,72 | 1,87 | 0,164 |
| 53,76 | 21,7 | 22,4 | 195,1 | 69,1 | 62,4 | 26,4 | 27,59 | 60,03 | 51,69 | 8,335 | 1,191 | 65,33 | 2,04 | 1,71 | 1,88 | 0,177 |
| 53,86 | 19,3 | 19,6 | 193,5 | 39,8 | 36,3 | 28,74 | 29,81 | 59,99 | 52,35 | 7,639 | 1,074 | 63,31 | 1,82 | 1,57 | 1,70 | 0,147 |
| 53,84 | 19,2 | 19,8 | 193 | 39,5 | 36,3 | 28,93 | 30 | 59,99 | 52,38 | 7,609 | 1,069 | 63,39 | 1,81 | 1,56 | 1,69 | 0,145 |
| 65,81 | 20 | 20,7 | 196,4 | 67,1 | 60,8 | 24,81 | 26,35 | 59,94 | 51,05 | 8,883 | 1,54 | 81,99 | 2,65 | 2,23 | 2,44 | 0,172 |
| 65,87 | 20,8 | 21,5 | 199,4 | 73,5 | 66,8 | 25,02 | 26,52 | 59,96 | 51,13 | 8,833 | 1,496 | 81,29 | 2,60 | 2,22 | 2,41 | 0,157 |
| 65,81 | 18,9 | 19,5 | 194,4 | 40,5 | 37,2 | 28,4 | 29,78 | 59,96 | 51,86 | 8,108 | 1,382 | 82,12 | 2,35 | 2,04 | 2,19 | 0,141 |
| 65,87 | 19 | 19,6 | 193,6 | 40,7 | 36,8 | 28,32 | 29,66 | 59,94 | 51,83 | 8,119 | 1,341 | 80,59 | 2,27 | 2,04 | 2,16 | 0,107 |

| NANOFLUIDO PRATA/ÁGUA-ETILENO GLICOL ($\varphi = 0,06\%$; $\dot{m}_{ar}=0,8\text{ kg/s}$; $T_{e,liq}=80\text{ }^{\circ}\text{C}$) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU,e}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{BU,s}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e,ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s,ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{e,liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s,liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{liq} ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{ar} ($^{\circ}\text{C}$) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | <i>Erro</i> |
| 30,35 | 17,5 | 18,7 | 43,34 | 56,9 | 47,7 | 23,17 | 25,16 | 80,01 | 68,57 | 11,44 | 1,986 | 29,39 | 1,60 | 1,34 | 1,47 | 0,174 |
| 30,25 | 19,2 | 20,4 | 42,9 | 52,3 | 44,4 | 26,24 | 28,19 | 80,06 | 68,67 | 11,39 | 1,95 | 30,69 | 1,55 | 1,33 | 1,44 | 0,154 |
| 30,32 | 17,4 | 18,6 | 43,18 | 53,2 | 44,6 | 23,81 | 25,76 | 80,01 | 68,62 | 11,39 | 1,943 | 29,28 | 1,56 | 1,33 | 1,45 | 0,154 |
| 30,36 | 18,4 | 19,5 | 43,13 | 52 | 43,4 | 25,86 | 27,91 | 80 | 68,8 | 11,2 | 2,049 | 31,13 | 1,64 | 1,31 | 1,48 | 0,219 |
| 42,82 | 17,3 | 19,1 | 43,42 | 57,2 | 45 | 23,33 | 26,13 | 80 | 68,29 | 11,7 | 2,804 | 42,5 | 2,25 | 1,94 | 2,09 | 0,152 |
| 42,85 | 19,2 | 20,8 | 42,56 | 50,6 | 40,1 | 26,3 | 29,13 | 80,04 | 68,42 | 11,61 | 2,831 | 44,91 | 2,24 | 1,92 | 2,08 | 0,155 |
| 42,73 | 21,2 | 22,5 | 43,23 | 68,1 | 55,6 | 25,51 | 28,41 | 79,98 | 68,49 | 11,48 | 2,908 | 44,85 | 2,33 | 1,90 | 2,12 | 0,208 |
| 42,72 | 18,7 | 20,3 | 43,29 | 63,1 | 50 | 23,86 | 26,73 | 79,96 | 68,38 | 11,57 | 2,863 | 43,17 | 2,30 | 1,91 | 2,10 | 0,185 |
| 53,87 | 18,8 | 20,8 | 42,92 | 52,2 | 39,1 | 25,9 | 29,61 | 80,06 | 67,7 | 12,36 | 3,709 | 60,06 | 2,95 | 2,57 | 2,76 | 0,138 |
| 53,73 | 19,5 | 21,1 | 42,38 | 49,8 | 39,2 | 26,79 | 30,45 | 79,99 | 67,8 | 12,19 | 3,665 | 60,08 | 2,90 | 2,53 | 2,71 | 0,135 |
| 53,77 | 18,7 | 20,5 | 42,85 | 50,2 | 37,1 | 26,13 | 29,83 | 80,06 | 67,88 | 12,18 | 3,703 | 59,65 | 2,94 | 2,53 | 2,74 | 0,151 |
| 53,81 | 18,5 | 20,4 | 43,15 | 61,7 | 48 | 23,67 | 27,38 | 79,99 | 67,71 | 12,28 | 3,704 | 57,25 | 2,97 | 2,55 | 2,76 | 0,152 |
| 65,73 | 18,3 | 20,2 | 42,54 | 51,7 | 39,9 | 24,82 | 29,51 | 79,96 | 67,01 | 12,95 | 4,685 | 75,75 | 3,71 | 3,29 | 3,50 | 0,123 |
| 65,69 | 20,9 | 22,7 | 43,34 | 69,7 | 54,6 | 25,46 | 30,17 | 79,95 | 67,22 | 12,73 | 4,708 | 76,72 | 3,78 | 3,23 | 3,50 | 0,156 |
| 65,8 | 20,3 | 21,9 | 42,95 | 66 | 48,8 | 25,28 | 30,02 | 80,07 | 67,32 | 12,76 | 4,742 | 76,48 | 3,78 | 3,24 | 3,51 | 0,155 |
| 65,84 | 20 | 21,7 | 42,87 | 58,4 | 46,1 | 26,01 | 30,73 | 80,08 | 67,42 | 12,66 | 4,717 | 77 | 3,75 | 3,22 | 3,49 | 0,1538 |

| NANOFUIDO PRATA/ÁGUA-ETILENO GLICOL ($\varphi = 0,06\%$; $\dot{m}_{ar} = 1,6\text{kg/s}$; $T_{e,líq} = 80^\circ\text{C}$) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------|--------------------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU,e}$ (°C) | $T_{BU,s}$ (°C) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e,ar}$ (°C) | $T_{s,ar}$ (°C) | $T_{e,liq}$ (°C) | $T_{s,liq}$ (°C) | ΔT_{liq} (°C) | ΔT_{ar} (°C) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
| 30,36 | 20,6 | 21,2 | 194,4 | 51,1 | 46,5 | 27,79 | 28,92 | 79,97 | 67,49 | 12,48 | 1,127 | 32,45 | 1,921 | 1,463 | 1,692 | 0,271 |
| 30,34 | 21,1 | 21,9 | 193,2 | 47,8 | 43,4 | 29,47 | 30,53 | 79,98 | 68,04 | 11,94 | 1,059 | 31,99 | 1,794 | 1,399 | 1,596 | 0,248 |
| 30,43 | 21,3 | 22,2 | 192,9 | 47,9 | 43,6 | 29,74 | 30,81 | 80,01 | 68,18 | 11,83 | 1,072 | 31,92 | 1,814 | 1,39 | 1,602 | 0,265 |
| 30,42 | 21 | 21 | 194,1 | 52,3 | 48,1 | 27,56 | 28,56 | 80 | 68,47 | 11,53 | 0,997 | 29,5 | 1,698 | 1,354 | 1,526 | 0,226 |
| 42,73 | 20,6 | 21,5 | 193,6 | 50 | 43,6 | 28,22 | 29,76 | 79,99 | 67,55 | 12,44 | 1,54 | 46,16 | 2,617 | 2,052 | 2,335 | 0,242 |
| 42,7 | 21,4 | 21,8 | 192,4 | 47,8 | 39,8 | 29,68 | 31,11 | 79,99 | 68,02 | 11,97 | 1,435 | 45,6 | 2,424 | 1,973 | 2,199 | 0,205 |
| 42,76 | 19,9 | 20,9 | 192,3 | 51,6 | 45 | 27,35 | 28,75 | 79,97 | 68,37 | 11,61 | 1,404 | 41,83 | 2,378 | 1,916 | 2,147 | 0,215 |
| 42,75 | 19,8 | 20,7 | 194,5 | 53,2 | 48 | 26,98 | 28,38 | 79,98 | 68,35 | 11,63 | 1,396 | 41,57 | 2,38 | 1,92 | 2,15 | 0,214 |
| 53,84 | 20,9 | 21,9 | 192,9 | 47,5 | 41,6 | 29,1 | 31,02 | 80 | 67,09 | 12,91 | 1,923 | 62,26 | 3,256 | 2,683 | 2,969 | 0,193 |
| 53,86 | 21,1 | 22 | 192,5 | 45,7 | 40,8 | 29,24 | 31,17 | 80,03 | 67,17 | 12,87 | 1,927 | 62,19 | 3,258 | 2,675 | 2,966 | 0,197 |
| 53,72 | 20,8 | 21,6 | 192 | 45 | 36,4 | 30,05 | 31,9 | 80,07 | 67,71 | 12,36 | 1,849 | 60,27 | 3,115 | 2,564 | 2,839 | 0,194 |
| 53,69 | 21,2 | 22,1 | 192,2 | 46,4 | 39,6 | 29,9 | 31,75 | 80,1 | 67,73 | 12,37 | 1,846 | 60 | 3,115 | 2,563 | 2,839 | 0,194 |
| 65,83 | 19,8 | 21,2 | 195,1 | 53,8 | 43,9 | 26,49 | 29,07 | 80,05 | 65,75 | 14,3 | 2,578 | 81,33 | 4,404 | 3,632 | 4,018 | 0,192 |
| 65,85 | 20,2 | 21,5 | 195,1 | 52,1 | 43,9 | 26,84 | 29,39 | 80,07 | 65,88 | 14,19 | 2,556 | 81,21 | 4,364 | 3,606 | 3,985 | 0,19 |
| 65,79 | 20,9 | 22 | 191,8 | 46,6 | 38,6 | 29,53 | 31,81 | 79,95 | 67,15 | 12,79 | 2,286 | 76,54 | 3,855 | 3,249 | 3,552 | 0,171 |
| 65,8 | 21 | 22,1 | 191,9 | 48,1 | 39,7 | 29,23 | 31,53 | 80,02 | 67,18 | 12,83 | 2,308 | 76,16 | 3,895 | 3,259 | 3,577 | 0,178 |

