

**EDWIN MARTIN CÁRDENAS CONTRERAS**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO  
TERMOHIDRÁULICO DE NANOFLUIDOS DE  
GRAFENO EM UM SISTEMA DE ARREFECIMENTO  
AUTOMOTIVO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2017**

**EDWIN MARTIN CÁRDENAS CONTRERAS**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO  
TERMOHIDRÁULICO DE NANOFLUIDOS DE  
GRAFENO EM UM SISTEMA DE ARREFECIMENTO  
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**

**2017**

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

---

- C266a  
2017      Cárdenas Contreras, Edwin Martin, 1989-  
Avaliação experimental do desempenho termohidráulico de nanofluidos de grafeno em um sistema de arrefecimento automotivo / Edwin Martin Cárdenas Contreras. - 2017.  
125 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. Grafeno - Teses. 3. Nanofluidos - Teses. 4. Calor - Transmissão - Teses. I. Bandarra Filho, Enio Pedone. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

## DEDICATÓRIA

A **Deus** pelo dom da vida e as bênçãos recebidas a cada dia.

Minha amada família **Luis, Herminia e Diviana**, que apesar da distância sempre são e seguem sendo a fonte da minha inspiração para continuar perseguindo grandes desafios.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus pela força que coloca em mim para superar todos os desafios.

De maneira especial quero agradecer aos meus pais Luís Martin e Hermínia que com seu infinito amor e carinho sempre me motivaram para continuar em frente. Quero expressar também que são um grande exemplo de vida, por meio de seus esforços e horas dedicadas mostraram que a educação é o melhor caminho para conseguir o que cada pessoa quer. Agora estou me sentindo orgulhoso de dedicar este logro para eles.

A meu orientador o Prof. Dr. Enio Bandarra Filho exemplo de árduo trabalho, pela disponibilidade e paciência que teve na hora de orientar a minha pesquisa.

A Universidade Federal de Uberlândia e à Coordenação da Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, que contribuíram com o apoio e orientação para a realização desta pesquisa.

A meu grande amigo Abdul Cárdenas pela acolhida, apoio e orientação na minha chegada ao Brasil. Por me demonstrar que apesar das dificuldades sempre existe um sentimento de amizade que nos permite seguir acreditando que não estamos sozinhos.

A minha colega, conterrânea e parceira Luz Elena que junto com Abdul depositaram sua confiança em mim, e além de compartilhar comigo grandes jornadas de trabalho no laboratório são meus comparsas de convivência e desabafo.

A meu colega de pesquisa o Dr. Guilherme Azevedo que com seu conhecimento e experiência foi de total apoio em cada etapa realizada na pesquisa, dedicando seu tempo nas revisões e assessoramento do trabalho.

Aos meus colegas de laboratório que diretamente ou indiretamente contribuíram em minha formação e desenvolvimento na pesquisa.

Particularmente quero agradecer à Doutoranda Leticia Oliveira que sempre esteve disponível para qualquer dúvida, discussão ou mesmo na revisão do meu trabalho dando um grande aporte com suas sugestões.

Meus colegas e amigos do dia a dia, em especial David e Danilo por me acompanhar sempre na luta, aportando cada um nos tempos de fofoca diversas experiências culturais ou simplesmente conversas “ostentosas” que alegraram meus dias.

Ao Prof. Oscar Saul Hernandez por permitir-me viajar em suas diversas experiências de vida, recebendo do senhor um trato de neto. Obrigado por me acolher junto com sua família em meu segundo lar.

À empresa FIAT pelo apoio financeiro do projeto, permitindo uma integração academia-indústria que beneficia ambas partes e principalmente o desenvolvimento tecnológico do país.

À Capes, CNPQ e FAPEMIG, entidades de fomento que contribuem cada dia através do apoio financeiro com um aumento na qualidade da pesquisa.

Finalmente, quero agradecer ao Mauro Paipa e Denize Vilela, que com gentileza foram as pessoas que me receberam com os braços abertos na minha chegada ao Brasil, obrigado porque mesmo sem me conhecer me fizeram sentir em casa.

CÁRDENAS, E.M.C., **Avaliação experimental do desempenho termohidráulico de nanofluidos de grafeno em um sistema de arrefecimento automotivo**. 2017. 125 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Brasil.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma investigação experimental do desempenho termo-hidráulico do nanofluidos de grafeno a base de água ( $H_2O$ ) e etilenoglicol (EG) com uma concentração volumétrica (50% vol.) em radiadores automotivos. Os testes foram realizados em uma bancada experimental modificada e adaptada para simular as condições de trabalho de um sistema de arrefecimento automotivo real. Nanofluidos foram preparados em três concentrações volumétricas (0,01; 0,05 e 0,1%) e suas propriedades termofísicas como condutividade térmica, viscosidade e densidade foram medidas experimentalmente e comparadas com os principais modelos encontrados na literatura. A seção de testes foi dividida em dois circuitos de trabalho, um circuito quente (para o fluido de arrefecimento) e o circuito de ar. No circuito quente a vazão mássica do fluido variou entre 0,08 e 0,11 kg/s, apresentando regime de escoamento laminar e a temperatura de entrada variou na faixa de 55 até 85 °C. Para o circuito de ar a temperatura do mesmo incidente no radiador manteve-se constante em 25 °C para todos os testes. A velocidade do ar foi mantida constante em 2,1, 2,4 e 2,8 m/s. A partir de parâmetros calculados como taxa de transferência de calor, coeficiente global de transferência de calor e potência de bombeamento foi realizada uma análise do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos para sua possível utilização como fluido de arrefecimento com propriedades termofísicas melhoradas. Os resultados para as propriedades termofísicas mostraram um incremento de 9,2% na condutividade térmica para os nanofluidos de maior concentração, assim como aumentos na viscosidade e densidade de 13,5 e 0,55% respectivamente. Já para os parâmetros de desempenho termo-hidráulico, os resultados mostraram uma diminuição média de 2% para a maior concentração. A taxa de transferência de calor dos nanofluidos reduziu, em média, 9,6% para a amostra com  $\phi=0,05\%$  vol, e 3,37% para a amostra com  $\phi=0,10\%$  vol. Finalmente, a potência de bombeamento para os nanofluidos apresentaram incrementos, em média 2% quando comparados com o fluido base.

---

Palavras chave: Desempenho termo-hidráulico, Grafeno, Nanofluido, Radiador automotivo, Transferência de calor.

CÁRDENAS, E.M.C., **Experimental thermal-hydraulic performance evaluation of nanofluido graphene in automotive cooling system**. 2017. 125 f. M. Sc. Dissertation, Federal University Uberlândia, Uberlândia – Brazil.

## ABSTRACT

This work presents an experimental investigation of the thermal-hydraulic performance of water-based ethylene glycol nanofluids with a volumetric concentration (50% vol.) in automotive radiators. The tests were performed on a modified experimental workbench and adapted to simulate the working conditions of a real automotive cooling system. Nanofluids were prepared at three different volumetric concentrations (0.01, 0.05 and 0.1%). Thermophysical properties such as thermal conductivity, viscosity and density were measured experimentally and compared to models found in the literature. The test section was divided into two working circuits, hot circuit (cooling fluid) and air circuit. In the hot circuit, the mass flow rate varied between 0.08 and 0.11 kg/s, presenting a laminar flow regime and the inlet temperature ranged from 55 to 85 °C. For the air circuit, the temperature of the incident air on the radiator remained constant at 25 °C for all tests. The air velocity was maintained constant at 2.1, 2.4 and 2.8 m/s. From the calculated parameters such as heat transfer rate, global heat transfer coefficient and pumping power, an analysis was conducted of the thermal-hydraulic performance of nanofluids for their possible use as cooling fluid with improved thermophysical properties. The results for thermophysical properties showed an increase of 9.2% in the thermal conductivity for nanofluids with higher concentration as well as the viscosity and density increased 13.5 and 0.55%, respectively. In terms of thermal-hydraulic performance, the results showed a reduction of 2% in average for the highest concentration tested. The heat transfer rate of the nanofluids was 9.6% lower than the base fluid for  $\phi=0.05\%$  vol, and 3.37% lower for  $\phi=0.10\%$  vol. Finally, the pumping power for the nanofluids increased 2%, in average, compared to the base fluid.

---

Keywords: Thermal-hydraulic performance, Graphene, Nanofluid, Automotive radiator, Heat transfer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Condutividade térmica dos materiais. Adaptada de (WEN et al., 2009).....	6
Figura 2.2 - Estruturas obtidas a partir do grafeno, da esquerda para direita: fulereno, nanotubos de carbono e grafite.....	8
Figura 2.3 - Número de artigos por ano, conforme relatado pela base de dados da ScienceDirect ( <a href="http://www.sciencedirect.com/">http://www.sciencedirect.com/</a> ), a partir de 2010 e atualizado para o ano 2016 recuperado através da palavra-chave " nanofluid "e" graphene " No tópico do artigo.....	9
Figura 2.4 - Estrutura típica de uma nanopartícula. Adaptada de (DAS et al., 2007). 10	
Figura 2.5 - Procedimento de preparação de nanofluidos pelo método de dois passos. ...	14
Figura 2.6 - Fatores que influenciam na medição da condutividade térmica de nanofluidos.....	15
Figura 2.7 - Diferentes técnicas de medição de condutividade térmica para nanofluidos. 25	
Figura 3.1 - Esquema básico para o processo de homogeneização de alta pressão. ....	42
Figura 3.2 - Imagens obtidas por MET do grafeno que mostram: (a) sua estrutura e (b) sua espessura. ....	43
Figura 3.3 - Equipamento em operação para um processo de homogeneização de alta pressão. ....	44
Figura 3.4 - (a) Amostras no momento da preparação. (b) Amostras após 30 dias da preparação.....	46
Figura 3.5 - Sensor THB-1 (medição de condutividade térmica). Disponível em ( <a href="https://www.linseis.com/en/our-products/thermal-diffusivity-thermal-conductivity/thbtransient-hot-bridge/">https://www.linseis.com/en/our-products/thermal-diffusivity-thermal-conductivity/thbtransient-hot-bridge/</a> ). (LINSEIS THERMAL ANALYSIS, 2012).....	47
Figura 3.6 - (a) Banho térmico, (b) aparato experimental para medição de condutividade térmica.....	48

Figura 3.7 - Configuração experimental para medição da condutividade térmica.....	49
Figura 3.8 - Interface do software Linseis THB-1 na medição de condutividade térmica ..	50
Figura 3.9 - Célula de medição da viscosidade.....	51
Figura 3.10 - Equipamento experimental SVM 3000 utilizado para a medição de viscosidade .....	51
Figura 3.11 - Diagrama esquemático da bancada experimental para trocadores de calor em escoamento cruzado (radiador).....	53
Figura 3.12 - (a) microbomba e motor (b) banho termostático.....	54
Figura 3.13 - Montagem do circuito para o fluido de arrefecimento.....	55
Figura 3.14 - Desenho esquemático do posicionamento dos termopares no túnel de vento.....	56
Figura 3.15 - Vistas da placa de bocais: (a) a montante, e, (b) a jusante.....	57
Figura 3.16 - Esquema do túnel de vento utilizado nos ensaios.....	59
Figura 3.17 - Interface homem-máquina para monitoramento e controle dos testes experimentais.....	60
Figura 3.18 - Montagem completa bancada experimental.....	61
Figura 3.19 - Volume de controle para balanço de energia no radiador.....	64
Figura 4.1– Comparação e validação dos valores experimentais da densidade obtidos para o fluido base (H <sub>2</sub> O:EG 50% vol.). .....	72
Figura 4.2 – Comportamento experimental da densidade de nanofluidos de grafeno/(H <sub>2</sub> O:EG 50%) com a temperatura.....	73
Figura 4.3 - Incremento da densidade de nanofluido em função da concentração volumétrica de nanopartículas.....	74
Figura 4.4 - Variação do calor específico de nanofluidos de grafeno/(H <sub>2</sub> O:EG 50%) com a temperatura.....	75

Figura 4.5 - Comparação e validação dos valores experimentais para viscosidade dinâmica obtidos para o fluido base (H <sub>2</sub> O:EG 50% vol.).	76
Figura 4.6 - Variação da viscosidade de nanofluidos de grafeno/(H <sub>2</sub> O:EG 50% vol.) com a temperatura.	77
Figura 4.7 - Variação da viscosidade de nanofluidos de grafeno/(H <sub>2</sub> O:EG 50% vol.) com a concentração volumétrica.	78
Figura 4.8 - Validação dos valores experimentais de condutividade térmica obtidos para o fluido base (H <sub>2</sub> O:EG 50% vol.).	79
Figura 4.9 - Condutividade térmica experimental de nanofluidos de grafeno em (H <sub>2</sub> O/EG 50% vol.) em diferentes concentrações.	80
Figura 4.10 - Comparação entre os resultados experimentais de nanofluido de grafeno (0,05% vol.), com modelos de correlação.	81
Figura 4.11 - Balanço de energia para bancada funcionando com H <sub>2</sub> O/EG (50% vol.).	82
Figura 4.12 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor teórico e experimental para H <sub>2</sub> O/EG (50% vol.) em uma temperatura de 65 °C.	82
Figura 4.13 - Taxa de transferência de calor para nanofluidos de grafeno em diferentes vazões mássicas para uma temperatura de entrada no radiador de 55°C.	85
Figura 4.14 - Taxa de transferência de calor para nanofluidos de grafeno em diferentes vazões mássicas para uma temperatura de entrada no radiador de 65°C.	86
Figura 4.15 - Taxa de transferência de calor para nanofluidos de grafeno em diferentes vazões mássicas para uma temperatura de entrada no radiador de 75°C.	87
Figura 4.16 - Taxa de transferência de calor para nanofluidos de grafeno em diferentes vazões mássicas para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C.	88
Figura 4.17 - Condutância térmica de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C.	89
Figura 4.18 - Condutância térmica de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C.	90

Figura 4.19 - Condutância térmica de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C. ....	91
Figura 4.20 - Condutância térmica de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C. ....	92
Figura 4.21 - Potência de bombeamento relativa de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 55°C. ....	93
Figura 4.22 - Potência de bombeamento relativa de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 65°C. ....	94
Figura 4.23 - Potência de bombeamento relativa de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 75°C. ....	95
Figura 4.24 - Potência de bombeamento relativa de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C. ....	96
Figura 4.25 - Coeficiente de desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de grafeno em função da vazão mássica diferente vazões mássicas. ....	97
Figura 4.26 - Coeficiente de desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de grafeno em função da concentração de nanopartículas. ....	98
Figura 4.27 - Resultados experimentais de (PEYGHAMBARZADEH et al., 2013) e (M'HAMED et al., 2016). (a) Coeficiente global de transferência de calor para os nanofluidos de concentração 0,15%. (b) incremento na transferência de calor para Nanotubos de carbono (MWCNT). ....	99
Figura 4.28 - Resultados experimentais obtidos por (AMIRI et al., 2016) para desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de grafeno. ....	100
Figura 4.29 - Resultados experimentais obtidos por (SELVAM et al., 2016) para o aumento na condutividade térmica de nanofluidos de grafeno. ....	101
Figura 4.30 - Resultados experimentais obtidos por (TENG; YU, 2013) na medida de viscosidade dinâmica de nanofluidos de nanotubos de carbono. ....	102

Figura 4.31 - Resultados experimentais obtidos por (TENG et al., 2015) na potência de bombeamento para nanofluidos de nanotubos de carbono.....	103
Figura A1. 1 - Diagrama operação da bancada experimental.....	119
Figura A2. 1 - Curva calibração termopares 1 e 2. ....	120
Figura A2. 2 - Curva calibração termopares 3 e 4. ....	121
Figura A2. 3 - Curva calibração termopares 5 e 6. ....	121
Figura A2. 4- Curva calibração termopares 7 e 8. ....	121
Figura A2. 5 - Curva calibração termopares 9 e 10. ....	122
Figura A2. 6 - Curva calibração termopares 11 e 12. ....	122
Figura A2. 7 - Curva calibração termopares 13 e 14. ....	122
Figura A2. 8 - Curva calibração termopares 15 e 16. ....	123
Figura A2. 9 - Curva calibração termopares 17 e 18. ....	123
Figura A2. 10 - Curva calibração termopares 19 e 20. ....	123
Figura A2. 11 - Curva calibração termopares 21 e 22. ....	124
Figura A2. 12 - Curva calibração termopares 23 e 24. ....	124
Figura A3. 1 - Interface gráfica Software LabVIEW para monitoramento e controle de dados. ....	125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Modelos desenvolvidos para a condutividade térmica de nanofluidos.....	22
Tabela 2.2 - Resultados experimentais de condutividade térmica em nanofluidos.....	26
Tabela 2.3 - Modelos analíticos e empíricos para estimar a viscosidade dos nanofluidos ...	31
Tabela 2.4 - Resultados experimentais de viscosidade em nanofluidos.....	33
Tabela 2.5 - Resumo dos estudos numérico e experimentais de nanofluido para sistemas de arrefecimento.....	38
Tabela 3.1 - Propriedades da solução de grafeno/ H <sub>2</sub> O.....	42
Tabela 3.2 - Concentração das amostras de nanofluido após produção.....	45
Tabela 3.3 - Variáveis lidas pelo sistema de aquisição de dados.....	60
Tabela 3.4 - Condições de ensaio no presente trabalho .....	62
Tabela 3.5 - Incerteza dos parâmetros medidos .....	69
Tabela 3.6 - Incerteza parâmetros calculados.....	70
Tabela 4.1 - Comparação entre a densidade experimental e teórica dos nanofluidos.....	74
Tabela 4.2 - Comparação entre a viscosidade dinâmica experimental e teórica do nanofluido para T=65 °C.....	78
Tabela 4.3 - Taxa de transferência da calor relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 55°C.....	84
Tabela 4.4 - Taxa de transferência da calor relativo para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 65°C.....	85
Tabela 4.5 - Taxa de transferência da calor relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 75°C.....	86

Tabela 4.6 - Taxa de transferência da calor relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C. ....	87
Tabela 4.7 - Condutância térmica relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C e vazão mássica 0,08 kg/s.....	89
Tabela 4.8 - Condutância térmica relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C e vazão mássica 0,09 kg/s.....	90
Tabela 4.9 - Condutância térmica relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C e vazão mássica 0,1 kg/s.....	91
Tabela 4.10 - Condutância térmica relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C e vazão mássica 0,11 kg/s.....	92
Tabela 4.11 - Potência de bombeamento relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 55°C. ....	93
Tabela 4.12 - Potência de bombeamento relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 65°C. ....	94
Tabela 4.13 - Potência de bombeamento relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 75°C. ....	95
Tabela 4.14 - Potência de bombeamento relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C. ....	96

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Letras Latinas

$A$	- Área [m <sup>2</sup> ]
$Ar$	- Ar
$Cd$	- Coeficiente de descarga
$Cp$	- Calor específico [kJ/kg-K]
$d$	- Diâmetro [m]
$h$	- Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m <sup>2</sup> K]
$k$	- Condutividade térmica [W/mK]
$L$	- Comprimento [m]
$\ln$	- logaritmo natural
$m$	- Massa [kg]
$\dot{m}$	- Vazão mássica [kg]
$n$	- Fator de forma
$P$	- Pressão [kPa]
$pH$	- Potencial hidrogeniônico
$pI$	- Potencial isoelétrico
$\dot{Q}$	- Taxa de transferência de calor [W]
$r$	- raio [m]
$sp^2$	- Orbital eletrônico híbrido
$t$	- Tempo [s]
$T$	- temperatura [°C]
$U$	- Coeficiente global de transferência de calor [W/m <sup>2</sup> K]

$UA$	- Condutância térmica [W/K]
$V$	- Volume [m <sup>3</sup> ]
$v_c$	- Volume de controle
$Vel$	- Velocidade [m/s]
$Vol.$	- Concentração em volume
$W$	- Potência de bombeamento
$wt$	- Concentração em massa

### Letras Gregas

$\varphi$	- Concentração
$\beta$	-- Fator geométrico
$\rho$	- Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	- Viscosidade dinâmica [mPa.s]
$\Delta P$	- Diferencial de pressão [kPa]
$\Delta T$	- Diferencial de Temperatura [°C]
$\eta$	- Coeficiente de desempenho

### Número dimensionais

$Nu$	-Número Nusselt
$Pr$	- Número Prandtl
$Re$	- Número Reynolds

**Subscritos**

<i>bf</i>	- Fluido base
<i>bu</i>	- Bulbo úmido
<i>eff</i>	- Efetivo
<i>exp</i>	- Experimental
<i>f</i>	- Frio
<i>h</i>	- Hidráulico
<i>in</i>	- Entrada
<i>int</i>	- Interna
<i>liq</i>	- Liquido
<i>lm</i>	- Logarítmico
<i>lr</i>	- Camada interfacial
<i>m</i>	- meio
<i>nf</i>	- Nanofluido
<i>np</i>	- Nanopartícula
<i>q</i>	- quente
<i>sai</i>	- Saída
<i>sol</i>	- Solução

**Abreviações**

<i>CNT</i>	- Nanotubos de carbono
<i>EG</i>	- etilenoglicol
<i>EMT</i>	- Teoria médio efetivo

<i>LEST-NANO</i>	- Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia
<i>MWCNT</i>	- Nanotubos de carbono de parede múltipla
<i>NG1</i>	- Amostra 1
<i>NG2</i>	- Amostra 2
<i>NG3</i>	- Amostra 3
<i>SANSS</i>	- arco submerso para síntese de nanopartículas
<i>UFU</i>	Universidade Federal de Uberlândia

# SUMARIO

CAPITULO I.....	1
Introdução.....	1
1.1.    Motivação .....	1
1.2.    Objetivos.....	2
1.3.    Organização do texto .....	3
CAPITULO II.....	5
Revisão Bibliográfica .....	5
2.1.    Nanofluidos.....	5
2.2.    Grafeno.....	8
2.3.    Produção de nanofluidos.....	10
2.4.    Condutividade Térmica .....	14
2.4.1. Fatores que influenciam na medida da condutividade térmica.....	15
2.4.2. Correlações para estimação da condutividade térmica .....	20
2.4.3. Medição de condutividade térmica .....	24
2.5.    Viscosidade.....	27
2.5.1. Fatores que influenciam na medida de viscosidade .....	27
2.5.2. Correlações para estimar a viscosidade em nanofluidos .....	29
2.6.    Nanofluidos em sistemas de arrefecimento automotivo.....	33
CAPITULO III.....	41
Materiais e métodos .....	41
3.1.    Síntese e caracterização de nanofluidos.....	41
3.2.    Medição das propriedades termofísicas dos nanofluidos .....	46

3.2.1. Condutividade Térmica.....	46
3.2.2. Viscosidade.....	50
3.3. Bancada experimental .....	52
3.3.1. Circuito quente .....	53
3.3.2. Circuito frio.....	56
3.3.3. Sistema de aquisição de dados.....	59
3.4. Metodologia e análise dos ensaios .....	61
3.4.1. Operação .....	63
3.4.2. Critério de estabilização .....	63
3.5. Modelagem matemática.....	64
3.5.1. Coeficiente de transferência de calor .....	65
3.5.2. Potência de bombeamento.....	68
3.6. Incerteza de medição.....	68
CAPITULO IV .....	71
Resultados.....	71
4.1. Propriedades termofísicas.....	71
4.1.1. Densidade.....	72
4.1.2. Calor específico.....	75
4.1.3. Viscosidade dinâmica.....	76
4.1.4. Condutividade Térmica.....	79
4.2. Balanço de energia e validação da bancada experimental.....	81
4.3. Desempenho termo-hidráulico de nanofluidos em radiador automotivo .....	83
4.3.1. Taxa de transferência de calor .....	83
4.3.2. Influência da velocidade do ar na condutância térmica .....	88
4.3.3. Potência de bombeamento.....	92
4.3.4. Coeficiente de desempenho termo-hidráulico.....	97
4.4. Comparação com dados da literatura.....	98
CAPITULO V .....	104
Conclusões.....	104

Sugestões e trabalhos futuros .....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
ANEXO 1.....	118
ANEXO II.....	120
ANEXO III.....	125

# CAPITULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Motivação

A intensificação da transferência de calor em sistemas térmicos, aliada à economia de energia e desenvolvimento sustentável é um importante desafio para o mundo atual. Os sistemas de refrigeração e arrefecimento atuais necessitam de fluidos que sejam menos agressivos ao meio ambiente e proporcionem melhores propriedades térmicas, tendo em vista a tendência de compactação dos novos componentes. Em um sistema de arrefecimento automotivo, o radiador é um trocador de calor acoplado a canais distribuídos ao redor dos cabeçotes do motor, através do qual o fluido de arrefecimento é bombeado. Diferentes métodos têm sido propostos para melhorar o desempenho da transferência de calor dos radiadores de automóveis, e eles podem ser geralmente classificados em técnicas ativas e passivas.