NANOFUIDO PRATA/ÁGUA-ETILENO GLICOL ($\varphi = 0,02\%$; $\dot{m}_{ar}=0,8\text{ kg/s}$; $T_{e,liq}=96\text{ }^{\circ}\text{C}$)

| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU,e}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{BU,s}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e,ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s,ar}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{e,liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{s,liq}$ ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{liq} ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT_{ar} ($^{\circ}\text{C}$) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | Erro |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| 31,11 | 23,1 | 24,1 | 42,99 | 72,5 | 63,1 | 26,69 | 30,52 | 95,87 | 75,62 | 20,25 | 3,832 | 48,6 | 3,07 | 2,45 | 2,76 | 0,223 |
| 30,27 | 23,3 | 24,6 | 42,7 | 70,3 | 59,7 | 27,77 | 31,08 | 95,69 | 76,75 | 18,94 | 3,317 | 43,16 | 2,64 | 2,23 | 2,44 | 0,169 |
| 29,74 | 20,5 | 22,4 | 43,18 | 85,2 | 71,8 | 22,89 | 25,98 | 95,82 | 76,98 | 18,83 | 3,096 | 37,93 | 2,50 | 2,18 | 2,34 | 0,135 |
| 29,66 | 21,4 | 22,9 | 43,02 | 82,8 | 69,1 | 23,65 | 26,66 | 95,82 | 77,05 | 18,77 | 3,007 | 37,62 | 2,42 | 2,17 | 2,29 | 0,109 |
| 43,23 | 21,5 | 23,5 | 43,6 | 70,6 | 59,5 | 26,32 | 31,12 | 96,29 | 76,66 | 19,62 | 4,8 | 62,34 | 3,86 | 3,30 | 3,58 | 0,156 |
| 41,28 | 23,1 | 24,7 | 42,79 | 70,4 | 59,4 | 27,55 | 32,04 | 96,2 | 77,36 | 18,84 | 4,482 | 58,19 | 3,57 | 3,03 | 3,30 | 0,165 |
| 41,01 | 20,6 | 22,3 | 43,22 | 84,3 | 67,2 | 22,63 | 26,82 | 96,33 | 77,81 | 18,52 | 4,194 | 51,04 | 3,38 | 2,96 | 3,17 | 0,134 |
| 40,89 | 20,5 | 22,8 | 42,92 | 82,9 | 66,2 | 23,22 | 27,39 | 96,36 | 77,9 | 18,46 | 4,164 | 51,01 | 3,34 | 2,94 | 3,14 | 0,128 |
| 54,75 | 22 | 23,9 | 43,02 | 69,2 | 55,7 | 26,66 | 32,74 | 96,54 | 76,67 | 19,87 | 6,077 | 80,18 | 4,85 | 4,24 | 4,54 | 0,135 |
| 52,49 | 22,5 | 24,1 | 42,66 | 69,2 | 58,6 | 27,19 | 32,95 | 96,48 | 77,2 | 19,28 | 5,759 | 75,32 | 4,57 | 3,94 | 4,26 | 0,149 |
| 52,39 | 22,5 | 24 | 42,58 | 64,7 | 53,3 | 27,87 | 33,53 | 96,5 | 77,44 | 19,05 | 5,656 | 74,7 | 4,48 | 3,89 | 4,18 | 0,142 |
| 51,78 | 20,6 | 22,5 | 43,32 | 81 | 63,7 | 22,98 | 28,38 | 96,56 | 77,31 | 19,26 | 5,406 | 67,51 | 4,35 | 3,88 | 4,12 | 0,115 |
| 63,11 | 22,1 | 24 | 42,63 | 68,9 | 55,6 | 26,87 | 33,91 | 96,66 | 76,68 | 19,99 | 7,04 | 93,62 | 5,58 | 4,91 | 5,25 | 0,128 |
| 62,84 | 22,3 | 24,2 | 42,62 | 67,9 | 57,1 | 27,02 | 33,99 | 96,64 | 76,8 | 19,84 | 6,97 | 92,73 | 5,53 | 4,86 | 5,19 | 0,130 |
| 62,41 | 22 | 23,9 | 42,45 | 64,3 | 50,9 | 27,48 | 34,24 | 96,58 | 77,14 | 19,44 | 6,756 | 90,23 | 5,34 | 4,72 | 5,03 | 0,122 |
| 62,85 | 20,4 | 22,4 | 42,61 | 79,1 | 61,3 | 22,99 | 29,66 | 96,81 | 77,05 | 19,77 | 6,671 | 84,11 | 5,32 | 4,84 | 5,08 | 0,095 |

NANOFLUIDO PRATA/AGUA-ETILENO GLICOL ($\phi = 0,02\%$; $\dot{m}_{ar} = 1,6 \text{ kg/s}$; $T_{e,liq} = 96^\circ\text{C}$)

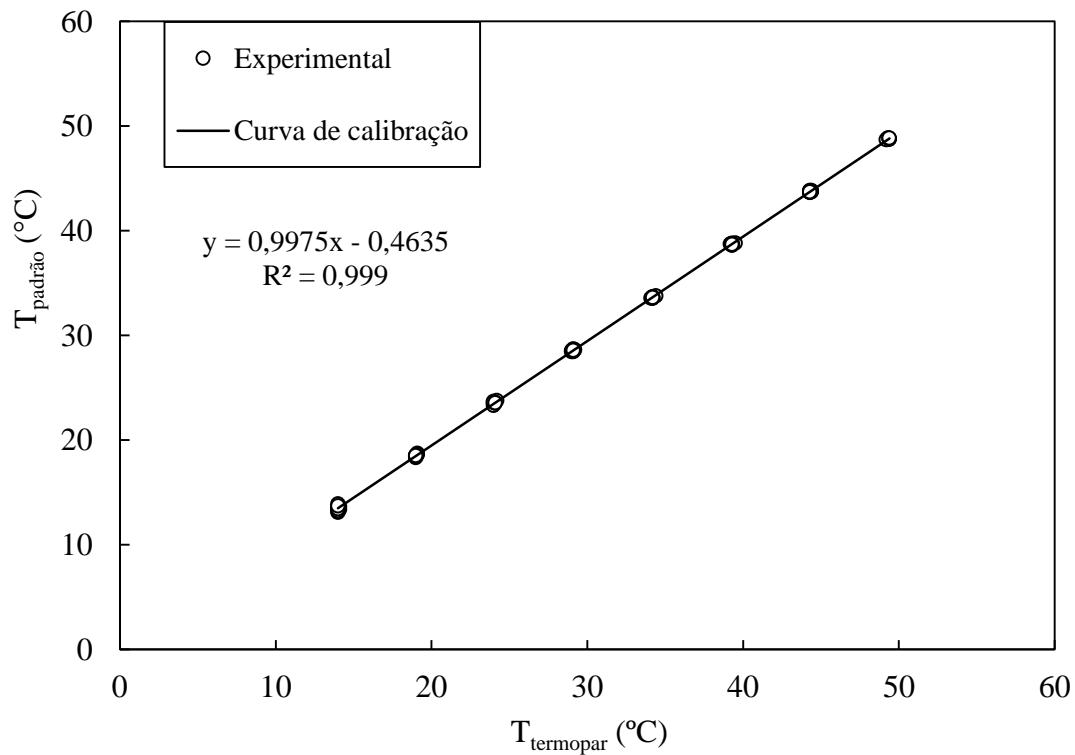
| \dot{m}_{liq} (g/s) | $T_{BU, e}$ ($^\circ\text{C}$) | $T_{BU, s}$ ($^\circ\text{C}$) | ΔP_{ar} (mm.c.a) | RH_e (%) | RH_s (%) | $T_{e, ar}$ ($^\circ\text{C}$) | $T_{s, ar}$ ($^\circ\text{C}$) | $T_{e, liq}$ ($^\circ\text{C}$) | $T_{s, liq}$ ($^\circ\text{C}$) | ΔT_{liq} ($^\circ\text{C}$) | ΔT_{ar} ($^\circ\text{C}$) | UA (W/K) | Q_{ar} (kW) | Q_{liq} (kW) | Q_{med} (kW) | <i>Erro</i> |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|---|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| 30,03 | 22,3 | 23,1 | 193,4 | 71,6 | 66,6 | 26,66 | 28,07 | 95,59 | 76,57 | 19,02 | 1,411 | 39,76 | 2,411 | 2,223 | 2,32 | 0,081 |
| 30,11 | 22,4 | 23,1 | 192,9 | 71,5 | 66,6 | 26,65 | 28,06 | 95,59 | 76,63 | 18,96 | 1,409 | 39,65 | 2,403 | 2,221 | 2,31 | 0,079 |
| 28,12 | 23,2 | 23,7 | 193,4 | 57,3 | 53,6 | 29,81 | 31,16 | 95,65 | 76,83 | 18,82 | 1,345 | 39,28 | 2,285 | 2,059 | 2,17 | 0,104 |
| 29,11 | 22,7 | 23,1 | 191,7 | 57,8 | 54,3 | 29,16 | 30,51 | 95,65 | 77,08 | 18,57 | 1,349 | 39,1 | 2,283 | 2,103 | 2,19 | 0,082 |
| 40,9 | 22,2 | 23 | 193,3 | 70,2 | 62,6 | 26,72 | 28,62 | 96,11 | 77,6 | 18,51 | 1,903 | 52,68 | 3,247 | 2,946 | 3,10 | 0,097 |
| 41,14 | 22 | 22,7 | 193,4 | 70 | 63 | 26,46 | 28,38 | 96,11 | 77,66 | 18,46 | 1,912 | 52,64 | 3,264 | 2,956 | 3,11 | 0,099 |
| 39,09 | 23,4 | 24,1 | 192,6 | 65,1 | 55 | 28,8 | 30,58 | 96,22 | 78,08 | 18,15 | 1,775 | 50,63 | 3,016 | 2,762 | 2,89 | 0,088 |
| 40,98 | 22,6 | 23,4 | 192,9 | 63,2 | 57,7 | 28,2 | 30,07 | 96,24 | 78,19 | 18,04 | 1,874 | 52,55 | 3,185 | 2,879 | 3,03 | 0,101 |
| 52,09 | 21,7 | 23,3 | 192,7 | 65,4 | 58,4 | 26,95 | 29,5 | 96,43 | 77,2 | 19,24 | 2,551 | 70,79 | 4,339 | 3,9 | 4,12 | 0,106 |
| 52,56 | 21,6 | 22,8 | 192,8 | 68,1 | 61,3 | 26,4 | 28,94 | 96,44 | 77,27 | 19,17 | 2,54 | 70,12 | 4,324 | 3,921 | 4,12 | 0,098 |
| 51,78 | 23,3 | 23,9 | 197,3 | 83,7 | 70,1 | 25,38 | 27,82 | 96,53 | 77,62 | 18,92 | 2,446 | 66,93 | 4,232 | 3,813 | 4,02 | 0,104 |
| 52,49 | 22,2 | 23 | 193,3 | 62,5 | 55,2 | 27,95 | 30,41 | 96,57 | 77,78 | 18,79 | 2,456 | 69,59 | 4,177 | 3,84 | 4,01 | 0,084 |
| 62,54 | 22,3 | 23,3 | 193,1 | 64,7 | 54,8 | 27,59 | 30,65 | 96,58 | 76,79 | 19,78 | 3,059 | 87,63 | 5,202 | 4,815 | 5,01 | 0,077 |
| 62,8 | 21,6 | 22,8 | 192,5 | 68,2 | 60 | 26,36 | 29,45 | 96,64 | 76,8 | 19,84 | 3,096 | 86,58 | 5,265 | 4,85 | 5,06 | 0,082 |
| 62,67 | 23,6 | 24,6 | 195,3 | 79,1 | 70,3 | 26,42 | 29,46 | 96,69 | 77,31 | 19,38 | 3,04 | 84,8 | 5,223 | 4,729 | 4,98 | 0,099 |
| 65,69 | 21,1 | 23,7 | 193,4 | 56,2 | 41,3 | 27,8 | 31,42 | 96,69 | 75,68 | 21,01 | 3,616 | 102,6 | 6,143 | 17,15 | 5,756 | 0,134 |