No caso de aprimoramento ativo, ondas de ultrassom, atuação piezoelétrica, adição de campos magnéticos e elétricos, etc, são utilizadas fontes de energia externas, o que representa uma desvantagem. Já as técnicas passivas não são dependentes de fontes externas e portanto proporcionam menor custo operacional e maior confiabilidade, especialmente em dispositivos onde o tamanho e peso desempenham um papel importante na eficiência da transferência de calor. Com o avanço na ciência dos materiais e nanotecnologia, uma nova técnica passiva foi desenvolvida relacionada com a síntese de partículas da ordem nanométrica em suspensões coloidais em fluidos base tradicionais com propriedades de transporte térmico melhoradas chamados de nanofluidos.

Nanofluidos são suspensões de partículas sólidas de escala nanométrica em um meio fluido. Com o desenvolvimento da nanotecnologia, a possibilidade de síntese de nanofluidos

em maior escala e de forma controlada alavancou uma série de pesquisas envolvendo esta nova classe de fluidos. Nanofluidos foram implementados com sucesso para aumentar a transferência de calor em muitas aplicações, tais como componentes de eletrônica, sistemas de aquecimento e refrigeração, energia solar, indústria automotiva além de outras áreas como reatores nucleares e na biomedicina.

Muitas pesquisas têm sido feitas para a utilização de nanofluidos em diversos sistemas térmicos, como por exemplo em substituição aos fluidos de arrefecimento automotivos tradicionais. Embora devido ao desenvolvimento tecnológico contínuo na indústria automotiva, as exigências para produção de motores de elevada eficiência, que necessitem de menor consumo de combustível e de pequenas emissões de monóxido de carbono, as divisões de produção de motores das grandes empresas do setor automotivo exigiu a introdução de tecnologias de arrefecimento inovadora.

Alguns tipos de nanofluidos possuem propriedades térmicas superiores aos fluidos de arrefecimento convencionais, o que motivou o estudo da viabilidade da utilização de nanofluidos neste tipo de transferência de calor. Entretanto, devem ser avaliadas as possibilidades de ocorrência de deposição e aglomerações de nanopartículas e aumento na viscosidade.

Para a avaliação do desempenho de nanofluidos em radiadores automotivos, algumas propriedades termofísicas devem ser levadas em consideração, tais como condutividade térmica, viscosidade, densidade e calor específico. Desta forma, é possível determinar o coeficiente global de transferência de calor do radiador e potência de bombeamento do circuito de arrefecimento utilizando nanofluidos, por meio de uma instrumentação adequada.

Baseando-se nos argumentos mencionados, o presente trabalho pretende avaliar o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de grafeno em aplicações de transferência de calor que possam ser associadas com sistema de arrefecimento automotivo a fim de obter resultados experimentais que permitam gerar informações quantitativas sobre a utilização desta nanopartícula.

## **1.2. Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de grafeno com uma mistura de H<sub>2</sub>O/EG (50% vol.) como fluido base em um radiador automotivo. Além disso, uma atualizada revisão acerca das propriedades e aplicações de nanofluidos em transferência de calor oferece um suporte no desenvolvimento

da pesquisa. Na sequência, foram estabelecidos uma série de objetivos específicos do trabalho:

- Síntese de nanofluidos estáveis em diferentes concentrações, utilizando o fluido de arrefecimento convencional como fluido base
- Avaliação experimental da condutividade térmica e viscosidade dos nanofluidos produzidos, em diferentes valores de temperatura, verificando a influência da concentração nestas propriedades.
- Avaliação experimental do desempenho dos nanofluidos com diferentes condições de teste, em um túnel de vento simulando o escoamento cruzado que ocorre em um radiador automotivo.
- Comparação do desempenho dos nanofluidos em diversas concentrações com o desempenho do fluido base (convencional).
- Comparação dos resultados obtidos com resultados encontrados na literatura

### **1.3. Organização do texto**

Os capítulos II e III deste trabalho compreendem a primeira etapa e apresentam uma revisão bibliográfica atualizada sobre estudos das propriedades termofísicas dos nanofluidos de grafeno (condutividade térmica, viscosidade, densidade) mostrando os trabalhos de maior relevância.

Assim como aplicação dos nanofluidos como fluidos de arrefecimento como uma especial ênfase na área automotiva, seguido por uma descrição dos principais componentes da bancada experimental, incluindo todo o sistema de instrumentação e hardware eletrônico projetados e construídos no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LESTnano) da Universidade Federal de Uberlândia.

A segunda etapa compreendida pelos capítulos IV e V, descreve o processo de síntese e caracterização dos nanofluidos apresentando a avaliação da estabilidade, medição de condutividade térmica, calor específico, viscosidade e densidade dos nanofluidos obtidos. Neste capítulo também é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos para o fluido base e para o nanofluido.

Também é mostrada uma comparação entre as baterias de ensaios obtidos para os nanofluidos e o fluido base fazendo uma avaliação do comportamento termo-hidráulico identificando parâmetros de maior relevância como o coeficiente de transferência de calor por convecção e queda de pressão baseados em diferentes pesquisas encontradas na literatura

com a finalidade de obter conclusões sobre viabilidade dos nanofluidos na substituição do fluido de arrefecimento automotivo.

Por fim, o capítulo VI apresenta as conclusões gerais deste trabalho, discussões e desafios incluindo os futuros desdobramentos e sugestões para a continuidade da pesquisa.

## **CAPITULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1. Nanofluidos**

Os nanofluidos são uma nova classe de fluidos que possuem potencial de substituição dos fluidos convencionais em diversas aplicações, especialmente em sistemas térmicos. Na busca por uma eficiência energética, várias pesquisas têm sido realizadas, por meio de trabalhos experimentais, modelagem matemática e simulação com aplicações em equipamentos modernos e sistemas importantes como ar condicionado, sistemas de refrigeração automotiva, eletrônica e medicina.

A partir de uma dispersão de partículas de tamanho nanométrico (entre 1 e 100 nm) em fluidos comuns, é obtida uma suspensão denominada nanofluido (CHOI, 1995). Estes fluidos têm mostrado capacidade de troca de calor significativamente superior a fluidos convencionais tais como: água, etilenoglicol, óleo, entre outros. Tal efeito é devido, principalmente, à maior condutividade térmica dos sólidos utilizados nas suspensões.

Estudos envolvendo nanofluidos indicam uma influência significativa nas propriedades térmicas e físicas, tais como condutividade térmica, calor específico, viscosidade e densidade sobre os fluidos comumente utilizados nos processos de transferência de calor. Estas propriedades, por sua vez, são fortemente influenciadas pelas técnicas de fabricação utilizadas na produção das nanopartículas.

Existem nanofluidos compostos por diversos tipos de materiais, como metais e não-metais, óxido de metal, carboneto, nanotubos de carbono (CNT), além de nanofluidos híbridos (com mais de um tipo de nanopartícula). A seleção dos tipos de nanopartículas depende de diversos fatores, incluindo a aplicação e o desempenho do sistema. A maioria das aplicações

já disponíveis envolvem materiais metálicos ou de óxido de metal devido à facilidade e custo de produção.

A Fig. 2.1 ilustra como os valores de condutividade térmica dos sólidos utilizados como nanopartículas são superiores aos valores de fluidos refrigerantes e óleos em gerais. Assim, espera-se que para a mistura sólido-líquido, a condutividade térmica tenha valor superior ao fluido base.

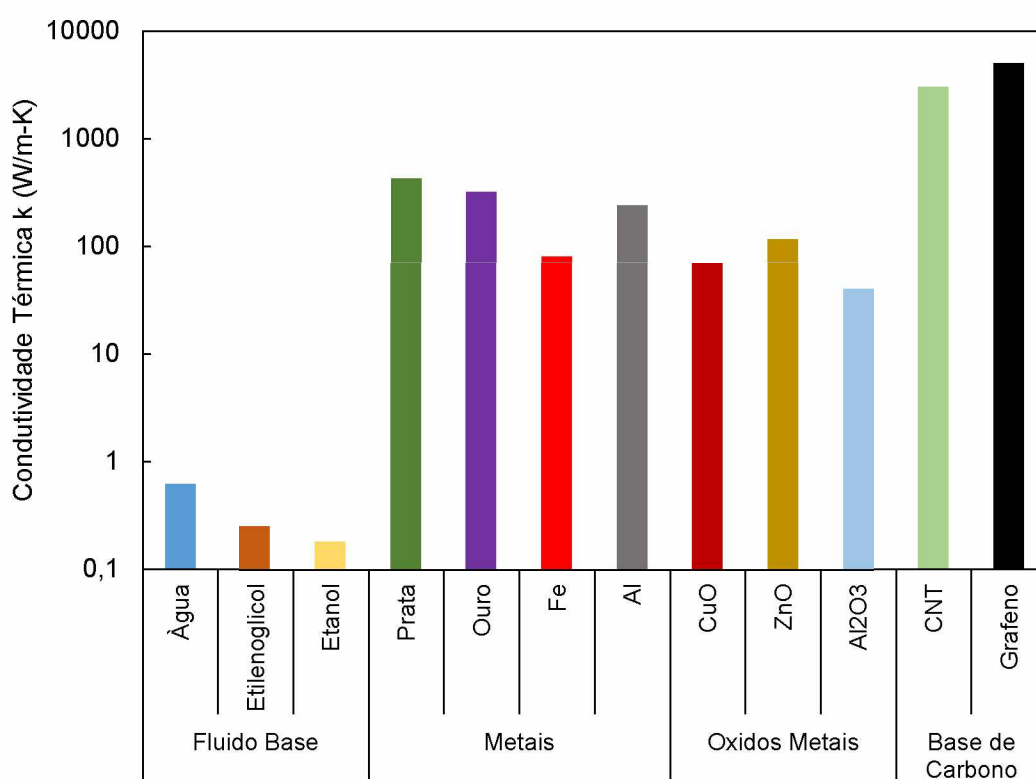


Figura 2.1 - Condutividade térmica dos materiais. Adaptada de (WEN et al., 2009)

A ideia de utilizar suspensões sólido-líquido para aumentar a condutividade térmica de suspensões é antiga (MAXWELL, 1873). Porém as suspensões se baseavam em partículas de escala milimétrica e micrométrica, o que facilitava a ocorrência de deposições. Em comparação, nanofluidos com propriedades térmicas adequadamente modificadas possuem as seguintes vantagens:

- Elevada área superficial específica das partículas e, portanto, maior superfície de transferência de calor entre as partículas e fluidos.

- Diminuição da possibilidade do entupimento de partículas em canais, possibilitando assim a miniaturização do sistema.

- Propriedades ajustáveis, incluindo condutividade térmica e densidade, variando as concentrações de partículas para se adequar a diferentes aplicações.

O estudo da condutividade térmica e da viscosidade são de alta importância para a implementação de nanofluidos, por isso um grande número de pesquisas têm-se centrado no estudo de estas propriedades com a finalidade de desenvolver modelos para prever os valores destas grandezas. Porém, os resultados experimentais de diversos autores se apresentam contraditórios entre si e também com relação a modelos teóricos desenvolvidos. Além disso, outros desafios relativos a utilização de nanofluidos podem ser listados a seguir (SINGH, 2014):

*-Aglomeração* - Formação de aglomerados das partículas e pode ocorrer antes ou depois da dispersão no fluido base. Partículas dispersas no fluido base podem aderir-se e formar agregados que podem-se estabelecer devido à ação da gravidade e como resultado a condutividade térmica de nanofluido diminui. A aglomeração de nanopartículas também pode reduzir a área superficial total, afetando o desempenho em transferência de calor.

*-Aumento da viscosidade* - A adição de nanopartículas em fluido de base também aumenta a viscosidade da mistura ou nanofluido. Este efeito, para um fluido em escoamento, pode resultar em uma maior perda de pressão exigindo mais energia de bombeamento, dependendo da aplicação e a quantidade de nanopartículas utilizadas.

*-Abrasão e erosão* – Em escoamento interno o efeito da erosão é significativo devido à alta velocidade de partículas dentro das tubulações. Isso pode resultar em maior desgaste do sistema.

*- Sedimentação* - Ocorre devido à alta densidade das partículas, comparado ao fluido base. Se o tamanho da partícula é grande, ocorrerá a sedimentação dificultando a interação entre as partículas e diminuindo a troca térmica.

Para processos de intensificação na transferência de calor, além dos desafios apresentados anteriormente, as pesquisas incluem desempenho térmico, menor calor específico e alto custo de produção para nanofluidos, uma vez que a melhoria das suas propriedades de transporte térmico está condicionada à obtenção de uma suspensão estável, sem aglomerações e sem alterações químicas (SYAM SUNDAR; SINGH, 2013).

## 2.2. Grafeno

Recentemente, como (MEHRALI et al., 2014) relatam em seu trabalho, um número significativo de estudos já foram realizados sobre a utilização de nanoestruturas à base de carbono como, nanotubos de carbono de parede simples, nanotubos de carbono parede múltipla, óxido de grafeno e grafeno para preparar nanofluidos.

O grafeno é uma folha de espessura de átomos de carbono hexagonais organizados em forma planar e ligados com hibridização do tipo  $sp^2$ , atraiu muita atenção desde a sua descoberta por (NOVOSELOV et al., 2005). Os estudos revelam que o grafeno tem uma condutividade térmica muito alta, por isso é esperado que o nanofluido de grafeno apresentaria um maior aumento de condutividade térmica comparado com outras nanopartículas. As nanofolhas de grafeno bidimensional (2D) como mostrados na Fig. 2.2 podem ser estruturadas de acordo com a sua geometria dimensional em fulereno (0D), enrolada como nanotubos de carbono (1D) ou empilhadas para formar o grafite (3D). As nanofolhas de grafeno atraíram um grande interesse devido à sua excelente condutividade elétrica, mecânicas e propriedades térmicas como condutividade térmica relatada como sendo de até 3.000 a 5.000 W / mK. Além disso, sua geometria em 2D permite ao grafeno possuir uma alta uma maior relação área superficial/volume, proporcionando um contato maior entre as nanopartículas e o fluido circundante favorecendo assim o transporte de energia. (FANG et al., 2013).

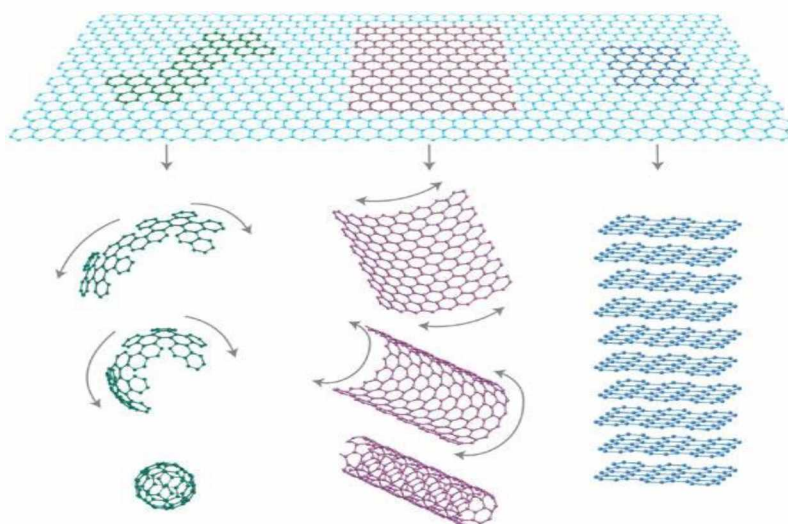


Figura 2.2 - Estruturas obtidas a partir do grafeno, da esquerda para direita: fulereno, nanotubos de carbono e grafite.

Uma vez com a descoberta e produção de grafeno em uma escala maior as pesquisas progrediram rapidamente, dentre os motivos destacam-se os procedimentos de laboratório relativamente simples e baratos que permitem obter o grafeno de alta qualidade. A Fig. 2.3 mostra publicações sobre este campo na última década, onde poderia ser claramente visto que os nanofluidos de grafeno são uma nova tendência se tornando muito importante no mundo da engenharia.

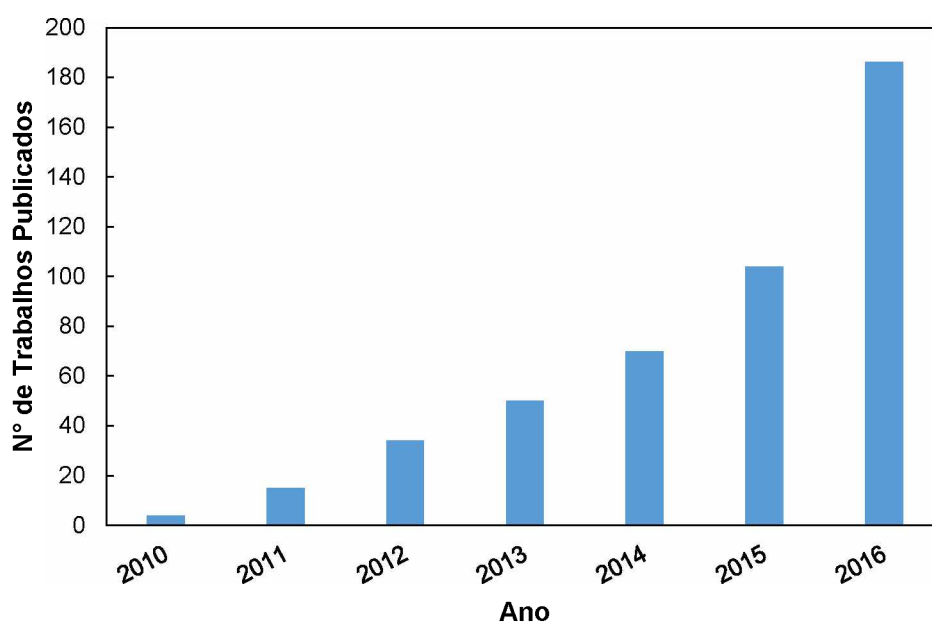


Figura 2.3 - Número de artigos por ano, conforme relatado pela base de dados da ScienceDirect (<http://www.sciencedirect.com/>), a partir de 2010 e atualizado para o ano 2016 recuperado através da palavra-chave " nanofluid "e" graphene " No tópico do artigo.

Além disso, importantes propriedades foram encontradas por diversos pesquisadores. Particularmente, para nanofluidos, as vantagens das nanofolhas de grafeno em comparação com outras nanopartículas foram apresentadas no trabalho de (SADEGHINEZHAD et al., 2016) e citadas a seguir:

- Síntese simples e tempo de suspensão mais longa (mais estável).
- Maior proporção área de superfície / volume (1000 vezes maior).
- Elevada condutividade térmica.
- Baixa erosão, corrosão e entupimento.
- Baixa demanda por energia de bombeamento.

- Redução no estoque de fluido de transferência de calor.
- Significativa economia de energia.

### 2.3. Produção de nanofluidos

As propriedades térmicas e físicas dos nanofluidos tem uma forte dependência das características de fluido base e do material utilizado para produzir as nanopartículas, que por sua vez dependem das técnicas de fabricação. A estrutura de uma nanopartícula é geralmente composta por um núcleo sólido que define as características térmicas, elétricas, óticas e magnéticas, e um revestimento, que é quimicamente ligado ou absorvido na sua superfície e define a estabilidade da suspensão das partículas além do comportamento hidrofílico ou hidrofóbico (DAS et al., 2007). A Fig. 2.4 ilustra esquematicamente a estrutura típica de uma nanopartícula.

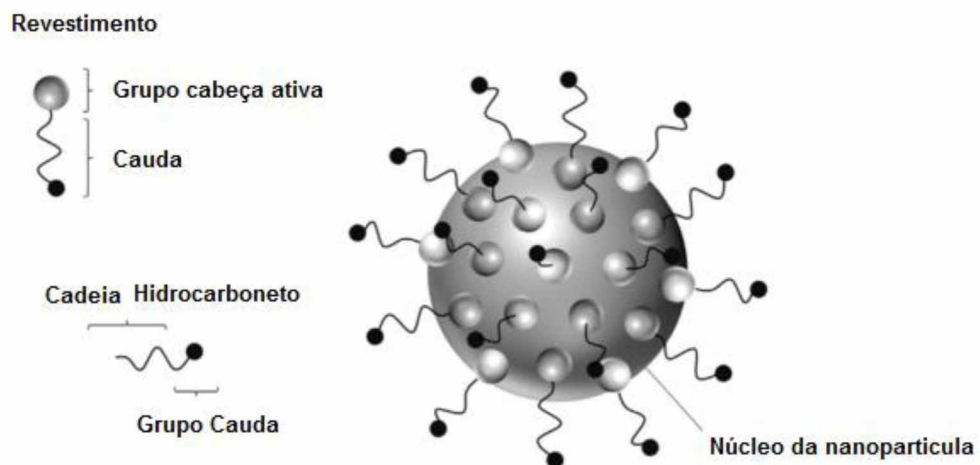


Figura 2.4 - Estrutura típica de uma nanopartícula. Adaptada de (DAS et al., 2007)

Geralmente os revestimentos das nanopartículas são constituídos por um grupo de cabeça ativa ligado ao núcleo das nanopartículas por meio de ligações químicas e um grupo de cauda que interage com o meio de dispersão promovendo uma boa dispersão das nanopartículas.

As suspensões de partículas de tamanho nanométrico são consideradas mais estáveis quando comparadas com suspensões micrométricas. Ainda assim existe grande dificuldade na obtenção de nanofluidos estáveis devido à grande possibilidade de aglomerações de

nanopartículas. (BECK et al., 2010) e (HAJIPOUR; MOLAEI DEHKORDI, 2014) sugerem em seus trabalhos métodos para melhorar a estabilidade das suspensões tais como controle do pH da suspensão, agitação ultrassônica e a utilização de agentes de estabilização como surfactantes. Estes métodos podem alterar as propriedades de superfície das partículas em suspensão e pode ser utilizado para suprimir a formação de aglomerados de partículas, a fim de obter suspensões estáveis. O uso destas técnicas depende da aplicação desejada do nanofluido.

A seleção de ativadores e dispersantes adequados depende principalmente das propriedades das soluções e partículas. Estas substâncias diminuem a tensão interfacial entre o fluido base e as nanopartículas mantendo-as dispersas em um período de tempo maior. Entretanto, cabe ressaltar que a adição de dispersante afeta as propriedades termofísicas dos nanofluidos, fato normalmente indesejável. Alguns exemplos de surfactantes são SDS (dodecil sulfato de sódio), PVA (polivinilalcool) e PVP (polivinilpirrolidona) entre outros.

Existem dois tipos de métodos para a preparação e síntese de nanofluidos: os métodos de um passo e os métodos de dois passos. O primeiro combina a síntese das nanopartículas e dispersão no fluido base em um único passo, na maioria dos casos utilizando técnicas de evaporação das nanopartículas, solução química e via assistida por micro-ondas. Estas técnicas reduzem os efeitos de aglomeração o que aumenta a estabilidade, porém as quantidades de produção são limitadas e requer de um grande custo operacional. Além disso, neste tipo de método a possibilidade de controle da concentração do nanofluido final é reduzido, visto que pequenas variações nos parâmetros de entrada produzem grandes efeitos no nanofluido final.

(EASTMAN et al., 2001) produziram nanofluidos de cobre com uma esfericidade ( $n \approx 3$ ) em etilenoglicol puro utilizando a técnica de contato de vapor metálico com um fluxo de vapor de um fluido em baixa pressão. Foram obtidos nanofluidos com 0,5% vol. e o tamanho médio das nanopartículas foi 10 nm.