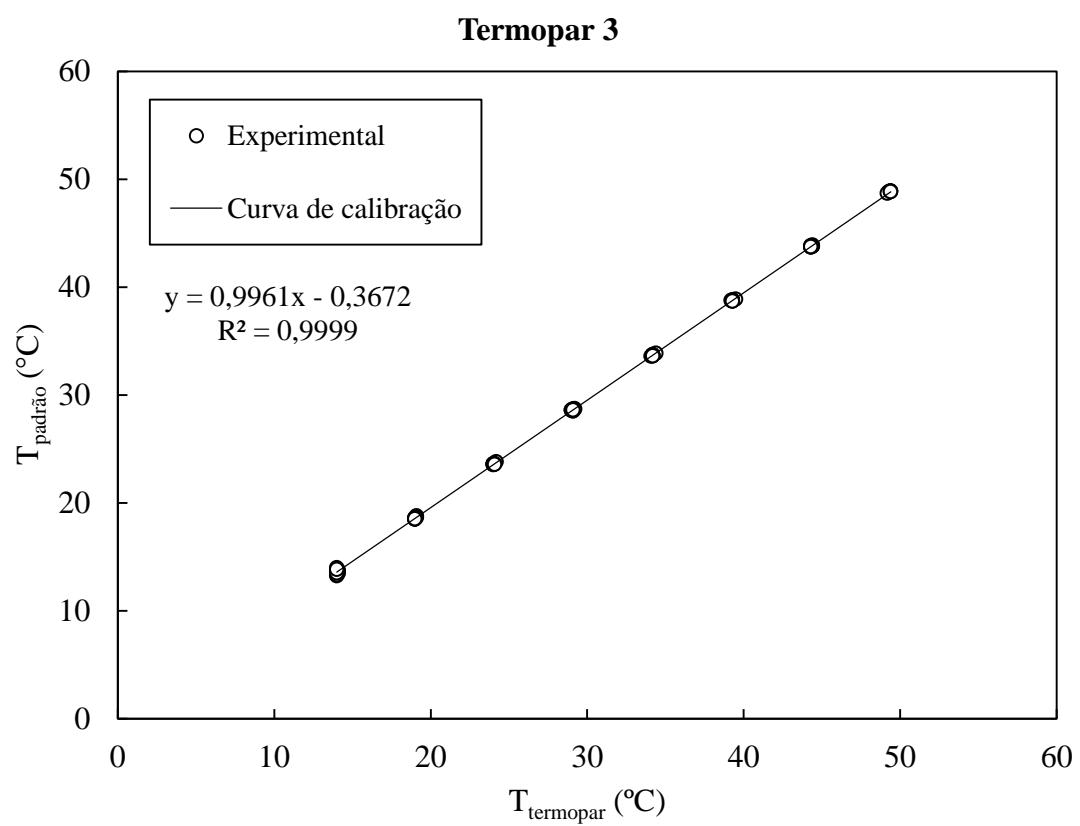
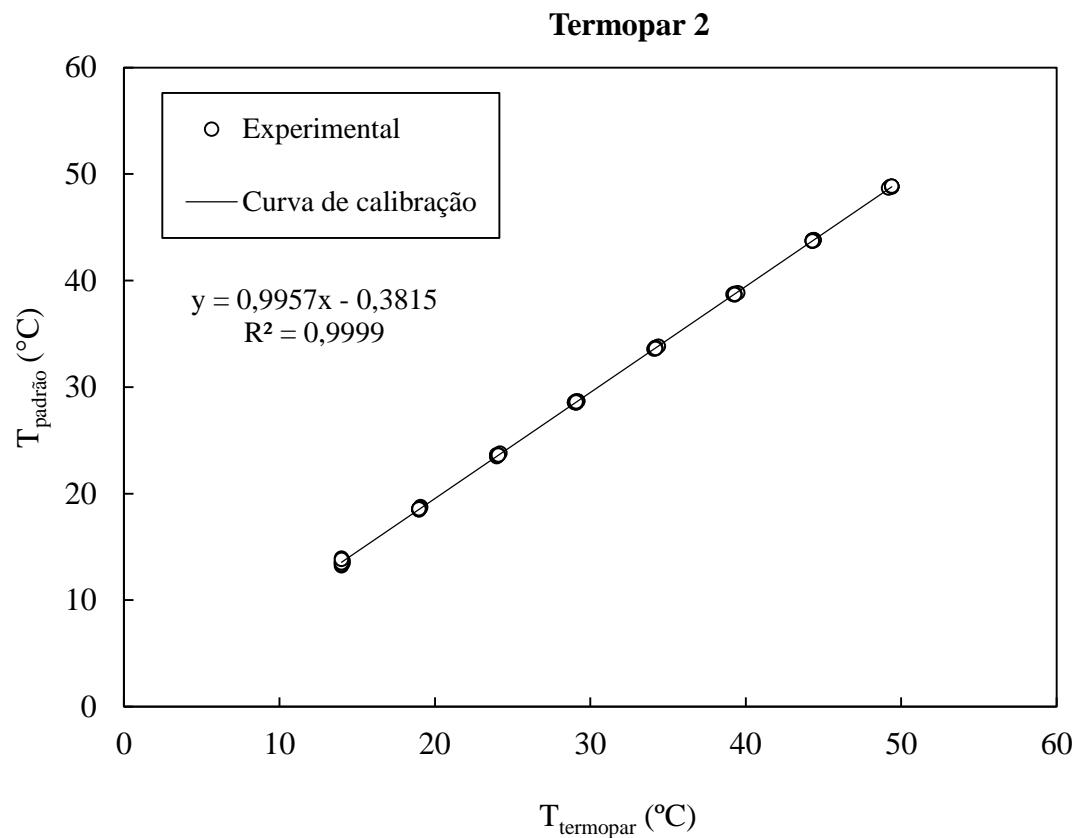
ANEXO B

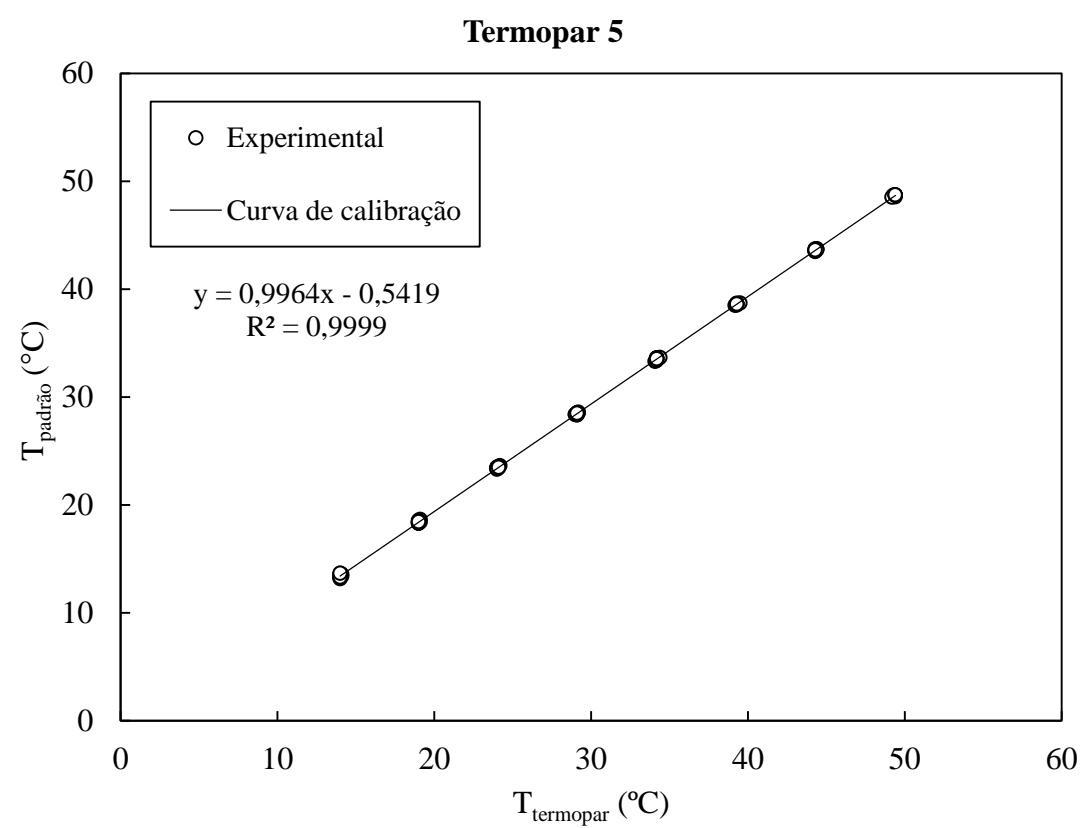
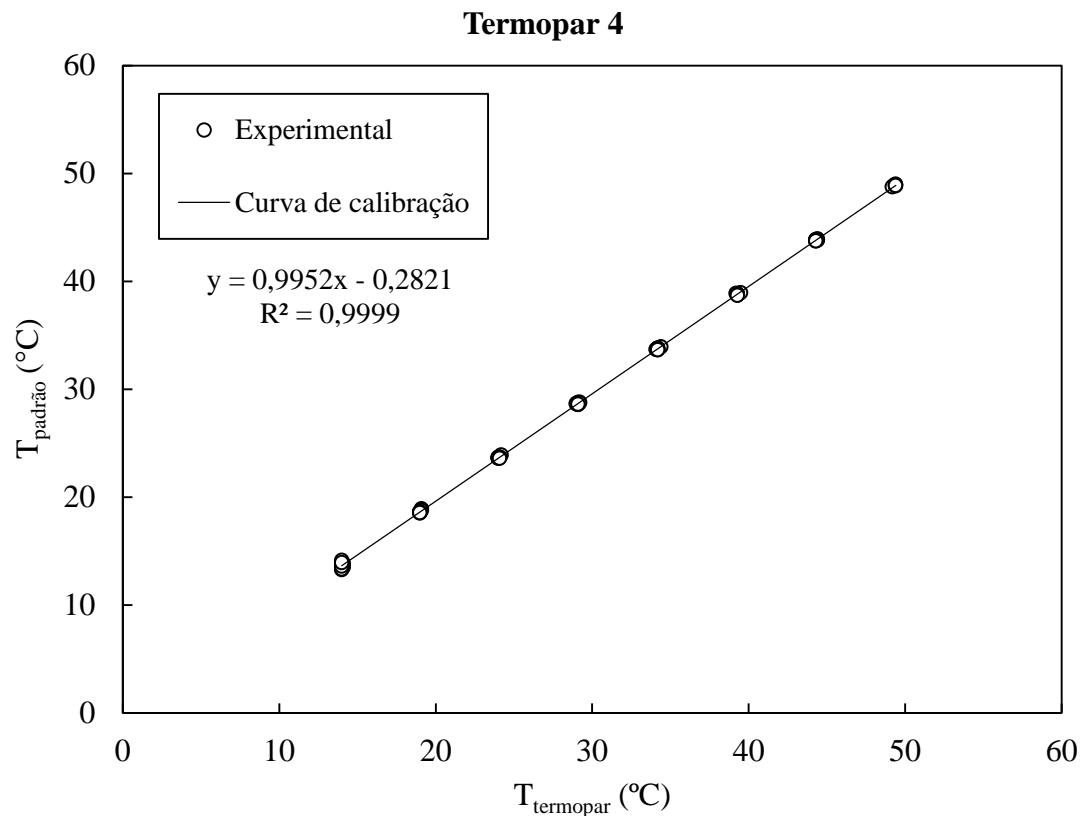
CALIBRAÇÃO

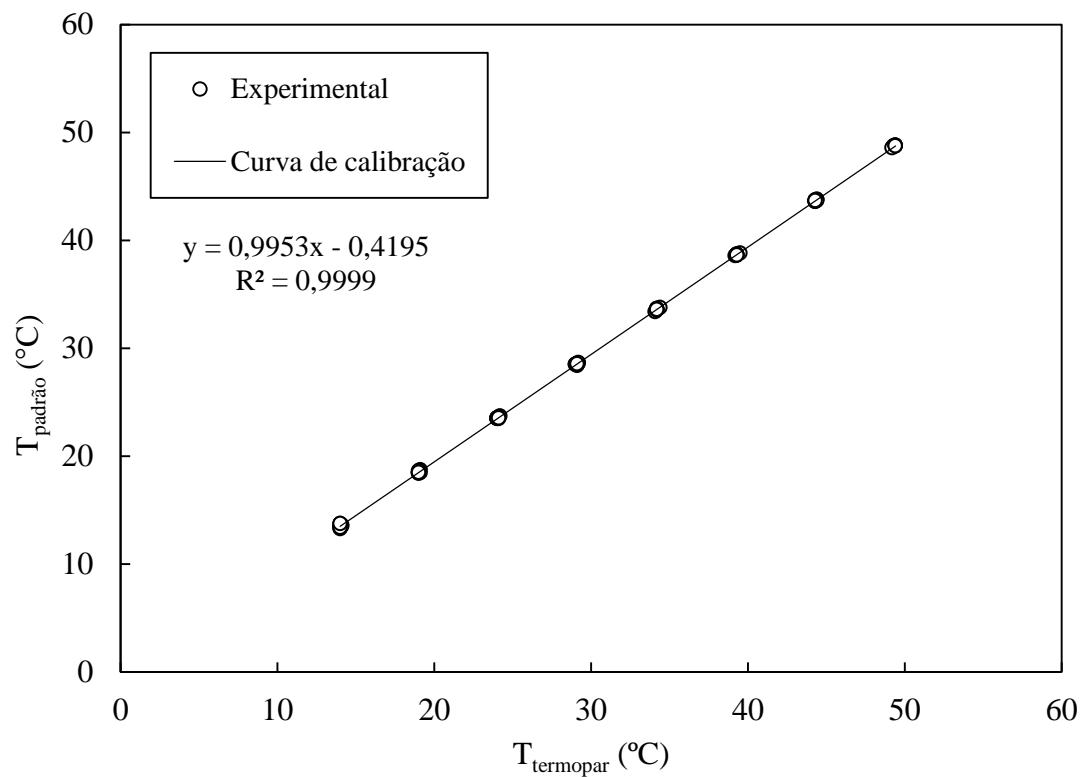
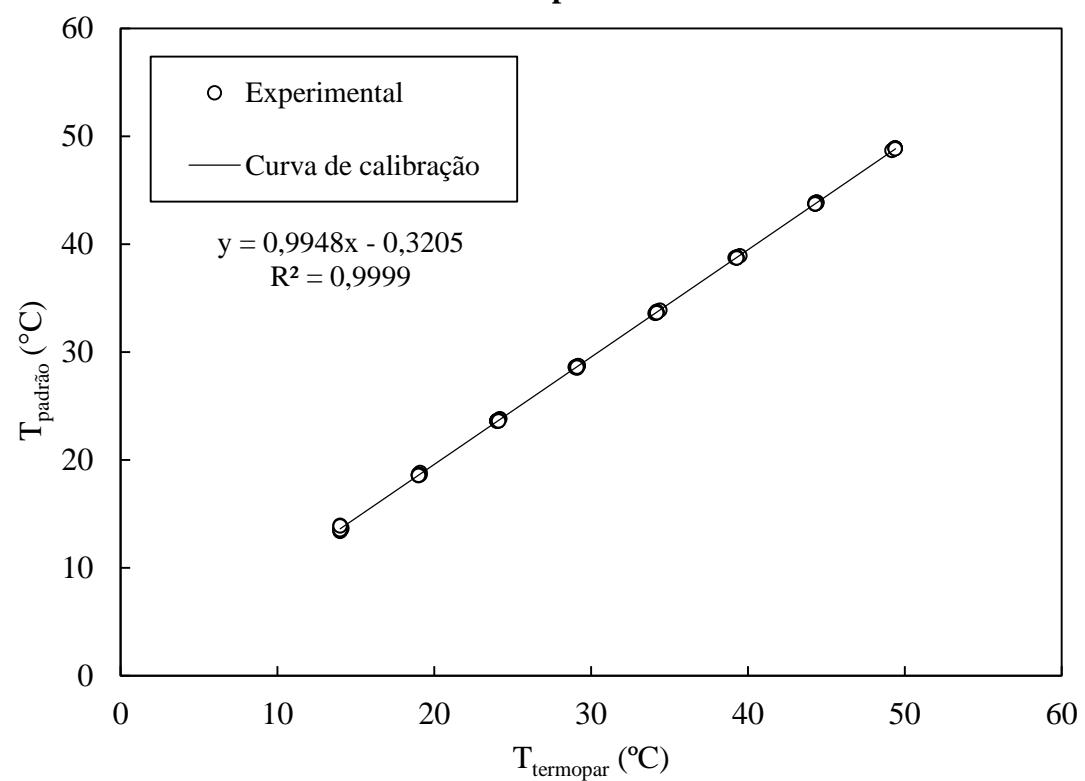
Os vinte e quatro termopares foram calibrados utilizando como referência um termômetro padrão, onde estes, foram emergidos em um banho térmico e variada a temperatura de 10 a 50 °C, com incremento de 5 °C. Os sinais dos termopares foram registrados por um sistema de placas de aquisição de dados da National Instruments, e o valor do termômetro padrão foi fornecido ao programa manualmente. A seguir são mostradas as curvas de calibrações obtidas.