(ZHU; LIN; YIN, 2004) produziram nanofluidos de cobre em etilenoglicol utilizando o método de um passo por redução química. Uma solução de 0,1 M (0,1 mol de soluto para um litro de solução) de sulfato de cobre pentahidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) em etilenoglicol foi misturada com 5 ml de uma solução de PVP-30 em um processo de agitação magnética por 30 minutos. Após, 25 ml de uma solução de 0,25 M de hipofosfito de sódio ( $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e foi necessária mais uma etapa de agitação magnética de 15 minutos. Nenhuma purificação adicional foi necessária, os testes de estabilidade indicaram que os nanofluidos ficaram estáveis por mais de três semanas. Neste método a secagem, armazenamento, transporte, e

a dispersão de nanopartículas são evitados para minimizar a aglomeração de nanopartículas e aumentar a estabilidade do fluido além de reduzir os custos de produção com relação ao método tradicional de evaporação.

O método de arco submerso para síntese de nanopartículas (Vacuum-SANSS) é outro método de um passo eficiente para preparar nanofluidos usando diferentes líquidos dielétricos (CHEN, 2010). As nanopartículas preparadas têm diferentes morfologias (de agulha, poligonal, quadrado e circular) e são principalmente influenciadas e determinadas devido às propriedades térmicas dos líquidos dielétricos. O método evita a agregação das partículas indesejada de forma satisfatória. No entanto, alguns residuais permanecem nos nanofluidos no caso de ocorrer uma reação incompleta.

O método assistido por micro-ondas que utilizaram (BLOSI et al., 2011) e (NIKKAM et al., 2014) em seus trabalhos é uma via promissora de fabricação. Este processo de sintetização de nanofluidos fornece um aquecimento rápido e uniforme de reagentes e solvente, acelerando a redução do precursor de metal e a nucleação de aglomerados de metal rapidamente, resultando em nanoestruturas monodispersas, o que por sua vez pode melhorar características térmicas. Suspensões preparadas, foram obtidas com um rendimento de reação alta e estáveis durante meses apesar da concentração elevada de metal.

No entanto, o método de um passo possui uma desvantagem quando utilizado para processo de transporte térmico. A produção em pequenas quantidades limita a produção a nível comercial, e não há controle de parâmetros importantes como tamanho e forma da nanopartícula.

O método de dois passos é mais amplamente usado para a preparação de nanofluidos. Nanopartículas, nanofibras, nanotubos ou outros nanomateriais são produzidos primeiramente como pós secos por alguns métodos químicos ou físicos. Depois de preparar pó nanoparticulado, ele é disperso no fluido de base em um segundo passo de processamento. Diferentes formas de dispersão são citadas por (OLIVEIRA; BANDARRA; WEN, 2012) para produzir nanofluidos, incluindo agitação intensiva de forças magnéticas, agitação ultrassônica ou mistura de elevada energia de cisalhamento com homogeneização de alta pressão. A síntese pelo método de dois passos é o método mais econômico, além de permitir uma produção em longa escala. Além disso, o método de dois passos é amplamente adotados devido à possibilidade de controlar com precisão a concentração e tamanho das nanopartículas.

Em seu trabalho (SUGANTHI; RAJAN, 2012) sintetizaram nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) por precipitação química utilizando nitrato de zinco hexahidratado ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ )

como precursor. Nanofluido ZnO-H<sub>2</sub>O foi formulado por um método de dois passos com o auxílio de ultrassom e estabilização utilizando hexametáfosfato de sódio (SHMP). Uma quantidade pré-determinada de ZnO foi adicionada à solução surfactante homogeneizada em alto cisalhamento durante 20 min a 7000 rpm, seguido de ultrassom durante 180 minutos (750 W, 20 kHz). A proporção de nanopartículas foi fixada em 1: 5 para o surfactante no qual foram obtidos os valores mais elevados do potencial zeta assegurando assim uma maior estabilidade coloidal da dispersão, o que foi confirmado por meio de observação visual.

(TENG et al., 2015) prepararam nanofluidos de nanotubos de carbono (MWCNT) de 0,8% em massa utilizando água como fluido base e uma solução de SDBS (dodecilbenzeno sulfônico) como surfactante, (MWNF foram preparados utilizando um método de síntese em dois passos, com as técnicas de agitação/ placa quente, banho ultrassônico e homogeneização. Após três meses a sedimentação não é perceptível, porém foi avaliada a estabilidade da suspensão mediante o procedimento de potencial zeta indicando valores para uma excelente estabilidade.

(OLIVEIRA; CARDENAS C.; BANDARRA F., 2016) produziram nanofluidos pelo método de dois passos. Nanopartículas de nanotubos de carbono (MWCNT) foram dispersas em água destilada utilizando um homogeneizador a alta pressão. Foi aplicada uma pressão de aproximadamente 400 bar e o processo levou cerca de 30 minutos até o fluido se homogeneizar completamente. Foram produzidos nanofluidos com concentração entre 0,05 e 0,16 % em massa. A mistura final apresentou elevada estabilidade, ocorrendo ligeira decantação após dois meses.

Um fator importante na hora da produção de nanofluidos é a sua estabilidade, assim, a utilização de novos métodos de preparação e mecanismos adicionais para estabilização levaram à produção de suspensões mais duradouras. O principal método para aumentar a estabilidade das nanopartículas no fluido base é o uso de surfactantes, controle do pH e tempo de dispersão (SADEGHINEZHAD et al., 2016). A vantagem da utilização do surfactante é que reduz a tensão superficial do fluido base tornando as forças intermoleculares mais fracas, a razão é que as superfícies hidrofóbicas de nanopartículas são modificadas para se tornar hidrofílica ou vice-versa. No entanto, a viscosidade do nanofluido pode ser aumentada e a funcionalidade dos surfactantes danificada, especialmente para aplicações de alta temperatura (GHADIMI; SAIDUR; METSELAAR, 2011). O pH pode ajudar a reduzir a aglomeração, pois a estabilidade do nanofluido está diretamente relacionada às propriedades eletro-cinéticas das nanopartículas (forças de Van de Waals).

A Fig. 2.5 mostra através de um diagrama de fluxo as etapas adotadas para produção de nanofluido utilizando o método de dois passos.

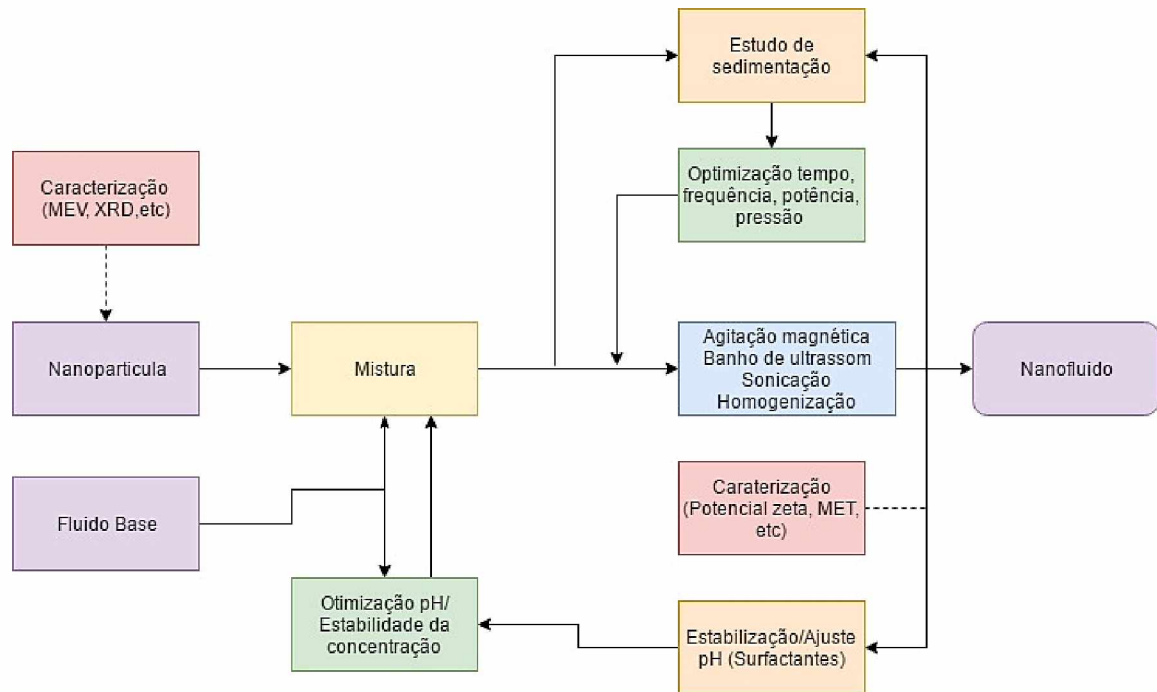


Figura 2.5 - Procedimento de preparação de nanofluidos pelo método de dois passos.

## 2.4. Condutividade Térmica

A condutividade térmica é a propriedade termofísica de maior influência no desempenho térmico dos nanofluidos devido à capacidade de condução de calor aumentada com adição das nanopartículas. Este fato, até hoje tem sido o principal foco das pesquisas envolvendo nanofluidos e diversos resultados já foram obtidos confirmando um aumento na condutividade térmica em nanofluidos quando comparados com o fluido base.

Por outro lado, a literatura afirma que os resultados encontrados são controversos mesmo quando comparando um mesmo tipo de nanofluido o que leva à conclusão que diversos fatores são influentes na condutividade térmica. Na Fig. 2.6 é apresentado um diagrama ilustrando os principais fatores de influência nesta propriedade, como o tamanho de partícula, forma, distribuição, níveis de aglomeração, temperatura, propriedades de superfície, dinâmica das nanopartículas, surfactantes, interação com o fluido base, pH com a finalidade

de ter uma melhor compressão de como cada um pode afetar a medida da condutividade térmica.

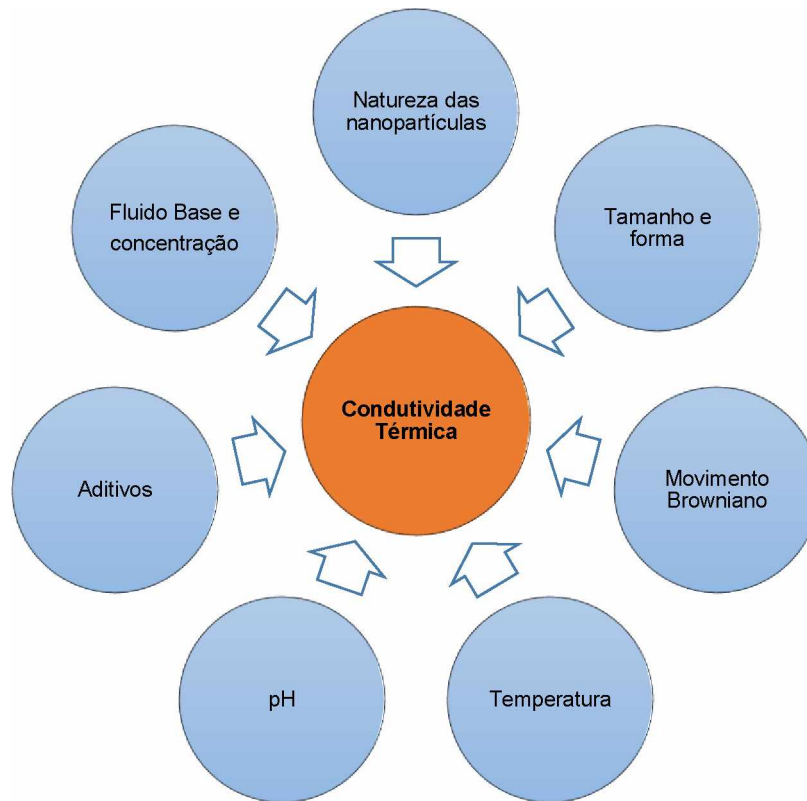


Figura 2.6 - Fatores que influenciam na medição da condutividade térmica de nanofluidos.

#### 2.4.1. Fatores que influenciam na medida da condutividade térmica

##### - Efeito do fluido base e a concentração

Em aplicações de transferência de calor, os fluidos utilizados comumente tais como, água, etilenoglicol e óleo de motor são com frequência empregados para preparação de nanofluidos. No seu trabalho (WANG; XU; S. CHOI, 1999) mostraram que o tipo de fluido base interferia na condutividade térmica do nanofluido.

Este fato foi comprovado por (MOOSAVI; GOHARSHADI; YOUSSEFI, 2010) quando dispersaram nanopartículas de ZnO em etilenoglicol e glicerol como fluidos base. Citrato de amônio foi utilizado como surfactante para melhorar a dispersão de nanopartículas e suprimir a formação de aglomerados de partículas para obter suspensões estáveis. Os autores observaram que a condutividade térmica relativa diminui com o aumento da condutividade térmica do fluido de base. Assim, os nanofluidos à base de etilenoglicol mostram um

incremento maior em comparação com os de glicerol (a condutividade térmica de etilenoglicol e glicerol é de  $0,250 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  e  $0,280 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a  $25^\circ \text{C}$ , respectivamente).

Um comportamento diferente foi observado por (USRI et al., 2015) e (SUNDAR; SINGH; SOUSA, 2013), que realizaram experimentos variando a quantidade de volume de etilenoglicol presente em nanofluidos que utilizam uma mistura de ( $\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ ) como fluido base. Os resultados obtidos em ambos trabalhos demonstrou que o incremento na percentagem em volume de etilenoglicol na solução leva à diminuição na condutividade térmica relativa.

A concentração de partículas presentes no fluido base tem uma forte ligação com a condutividade térmica do nanofluido. Em geral, o que se observa é que a concentração e a condutividade térmica possuem uma relação não linear, isto é, o incremento em um deles resulta no incremento não linear no outro, como apontado por (SUNDAR et al., 2013) que trabalho com nanopartículas de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e cobre em ( $\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$  50% vol.) como fluido base e por (XING; YU; WANG, 2015), utilizando três tipos de nanotubos de carbono dispersos em água deionizada.

#### *- Efeito de tamanho e forma*

No trabalho de (HEMMAT ESFE et al., 2014) foram avaliadas nanopartículas ferromagnéticas em etilenoglicol ( $\text{Fe}/\text{EG}$ ) em escoamento laminar e turbulento, utilizando partículas de tamanho médio diferente, incluindo 40, 70 e 100 nm. O melhor resultado foi obtido para regime turbulento e concentração de 3% vol, sendo que para as nanopartículas de 40 nm os nanofluidos apresentaram uma condutividade térmica maior. Os resultados também mostraram que, no escoamento laminar, os nanofluidos com concentrações baixas e que contenham partículas de tamanho grande não são úteis.

(LEE; LEE; PIL JANG, 2014) estudaram o efeito do tamanho das nanopartículas e da temperatura sobre o aumento na condutividade térmica de nanofluidos de alumina à base de água. Nanopartículas de três diferentes diâmetros foram utilizadas nos seus testes (71,6; 114,5 e 136,8 nm) observando que a condutividade térmica bem como o efeito da temperatura estão fortemente correlacionadas com o tamanho das partículas, ou seja quanto menor o tamanho das nanopartículas, mais forte o efeito da temperatura sobre a condutividade térmica.

No entanto alguns autores da literatura sugerem um aumento na condutividade térmica quanto maior o tamanho das partículas. Como é o caso de (WARRIER; TEJA, 2011) que relatou medições de condutividade térmica de seis nanofluidos contendo nanopartículas de prata ( $\text{Ag}$ ) de diferentes tamanhos e frações de volume. Os resultados proporcionam forte evidência de que a diminuição da condutividade térmica com o tamanho de partícula deve ser

considerado no desenvolvimento de modelos para a condutividade térmica dos nanofluidos. Também em seu trabalho (HOSSEIN KARIMI DARVANJOOGHI; NASR ESFAHANY, 2016) investigaram os efeitos de tamanho de partícula, temperatura e fração de volume de nanopartículas de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) na condutividade térmica de nanofluidos a base de etanol. Os resultados mostraram que o aumento do tamanho da partícula (10-64 nm) provoca também um aumento na condutividade térmica do nanofluido  $\text{SiO}_2$ -etanol. O efeito foi atribuído ao comportamento hidrofílico das nanopartículas resultante na diminuição da resistência térmica interfacial com o aumento de tamanho da nanopartícula.

*- Efeito da temperatura*

Na maioria dos estudos é observado um aumento significativo da condutividade térmica do nanofluido com o aumento da temperatura, efeito descrito no trabalho de (DAS et al., 2003). Em suspensões de partículas sólidas convencionais (com tamanhos da ordem de milímetros ou micrómetros), em líquidos, a condutividade térmica da mistura dependente da temperatura e se deve em grande proporção à condutividade térmica do fluido base e das partículas sólidas. No entanto, no caso dos nanofluidos, mudança de temperatura afeta o movimento Browniano das nanopartículas e também aglomeração de nanopartículas, o que resulta em alterações substanciais da condutividade térmica em nanofluidos.

Estes comportamentos são observados em pesquisas como a realizada por (AZMI et al., 2016) em nanofluidos de óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) em uma mistura de  $\text{H}_2\text{O}/\text{EG}$  como fluido base. O aumento na condutividade térmica é quase linear com a temperatura em baixas concentrações. A temperaturas elevadas, a colisão de partículas ocorreu a uma taxa mais elevada, relacionando esta tendência com o movimento browniano favorecendo assim o transporte de energia cinética. Assim, a condutividade térmica é aumentada.

(LI; ZOU, 2016) estudaram a melhoria das propriedades térmicas e físicas de uma mistura de  $\text{H}_2\text{O} / \text{EG}$  usando nanopartículas de carboneto de silício ( $\text{SiC}$ ) avaliando o benefício para o desempenho de sistemas térmicos em uma faixa de 10 até 50 °C. Os valores de condutividade térmica do nanofluido para todas as concentrações de ( $\text{SiC}$ ) aumentaram com o aumento da temperatura e a mesma tendência foi observada para o fluido de base. Os autores concluíram que o movimento browniano das nanopartículas tornou-se mais intenso com o aumento da temperatura, o que resultou em um maior fluxo de calor entre as nanopartículas indicando suas potencialidades de aplicação para sistemas de energia em alta temperatura.

*- Efeito do Movimento Browniano*

Esta denominação foi atribuída devido a experimentos realizados por (BROWN, 1828), envolvendo partículas de pólen no seu laboratório. Com ajuda de um microscópio observou

que quando os grãos estavam imersos em um líquido tinham movimentos irregulares e aleatórios sem nenhuma razão aparente. Este fenômeno é conhecido desde então como movimento browniano em homenagem a seu trabalho. Embora Brown pudesse evidenciar a existência deste movimento, ele não deu uma explicação matemática. Apenas no ano 1905 (EINSTEIN, 1905), em um de seus trabalhos, explica de forma detalhada demonstrando que o movimentos são originados pelas colisões entre as partículas e as moléculas do fluido.

Em seus trabalhos (WANG; XU; S. CHOI, 1999), (KEBLINSKI et al., 2002) consideraram o efeito do movimento browniano na condutividade térmica do nanofluido comparando o tempo da difusão de calor no fluido e as nanopartículas. A conclusão obtida foi que o deslocamento das nanopartículas devido ao movimento browniano é muito baixa para transportar uma quantidade significativa de calor através do nanofluido, o que significa que a difusão de nanopartículas é mais lenta que a difusão térmica. Ao perceber que a difusão de nanopartículas tem pouco efeito sobre a condutividade térmica de, (JANG; CHOI, 2004) propuseram a hipótese de que o movimento browniano das nanopartículas induz um efeito convectivo a nível nanométrico, denominado nano-convecção induzida, concluindo que é o mecanismo chave que regula o comportamento térmico dos nanofluidos. Porém na literatura ainda existe controvérsia quanto ao efeito do movimento browniano sobre o transporte de energia, principalmente devido ao efeito não ser observado ainda na escala nano (PANG et al., 2014).

#### *- Efeito da Natureza das Nanopartículas*

Como mostrado na Fig. 2.1, várias composições tais como partículas metálicas, óxidos, cerâmicos ou outro tipo de materiais nanoestruturados têm sido utilizados a fim de produzir nanofluidos através dos métodos de um e dois passos. É esperado que um material que possui maior condutividade térmica poderá exibir maior incremento da condutividade térmica da mistura, em comparação com um de menor condutividade térmica ou mesmo com o fluido base, sob condições semelhantes.

Uma nova forma de produção de materiais em escala nanométrica tem-se desenvolvido atualmente baseada na liga de dois ou mais materiais aproveitando as características individuais de cada material, e assim obter novos materiais com propriedades físicas e químicas intensificadas. Estudos como os de (GOHARSHADI et al., 2013) e (DEVENDIRAN; AMIRTHAM, 2016) sobre a liga de nanopartículas de diferentes materiais revelou que as propriedades termofísicas para os nanofluidos diferem nos resultados, observando mudanças em cada uma das amostras avaliadas com diferentes concentrações de cada material. Este tipo de nanofluido com suspensão de nanopartículas de diferente natureza recebe o nome de nanofluido híbrido.

#### *- Efeito do pH*

O efeito do potencial hidrogeniônico (pH) nas propriedades dos nanofluidos está diretamente relacionado com a carga eletrostática na superfície da partícula, que é um parâmetro chave na determinação da estabilidade coloidal ou dispersão das nanopartículas na mistura. O pH pode ser interpretado e quantificado com a medição do potencial zeta que mede a carga eletrostática na superfície das partículas que compõem a dispersão coloidal. Em outras palavras, o pH deve estar longe do ponto isoelétrico (pI) para manter a estabilidade, assim se a superfície da partícula não carrega nenhuma carga elétrica e as forças repulsivas são reduzidas a zero (potencial zeta zero) aumenta a possibilidade de precipitação e aglomeração das partículas. Quando forças repulsivas aumentam, as partículas podem-se movimentar livremente devido ao movimento browniano, facilitando assim o transporte térmico (SADEGHINEZHAD et al., 2016).

Em seu trabalho (KARTHIK et al., 2012) estudou nanofluidos de cobre (Cu) utilizando como fluido base água deionizada e mostraram que teve um aumento na condutividade térmica à medida que o pH aumenta e atinge o valor máximo próximo de pI (a pH ~ 9), também observou que diminui quando o pH apresenta aumentos de 10 a 14. Este resultado é contraditório com o que seria esperado do ponto de vista da estabilidade, no entanto, destaca-se que uma dimensão crítica do aglomerado poderia ter causado esta melhoria.

(ISMAY; DOROODCHI; MOGHTADERI, 2013) mostram a relação observada entre a melhorias de pH e condutividade térmica em experimentos com nanofluidos de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) utilizando água deionizada como fluido base. Os dados obtidos apresentaram um comportamento geral com um grau de dispersão e não seguem uma função bem definida, mas observaram uma tendência de melhora com pH perto do ponto isoelétrico. No entanto o valor máximo atingido foi obtido num ponto afastado do pI, cujo pH variava entre 5 e 6, e a partir de então começava a diminuir até atingir um valor de pH igual a 12. Um comportamento similar foi obtido por (WANG; LI, 2009) em nanofluidos de óxido de alumínio Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e cobre (Cu) em água. Assim, ficou evidente que existe um pH ótimo que confere uma maior condutividade térmica ao nanofluido.

#### *- Efeito de Surfactantes*

A utilização de surfactantes é um dos métodos geralmente utilizados para evitar aglomeração e sedimentação das nanopartículas no fluido base. Os surfactantes podem modificar a interface do meio das partículas em suspensão e prevenir a agregação durante períodos de tempo longos. No entanto, embora a adição de surfactante pode evitar a aglomeração das nanopartículas as propriedades térmicas e físicas dos nanofluidos podem ser diretamente afetadas e dependendo do tipo de aditivo, concentração e tipo de aplicação

o efeito é diferente. Vários pesquisadores relataram que o uso de surfactantes apropriados com quantidade adequada resultou no aumento da condutividade térmica dos nanofluidos.

(ARZANI et al., 2015) analisaram o efeito do tipo de aditivo sobre a condutividade térmica de nanofluidos produzidos com nanopartículas de grafeno dispersas em água. O estudo foi realizado com dois tipos de surfactantes; o dodecil benzeno sulfonato de sódio (SDBS) e o ácido carboxílico (COOH) em concentrações de 0,025 0,05 e 0,1% em massa. Os resultados obtidos em função da temperatura mostraram que o tipo de aditivo modifica a condutividade térmica do nanofluido, atribuindo ao movimento browniano e formação nanocamadas o principal mecanismo transporte de energia.