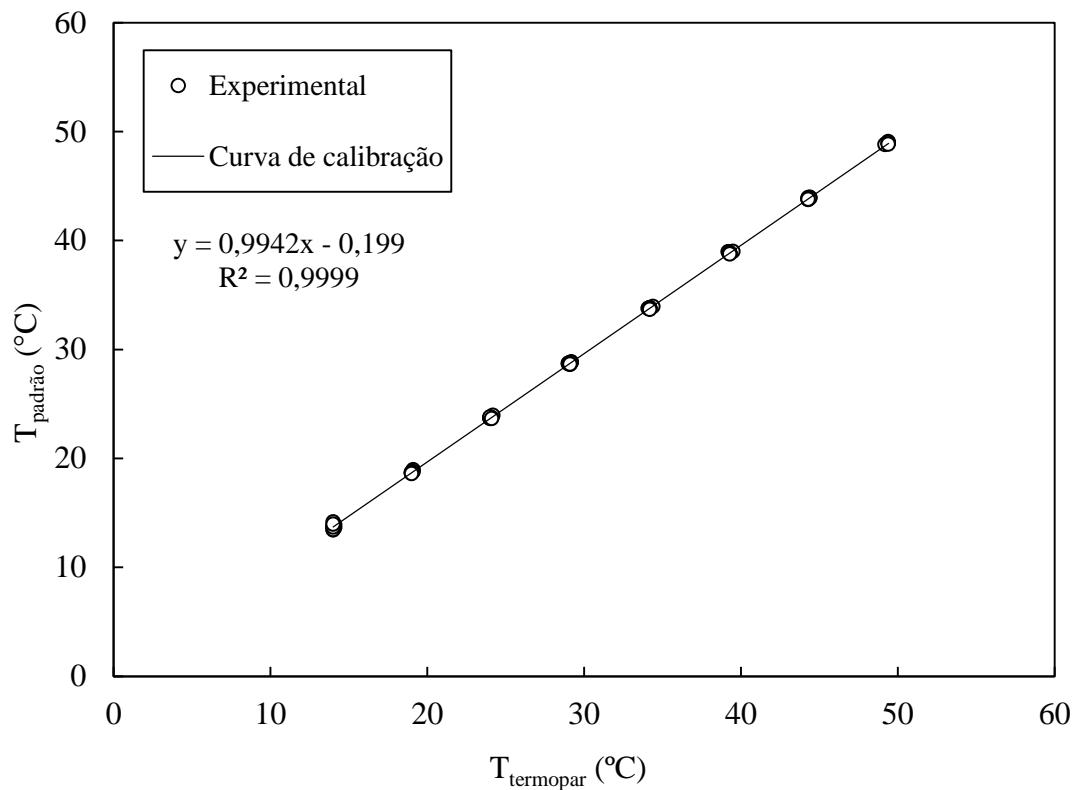
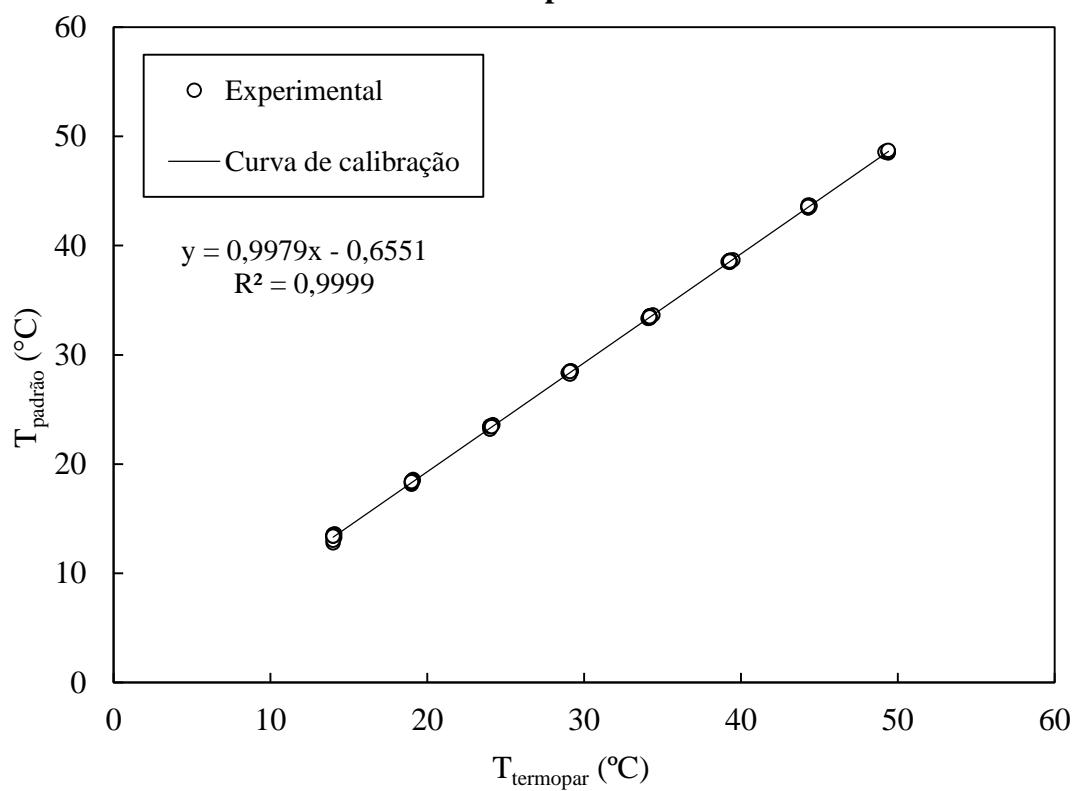
Termopar 1

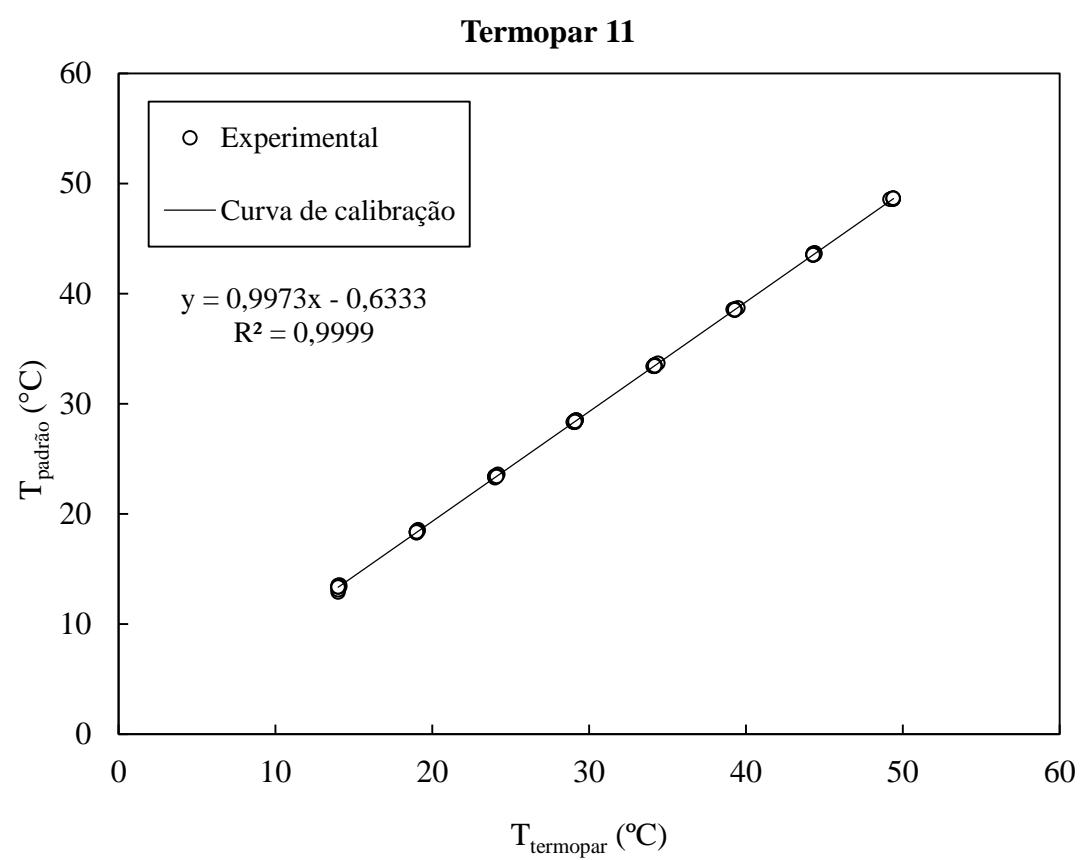
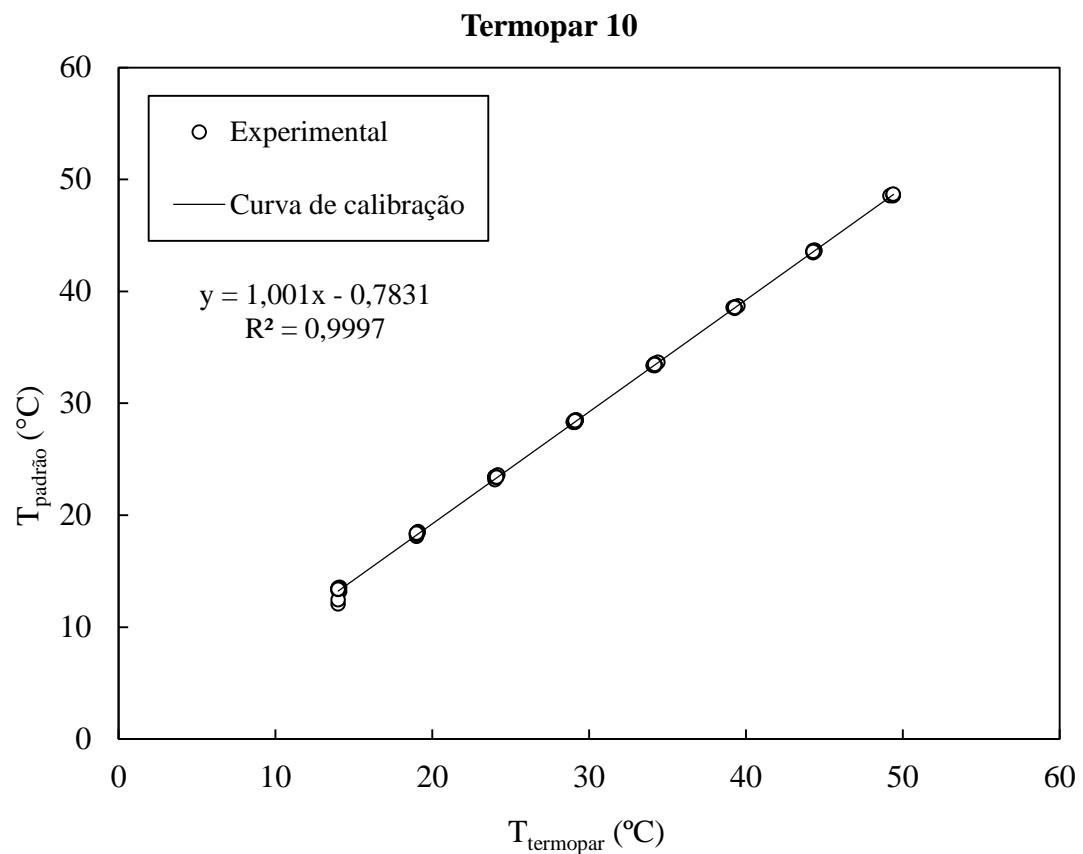