(XIA et al., 2014) mediram experimentalmente a condutividade térmica de nanofluidos de oxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) em água deionizada como fluido base em diferentes concentrações em massa de surfactantes dodecil sulfato de sódio (SDS) e polivinilpirrolidona (PVP) com um analisador de constante térmica tipo disco quente. Os resultados mostraram que o surfactante tem um papel importante na dispersão de nanopartículas no fluido base melhorando sua estabilidade. PVP não iônico mostra efeitos mais positivos do que SDS aniônico em dispersão e estabilidade dos nanofluidos. O maior aumento condutividade térmica foi obtida para uma razão ótima entre a fração de massa de surfactante e a fração de volume das partículas. Também consideraram que o efeito diminui com o aumento da fracção em volume de nanopartículas.

#### 2.4.2. Correlações para estimação da condutividade térmica

Para fornecer uma explicação para um modelo teórico do aumento da condutividade térmica em nanofluidos, vários modelos teóricos foram desenvolvidos, a maioria deles têm sido baseados na teórica clássica do meio eficaz (EMT). O primeiro modelo criado para determinar a condutividade térmica de um liquido com sólidos em suspensão foi desenvolvido por (MAXWELL, 1873) para mistura considerada homogênea com partículas esféricas e dispersas aleatoriamente, permitindo assim o transporte de energia em suspensão e difusivo. Como existe uma distância maior entre as partículas em relação ao tamanho das moléculas do fluido base e não considerando a interação entre partículas a Eq. (2.1) prevê o aumento na condutividade térmica em um meio com condutividade térmica intermediária,

$$k_{eff} = \frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2\phi(k_{np} - k_{bf})}{k_{np} + 2k_{bf} - \phi(k_{np} - k_{bf})} \quad (2.1)$$

sendo,  $(k_{np}), (k_{bf})$  a condutividade térmica da nanopartículas e o fluido base respectivamente.  $(\phi)$  a concentração volumétrica.

A limitação da concentração de volume de partículas proposta por Maxwell foi modificada por (BRUGGEMAN, 1935). O modelo desenvolvido, mostrado na Eq. (2.2) é valido apenas para partículas esféricas. Além disso, as interações entre as partículas distribuídas são consideradas,

$$k_{nf} = \frac{1}{4} [(3\phi - 1)k_{np} + (2 - 3\phi)k_{bf}] + \frac{k_{bf}}{4}\sqrt{\Delta} \quad (2.2)$$

onde,

$$\Delta = \left[ (3\phi - 1)^2 \left( \frac{k_{np}}{k_{bf}} \right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + (4 + 18\phi - 18\phi^2) \left( \frac{k_{np}}{k_{bf}} \right) \right]$$

Uma outra modificação foi proposta por (HAMILTON; CROSSER, 1962), o modelo de Maxwell foi remodelado para misturas contendo diferentes formas e tamanhos de partícula variando entre milímetros e micrômetros. De acordo com o modelo, a condutividade térmica relativa  $k_{eff}$  é dado pela Eq. (2.3),

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \left[ \frac{k_{np} + (n + 1)k_{bf} - \phi(n - 1)(k_{bf} - k_{np})}{k_{np} + (n + 1)k_{bf} + \phi(k_{bf} - k_{np})} \right] \quad (2.3)$$

onde,  $n = 3 / \Psi$  em que,  $n$  é o fator de forma empírico e  $\Psi$  é a esfericidade definida como a razão da área superficial de uma esfera (com o mesmo volume da partícula) à área de superfície da partícula. A esfericidade é 1 e 0,5 para as formas esférica e cilíndrica, respectivamente.

Os modelos clássicos originaram-se das formulações do meio contínuo, que envolvem normalmente o tamanho de partícula, forma e a fração de volume e supõem a transferência difusiva do calor. Embora estes modelos possam fornecer boas previsões para dispersões da ordem dos micrômetros ou sistemas multifásicos de maior dimensão, os modelos clássicos geralmente subestimam o aumento da condutividade térmica de nanofluidos em função da fração de volume. No entanto, cabe ressaltar que para todos os modelos mencionados anteriormente a condutividade térmica das nanopartículas é a principal causa de aumento na condutividade térmica de nanofluidos.

Recentemente, muitos novos estudos teóricos têm sido desenvolvidos para prever a condutividade térmica anormalmente aumentada de nanofluidos levando em consideração efeitos como o movimento browniano, aglomeração, temperatura e camada interfacial partícula-liquido. Um resumo dos modelos para a previsão da condutividade térmica eficaz de nanofluidos é apresentado na Tab. 2.1

Tabela 2.1 - Modelos desenvolvidos para a condutividade térmica de nanofluidos.

Autor	Modelo	Observações
(YU; CHOI, 2003)	$k_{eff} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} - 2\phi(k_{np} - k_{bf})(1 + \beta)^3}{k_{np} + 2k_{bf} - \phi(k_{np} - k_{bf})(1 + \beta)^3}$ <p><math>\beta</math> é a razão entre a espessura da nanocamada e raio da nanopartícula.</p>	Considera a camada interfacial modificando o modelo de Maxwell
(NAN; SHI; LIN, 2003a)	$k_{nf} = k_{bf} * \left( \frac{3 + \phi(2\beta_{11}(1 - L_{11}) + \beta_{33}(1 - L_{33}))}{3 - \phi(2\beta_{11}L_{11} + \beta_{33}L_{33})} \right)$ $\beta_{11} = \frac{k_{np} - k_{bf}}{k_{bf}} \quad \beta_{33} = \frac{k_{np} - k_{bf}}{k_{np}}$	Condutividade térmica para nanofolhas de grafeno.
(JANG; CHOI, 2004)	$k_{eff} = k_{bf}(1 - \phi) + k_{np}\phi + c \frac{d_{bf}}{d_{np}} k_{bf} \phi Re^2 Pr$ <p>Onde, <math>d_{bf}</math> e <math>d_{np}</math> são o diâmetro da molécula do fluido base e das nanopartículas respectivamente. (c) é uma constante de proporcionalidade e (Re), (Pr) são os números de Reynolds e Prandtl.</p>	Considera o transporte térmico por convecção e condução.
(KUMAR et al., 2004)	$k_{eff} = 1 + c\bar{u} \frac{\phi r_m}{k_{bf}(1 - \phi)r_p}$ <p>Os valores de (c) e <math>\bar{u}</math> dependem do movimento browniano das partículas e a temperatura da mistura. (<math>r_m</math>) e (<math>r_p</math>) são os raios da molécula e a partícula respectivamente.</p>	Considera o efeito da energia cinética das partículas

---

(XIE; FUJII; ZHANG, 2005)	$k_{eff} = 1 + 3\theta\phi + \frac{3\theta^2\phi^2}{1 - \theta\phi}$	Considera a presença da nanocamada.
(LEONG; YANG; MURSHED, 2006)	$k_{eff} = \frac{\phi \gamma_2 k_{lr} [2\beta_l^3 - \beta^3 + 1] + \gamma_1 \beta_l^3 [\phi \beta^3 (k_{lr} - k_{bf}) + k_{bf}]}{\beta^3 \gamma_1 - \gamma_2 \phi [\beta_l^3 + \beta^3 - 1]}$ $\gamma_1 = (k_{np} + 2k_{lr}) \quad \gamma_2 = (k_{np} - k_{lr})$ <p>Onde <math>k_{lr}</math> é a condutividade térmica da camada interfacial, <math>\beta_l</math> e <math>\beta</math> dependem da relação entre a espessura interfacial e o raio da partícula.</p>	Considera o efeito da camada interfacial na interface partícula sólido-líquido,
(SHIMA; PHILIP; RAJ, 2009)	$k_{eff} = (1 + A\phi Re^\gamma Pr^{0,333}) \left( \frac{1 + 2\beta\phi}{1 - \beta\phi} \right)$ <p>A é uma constante de proporcionalidade, <math>\gamma</math> e <math>\beta</math> dependem da resistência interfacial, tamanho, temperatura e o movimento browniano das partículas.</p>	Considera a micro convecção e agregação de partículas.

---

Em outros trabalhos, (TSO; FU; CHAO, 2014) desenvolveram um modelo semi-analítico para determinar a condutividade térmica efetiva de nanofluido de cobre, óxido de titânio e alumínio, explicando o efeito do tamanho e concentração de nanopartículas, além da espessura da camada interfacial. Os resultados apresentaram boa concordância para partículas de maior tamanho quando comparados com os modelos clássicos de Maxwell e Bruggeman, mas para menores tamanhos de nanopartículas observou-se uma relação de decaimento exponencial entre a espessura da nanocamada e o raio das nanopartículas, situação que revelou diferenças com relação a outros modelos encontrados na literatura que levam em conta apenas um parâmetro de entrada para estimar a condutividade térmica efetiva com um perfil de comportamento linear.

(HASSANI et al., 2015) utilizaram o teorema de Vaschy-Buckingham de análise dimensional para prever a condutividade térmica de nanofluidos baseados em diferentes resultados experimentais da literatura. Os autores propuseram uma nova correlação definida

em sete grupos adimensionais (chamados de  $\pi$ -groups) gerados considerando o movimento browniano, concentração, a temperatura e a distribuição de tamanho das nanopartículas. Os resultados foram satisfatórios para a grande maioria dos nanofluidos trabalhados, aproximadamente 98% dos valores ficaram na faixa de desvio máximo de  $\pm 10\%$ .

Muitos autores têm buscado uma correlação geral que consiga prever a condutividade térmica de nanofluidos, situação que torna-se complicada devido à existência de diversos parâmetros e condições de trabalho. Em seu trabalho (MOHAMAD, 2015) analisou alguns resultados e os considerou muito controversos devido ao fato de equações teóricas não tem concordância com o comportamento físico de nanofluidos. O autor também conclui que o movimento browniano das partículas tem pouca contribuição no transporte de energia térmica mesmo que aumentando a condutividade térmica do nanofluido em comparação com o fluido base. Por outro lado, o autor questiona a aplicação na prática avaliando que testes de curto prazo em laboratório não são suficientes para avaliar a praticidade de nanofluidos, destacando que as aglomerações e oxidação das nanopartículas tem efeitos diversos sobre o desempenho do sistema.

#### 2.4.3. *Medição de condutividade térmica*

Na literatura encontram-se diversas experiências realizadas para medir a condutividade térmica de nanofluidos. No entanto, os resultados encontrados em diferentes pesquisas incluindo o mesmo tipo de nanofluido são divergentes. A grande dificuldade e as inconsistências apresentadas na medida experimental de condutividade térmica são associadas ao método de medição utilizado, além da variedade de métodos de síntese de nanopartículas.

Existem dois tipos de técnicas principais para medir as condutividades térmicas: de estado transiente e estacionário. Em geral, as técnicas de estado estacionário são úteis quando a temperatura do material não muda com o tempo. A desvantagem é que uma configuração experimental complexa é necessária. As técnicas transitórias realizam uma medição durante o processo de aquecimento. Sua principal vantagem é a realização de medições mais rápidas.

A Fig. 2.7 mostra de maneira geral as técnicas mais comumente usadas na medição de condutividade térmica de nanofluidos, sendo o método transiente do fio quente, ou simplesmente, THW (do inglês Transient Hot-Wire) a técnica mais utilizada.

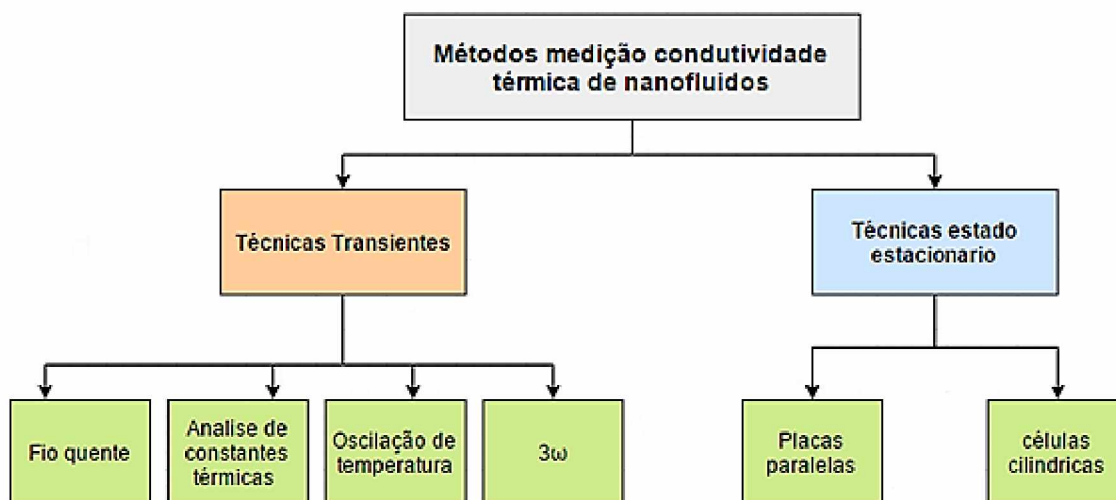


Figura 2.7 - Diferentes técnicas de medição de condutividade térmica para nanofluidos.