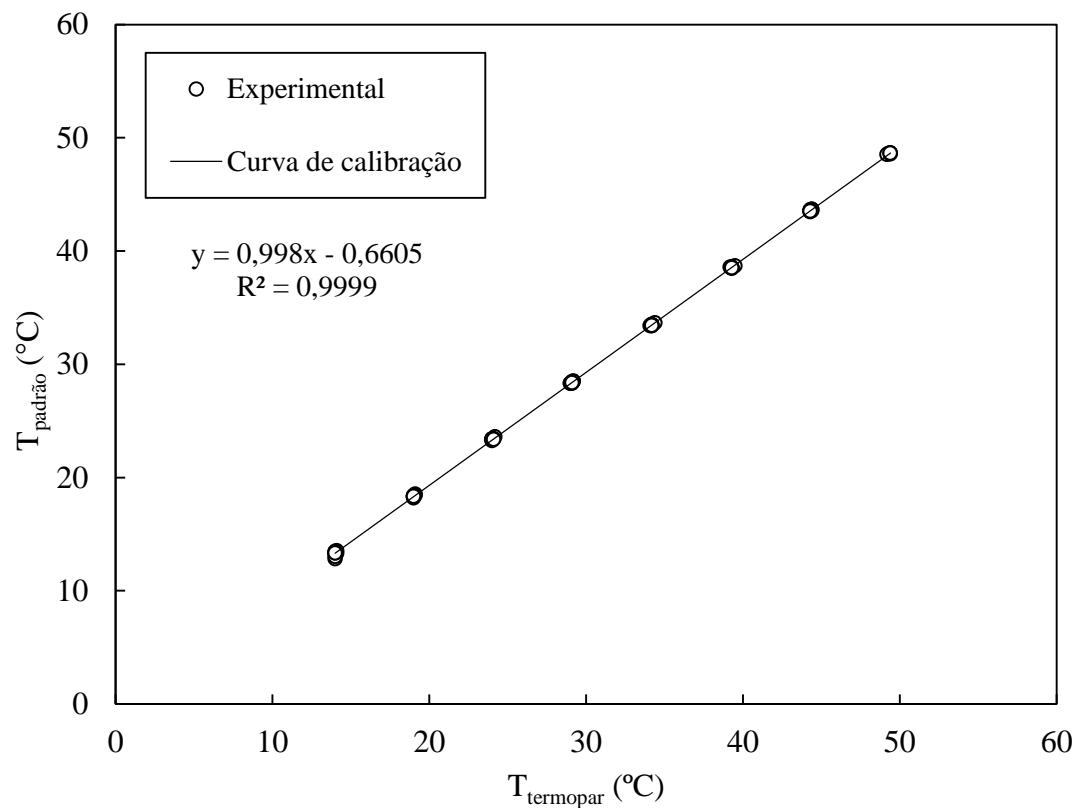
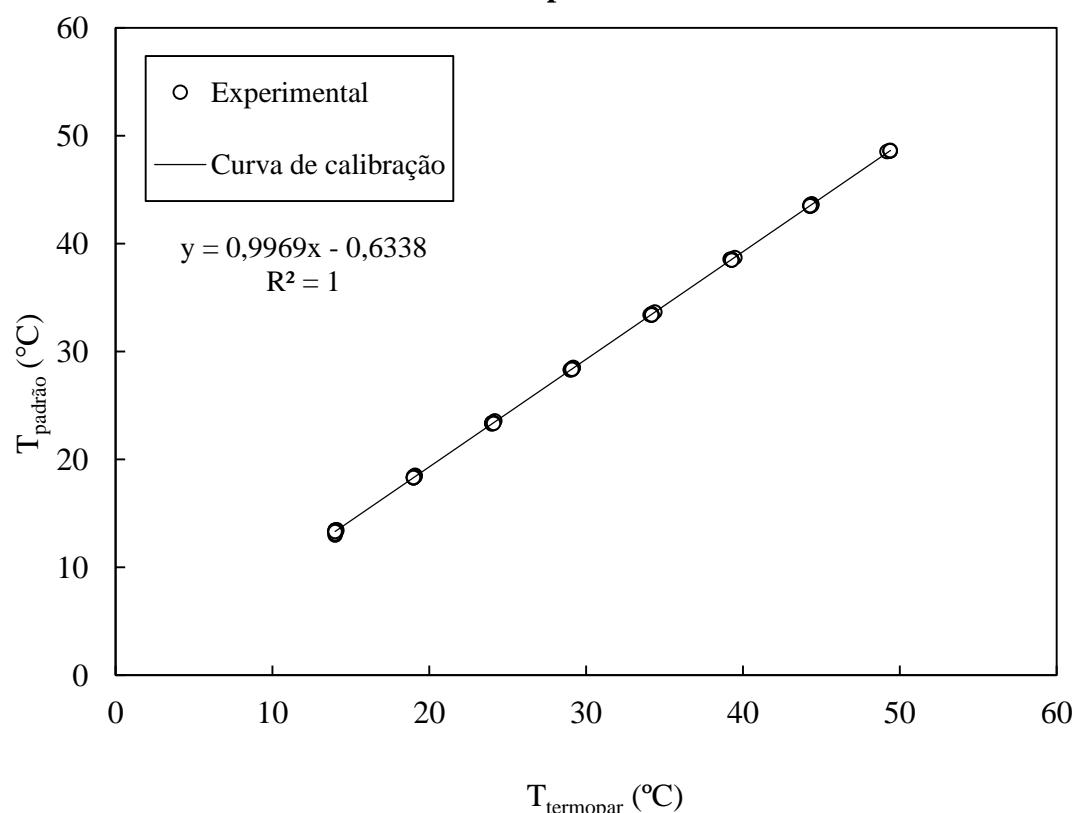


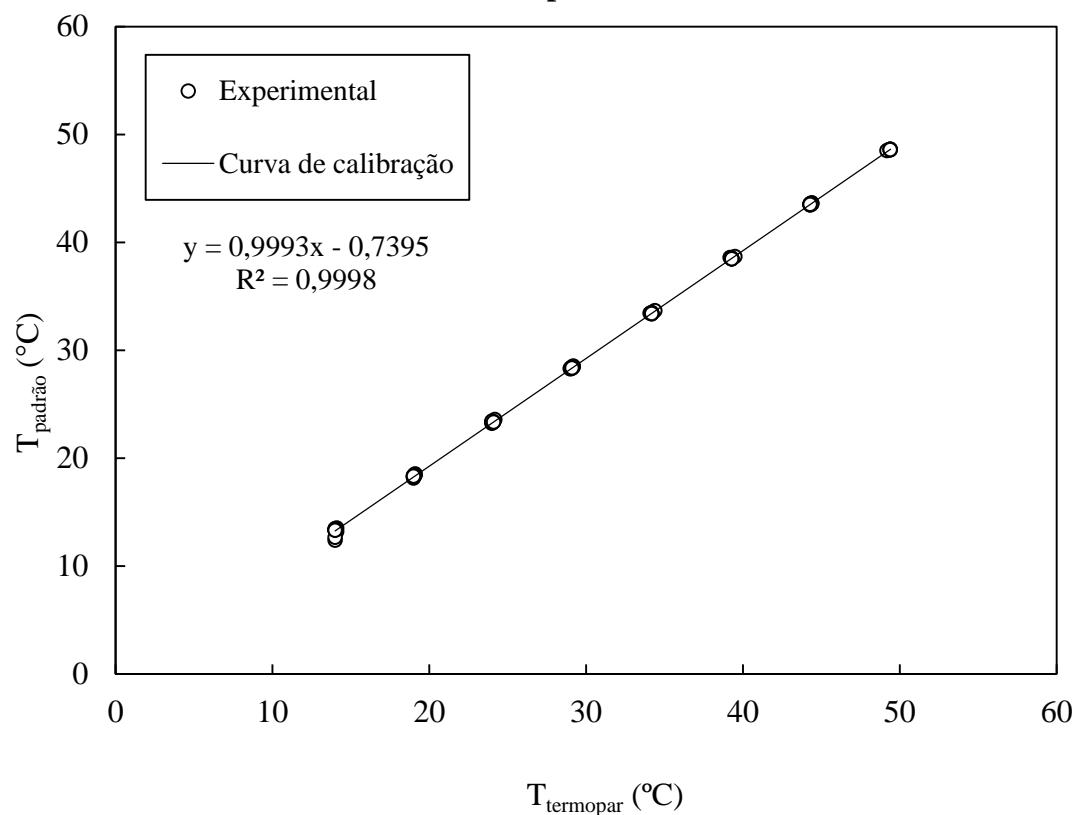
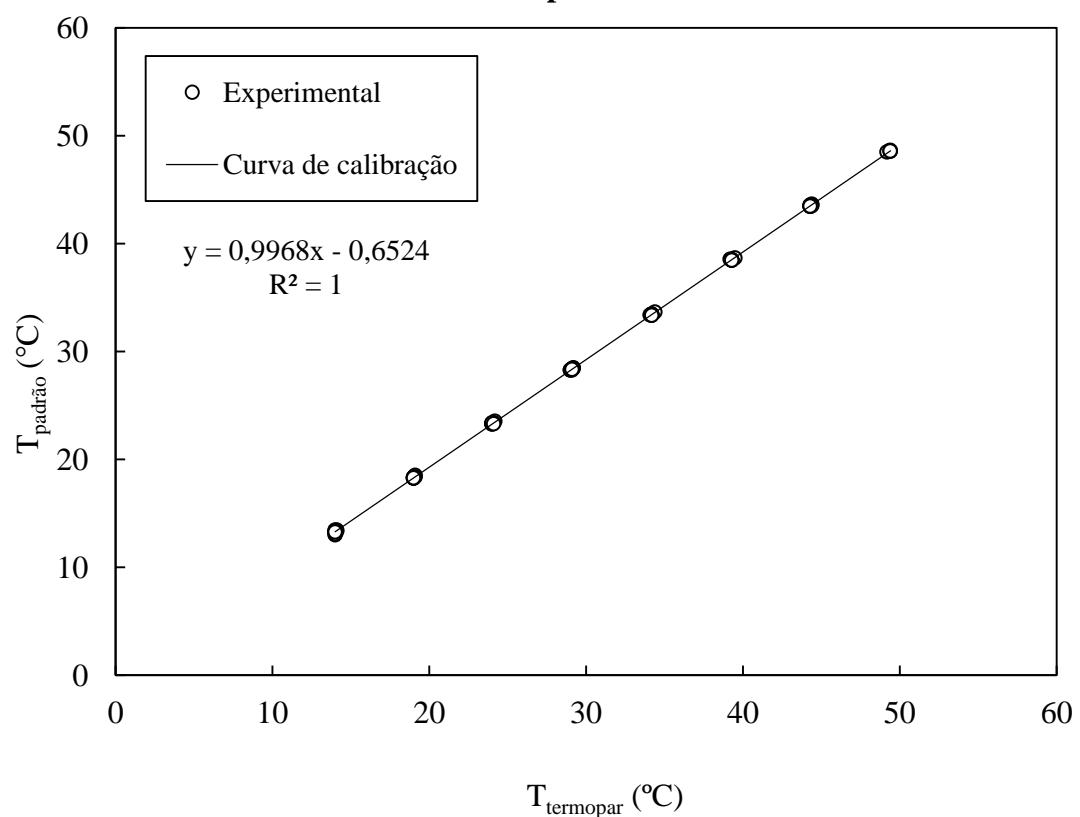


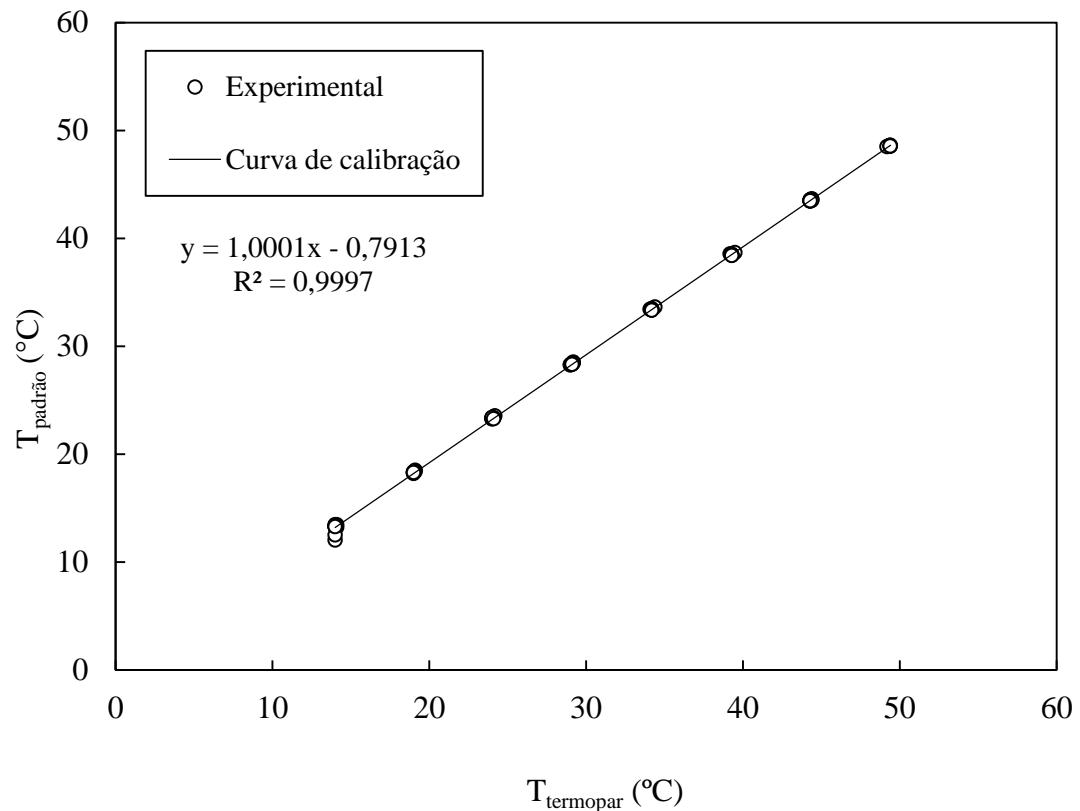
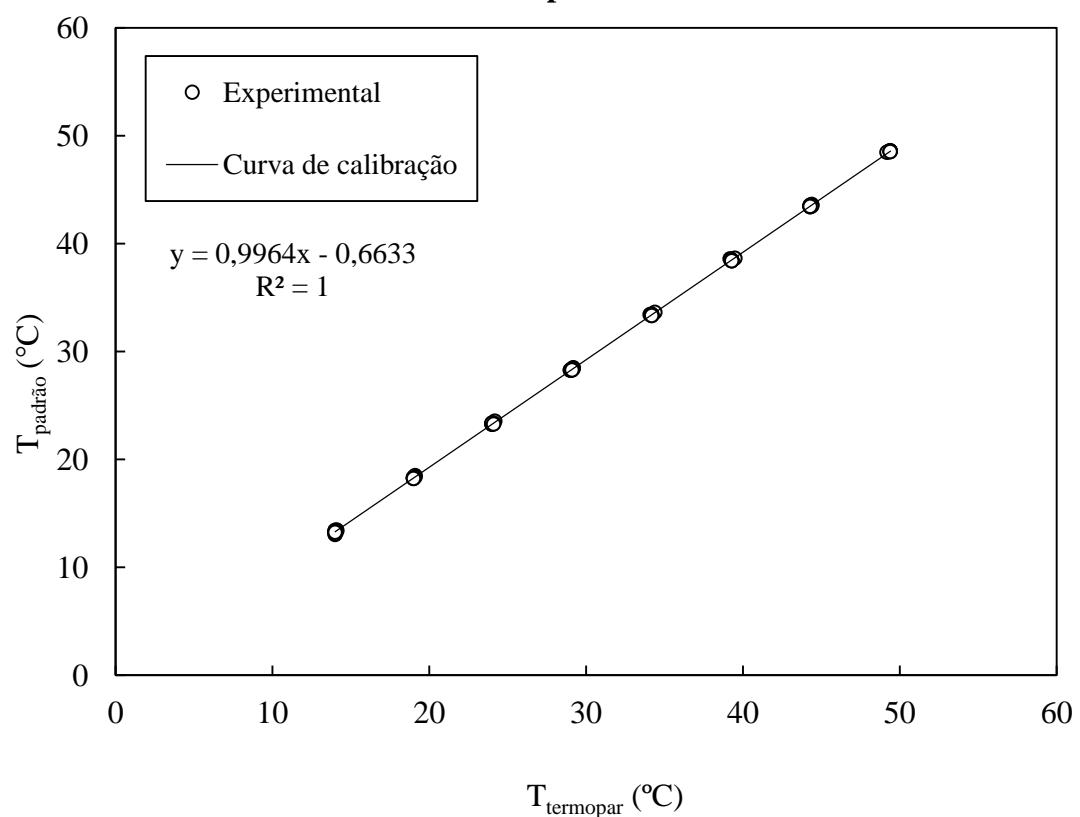
Termopar 6**Termopar 7**

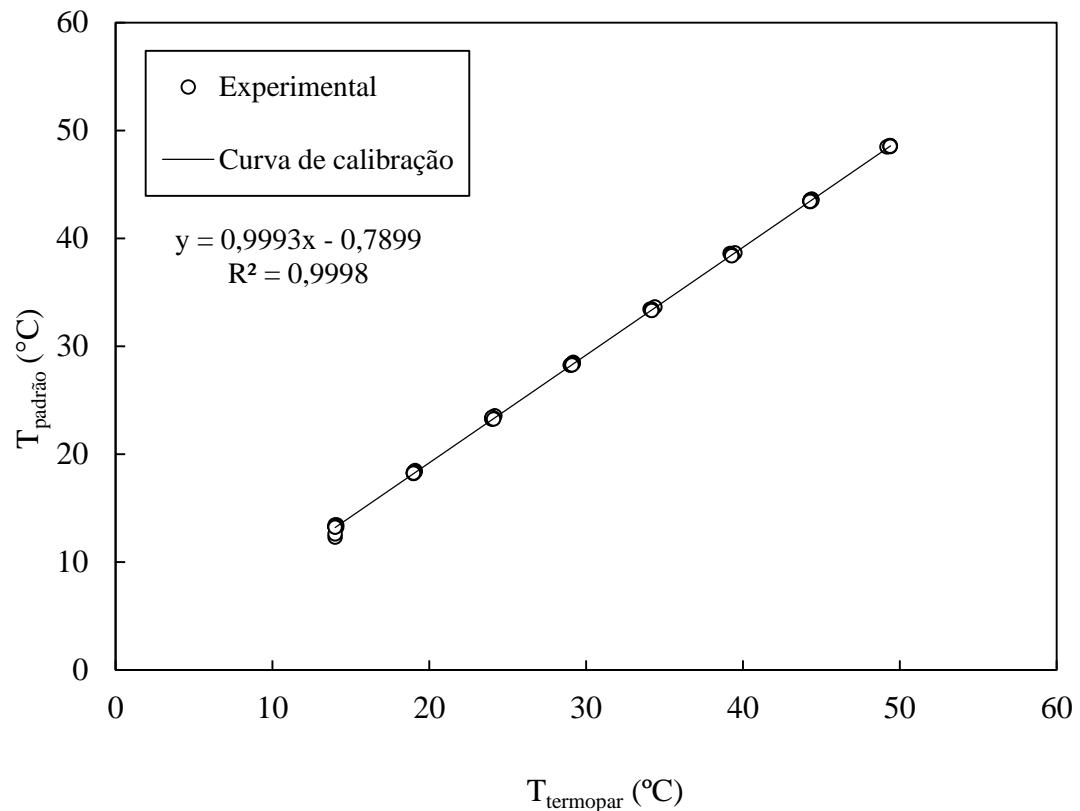
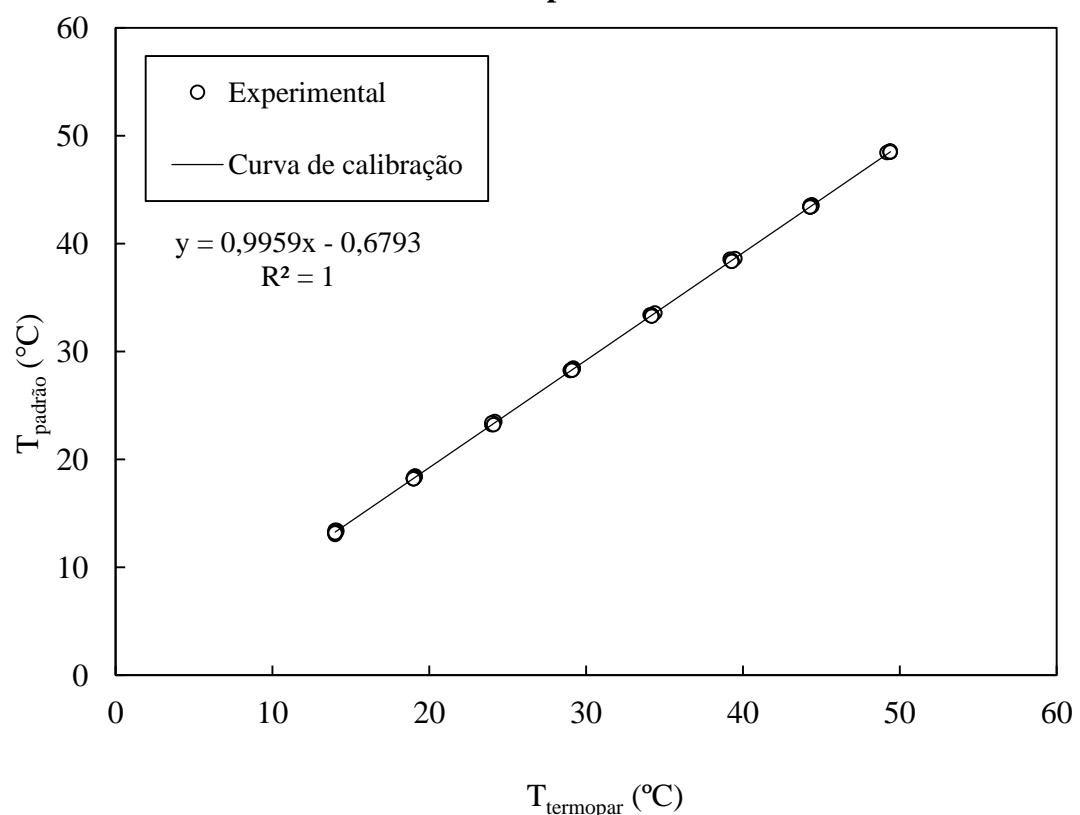
Termopar 8**Termopar 9**

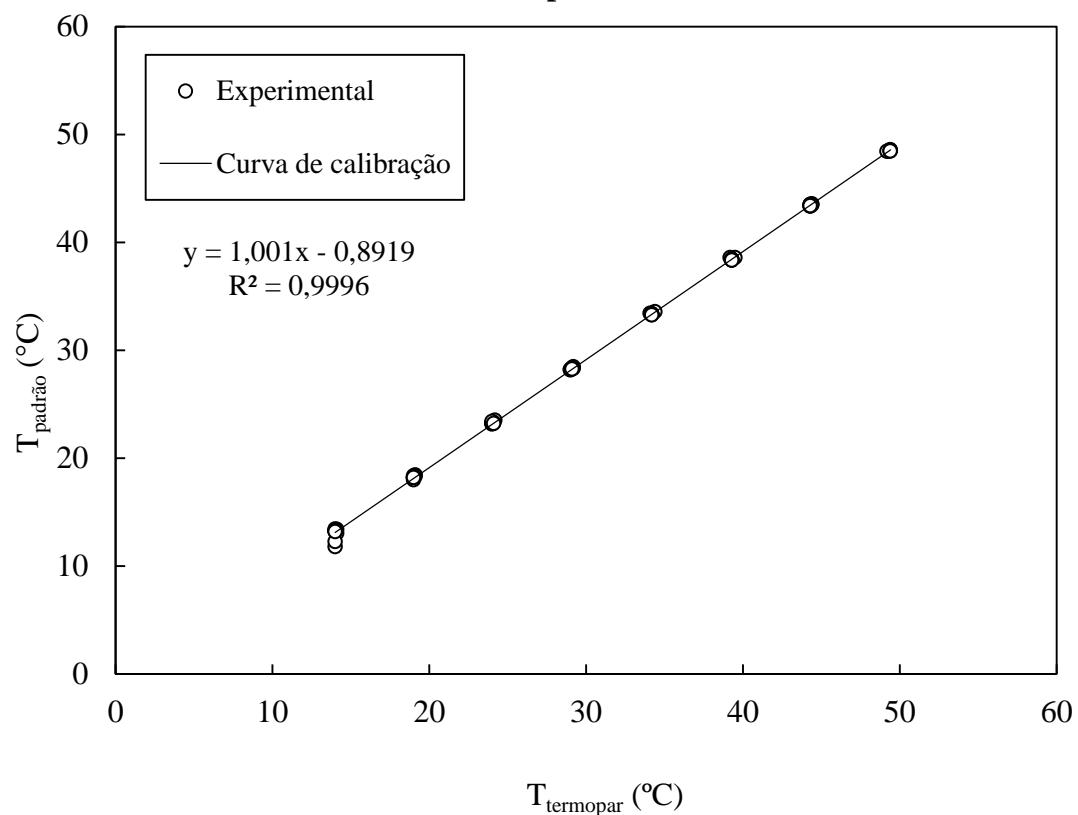
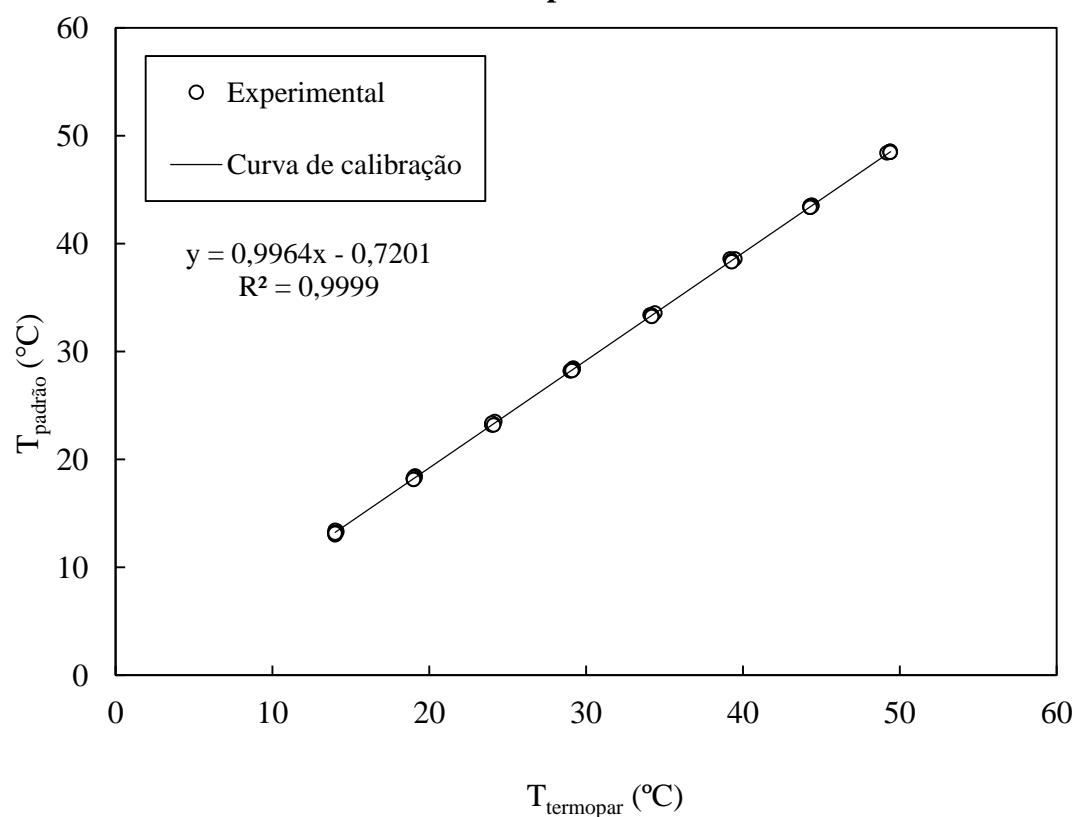


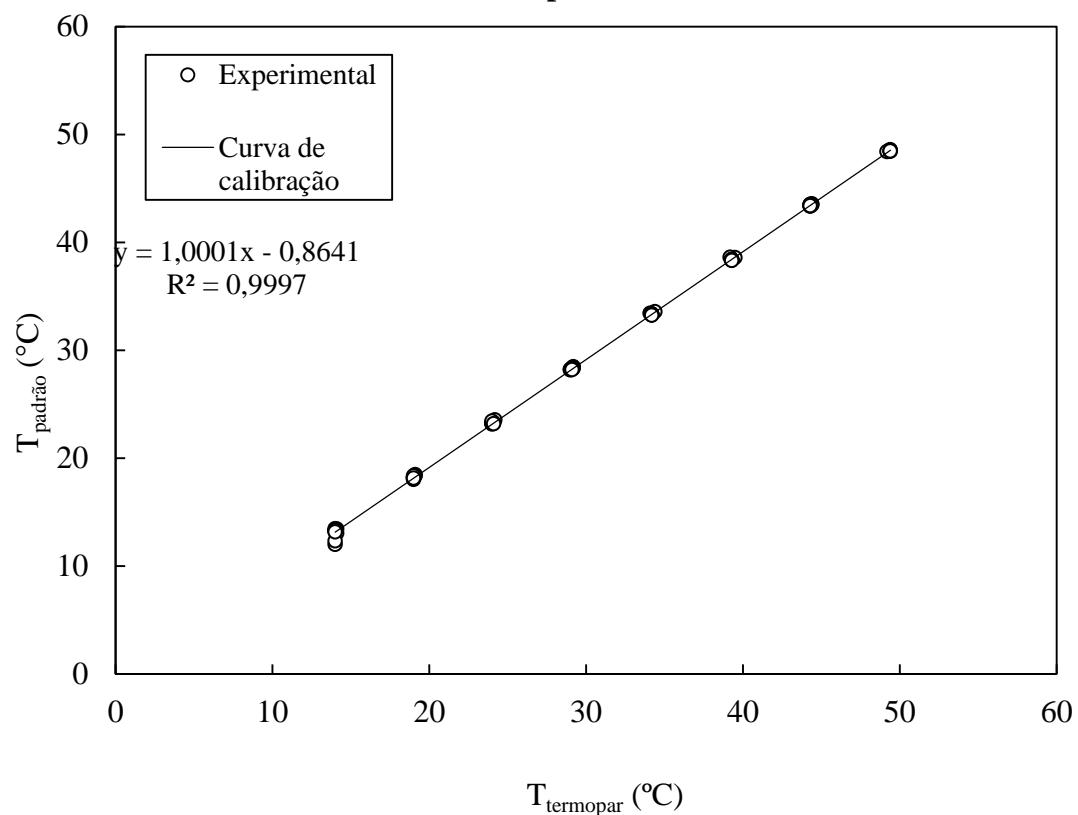
Termopar 12**Termopar 13**

Termopar 14**Termopar 15**

Termopar 16**Termopar 17**

Termopar 18**Termopar 19**

Termopar 20**Termopar 21**

Termopar 22**Termopar 23**