Existem várias vantagens para o método do fio quente transiente, sendo a mais importante sua capacidade para eliminar experimentalmente o erro para aplicação em fluidos devido à convecção natural. Além disso, esta técnica é muito rápida em comparação com outros métodos e o desenho do aparelho é também simples em comparação com as disposições necessárias para outras técnicas. Em geral, este método de medição tem aumentado sua popularidade de uso devido ao fato de que a condutividade térmica do líquido pode ser calculada diretamente com resultados confiáveis de repetibilidade e precisão (BASHIRNEZHAD et al., 2015).

A variedade de métodos existentes para medição da condutividade térmica é justificada, porém, um grande número de trabalhos utilizando diferentes técnicas tem apresentado controvérsias entre seus resultados. No entanto, o trabalho de (BUONGIORNO et al., 2009) avaliou a condutividade térmica de amostras idênticas de nanofluidos. As medições foram realizadas por 34 instituições diferentes em todo o mundo através de uma variedade de métodos experimentais, incluindo o método do fio quente, placas paralelas, de estado estacionário e ópticos. A análise dos dados revelaram que os resultados da maioria das instituições situaram-se dentro de um intervalo de  $\pm 10\%$  sobre a média da amostra, com apenas alguns valores discrepantes demonstrando que o método de medição não interfere no resultado. Assim, a divergência entre os resultados obtidos por técnicas diferentes podem ser resultado não do método de medição senão da própria característica do nanofluido.

Na Tabela 2.2 apresenta-se um resumo de alguns dos principais resultados de trabalhos recentes da medição de condutividade térmica em nanofluidos.

Tabela 2.2 - Resultados experimentais de condutividade térmica em nanofluidos

Autor	Nano partícula	Fluido base	Temperatura	Concentração	Aumento na condutividade térmica	Método de Medição
(SOLTANIMEH R; AFRAND, 2016)	MWCNT's	EG 40% H <sub>2</sub> O 60%	25-50 °C	0,025-0,1% vol.	34,7%	KD2 Pro (Decagon Devices, USA) KS1 (Hot wire)
(LI; ZOU, 2016)	SiC	EG 40% H <sub>2</sub> O 60%	10-50°C	0-0,1% vol.	33,8%	KD2 Pro (Decagon Devices, USA) KS1
(HOSSEIN KARIMI DARVANJOOG HI; NASR ESFAHANY, 2016)	SiO <sub>2</sub>	Ethanol	25-70°C	0,15-1,17% vol.	60%	KD2 Pro (Decagon Devices, USA) KS1 (Hot wire)
(OLIVEIRA; CARDENAS C.; BANDARRA F., 2016)	MWCNT's	H <sub>2</sub> O	25-50°C	0,08-0,16% wt	5%	(Linseis) transient hot bridge sensor
(USRI et al., 2015)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	EG / H <sub>2</sub> O 40:60% 50:50% 60:40%	30-70°C	0,5-2% vol.	16% para 40:60%	KD2 Pro (Decagon Devices, USA)
(XING; YU; WANG, 2015)	(S-WNT's) (L-SWNT's) MWNT's	H <sub>2</sub> O	10-60°C	0,1-1% wt.	8,1% (S-SWNT's) 16,2% (L-SWNT's) 5,0 % MWNT's	TC3010L (XIATECH Co. Ltd.) (Hot wire)
(HAJJAR; RASHIDI; GHOZATLOO, 2014)	Oxido de Grafeno	H <sub>2</sub> O	10-40°C	0,05-0,25% wt.	47,5%	Transient shor hot-wire

## 2.5. Viscosidade

A obtenção de um valor aumentado na condutividade térmica relativa não é um parâmetro suficiente para garantir que a utilização de um fluido de transferência de calor pode ser eficiente, outras propriedades como a viscosidade devem ser levadas em consideração. Esta propriedade física do fluido indica o quanto ele é resistente ao escoamento. Após a adição de partículas os nanofluidos tem apresentado uma maior viscosidade. Este aumento tem um impacto negativo representado por uma maior perda de carga e potência de bombeamento. Em seu trabalho (MAHBUBUL; SAIDUR; AMALINA, 2012) destacam parâmetros como o método de preparação, tipo de fluido base, temperatura, morfologia da nanopartículas, concentração de nanopartículas, pH e surfactantes que afetam diretamente a viscosidade dos nanofluidos

### 2.5.1. Fatores que influenciam na medida de viscosidade

#### - Efeito da concentração

Existem muitos relatos na literatura sobre o impacto da concentração de nanopartículas na viscosidade dos nanofluidos. Estas investigações relatam o fato que a viscosidade do nanofluido aumenta na medida que a concentração de nanopartículas aumenta. Deve-se mencionar que algumas pesquisas mostraram que a viscosidade aumenta de forma não linear, enquanto alguns outros pesquisadores relataram que o aumento da viscosidade é linear.

(LI et al., 2014) prepararam nanofluidos com base em etilenoglicol (EG) dispersando nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) com diferentes concentrações em massa entre 1,75% e 10,5% por um método típico de dois passos. As propriedades estruturais das nanopartículas de ZnO seco foram medidas com a técnica de difração de raios x (DRX) e microscopia de transmissão eletrônica (MET). Os autores mediram experimentalmente suas propriedades termofísicas como condutividade térmica e viscosidade. Os resultados experimentais mostraram que a viscosidade aumenta com o aumento da concentração de nanopartículas de ZnO e diminui com a temperatura. Além disso, a viscosidade relativa dos nanofluidos de ZnO-etilenoglicol mostra a mesma dependência da temperatura. Os nanofluidos com concentrações inferiores a 10,5 % em massa possuem comportamento newtoniano.

(HUMINIC et al., 2015) investigaram os efeitos da temperatura e da concentração em massa nas propriedades termofísicas de nanofluidos de carbeto de ferro (FeC) / H<sub>2</sub>O utilizando técnicas de espectroscopia MET, DRX, Raman e espectroscopia no infravermelho (FT-IR) para caracterizar a estrutura, pureza e tamanho das nanopartículas. A condutividade

térmica, viscosidade e a tensão superficial dos nanofluidos FeC / H<sub>2</sub>O foram investigadas em temperaturas de 10 a 70 ° C, para três concentrações (0,1, 0,5 e 1,0 %wt). Os resultados experimentais mostram que a viscosidade dinâmica dos nanofluidos de FeC / H<sub>2</sub>O aumenta com o aumento da concentração de nanopartículas e diminui com aumento da temperatura, em todos os casos estudados. Os dados também indicam que a influência da concentração de nanopartículas na viscosidade torna-se menos significativa para temperaturas acima de 55 ° C.

*- Efeito da temperatura*

Vários pesquisadores indicam a temperatura como parâmetro mais crítico e influente sobre a viscosidade de nanofluidos inclusive pode diminuir consideravelmente a influência da concentração volumétrica com o aumento da temperatura. O incremento da temperatura enfraquece as interações moleculares entre as nanopartículas e o fluido base, motivo pelo qual os resultados apresentam uma tendência decrescente da viscosidade com o aumento da temperatura (GOHARSHADI et al., 2013).

*- Efeito de tamanho e forma*

O efeito da morfologia das partículas, incluindo o tamanho e forma das nanopartículas na viscosidade dos nanofluidos tem sido pouco estudadas. O tamanho da partícula determina a proporção de superfície para um volume com concentração de nanopartículas constante, a suspensão com menor tamanho de partícula tem maior área de interface sólido / líquido que resulta em aumento da viscosidade.

(KARIMI-NAZARABAD; GOHARSHADI; YOUSSEFI, 2016) investigaram o efeito da forma da partícula sobre as propriedades de transporte de nanofluidos de óxido de tungstênio (WO<sub>3</sub>) em glicerol utilizando na síntese dos nanofluidos os métodos de hidrotérmal e micro-ondas na presença e ausência de cloreto de sódio (NaCl). As imagens obtidas em um microscópio (MET) demonstraram que o método de preparação e a presença ou ausência de NaCl influencia na forma das nanopartículas. Para a concentração de 0,5 % em massa, observaram uma redução máxima de 46,9% e mínima de 11,7% na viscosidade comparada com o fluido base para nanofluido que contem nanopartículas de forma esférica e poligonal, respectivamente. Os resultados também mostraram que a viscosidade do glicerol e dos nanofluidos diminui exponencialmente com o aumento da temperatura, e o efeito foi maior para nanopartículas de forma poligonal.

*- Efeito do pH e Surfactantes*

A viscosidade dos nanofluidos também depende do valor de pH e a concentração de surfactante das suspensões. A magnitude do pH estabelece a carga superficial da nanopartícula (potencial zeta). Mantendo a existência de forças de repulsão entre elas com a

mesma carga resultará em interações mínimas entre as nanopartículas para obter suspensões de baixa viscosidade (WANG; LI, 2009).

A utilização de surfactantes também tem um efeito negativo na viscosidade dos nanofluidos, mantendo uma forte dependência do tipo de surfactante e da sua concentração. A fim de diminuir todos estes problemas, a superfície das nanopartículas pode ser modificada por funcionalização. Simplesmente adicionando nanopartículas funcionalizadas no fluido base, pode-se proporcionar estabilidade a longo prazo para os nanofluidos, ajudando a manter uma baixa viscosidade e proporcionando uma boa fluidez (FARAHMANDJOU et al., 2009).

(DRZAZGA et al., 2013) experimentaram nanofluidos à base de água de óxido de cobre com tamanho de partícula de 30-50 nm. Eles adicionaram surfactantes não iônicos (Rokacet O7 e Rokanol K7) em várias suspensões obtendo um aumento na viscosidade. Os nanofluidos preparados fluíram através de um tubo de 4 mm de diâmetro para números de Reynolds entre 8.000 e 50.000, observando que a concentração de surfactante tem efeito de redução do arrasto com uma influência mais positiva no fator de atrito que o negativo provocado pelo aumento da viscosidade. Os valores testados foram muito próximos quando comparados aos valores teóricos. Eles também observaram que Rokacet O7 era adequado para menor número de Reynolds, e o efeito de redução de arrasto era melhor observado com Rokanol K7 para escoamento com maior número de Reynolds.

(SHANBEDI; ZEINALI HERIS; MASKOOKI, 2015) investigaram experimentalmente a influência de diferentes surfactantes incluindo goma arábica (GA), brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB) e dodecil sulfato de sódio (SDS) na estabilidade e propriedades termofísicas de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) em água. Com a finalidade de observar o efeito dos surfactantes nas suspensões foram sintetizados nanofluidos de MWCNT nas razões 0,5-1, 1-1 e 2-1 em concentrações de 0,1 % em massa. O potencial zeta foi utilizado como método para determinar a estabilidade das suspensões. Os resultados indicaram estabilidade relativa das suspensões em todas as proporções, também as propriedades termofísicas das suspensões foram medidas incluindo a viscosidade dinâmica em uma faixa de 20 até 80 °C, observando uma diminuição na viscosidade dos nanofluidos com o aumento da concentração de surfactante.

#### *2.5.2. Correlações para estimar a viscosidade em nanofluidos*

Existem diversas equações teóricas para estimar a viscosidade de uma suspensão de partículas em um fluido base dependendo do tamanho e da concentração das partículas

sólidas. Entre eles, a equação sugerida por (EINSTEIN, 1905) poderia ser rotulada como pioneira, e a maioria de outras derivações foram estabelecidas a partir desse modelo. Os pressupostos baseiam-se no fluido viscoso contendo partículas esféricas diluídas, suspensas e frações de volume de partículas baixas ( $\phi < 0,02$ ). A equação sugerida é representada pela Eq. (2.4) da seguinte forma,

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi)\mu_{bf} \quad (2.4)$$

em que ( $\mu_{nf}$ ) e ( $\mu_{bf}$ ) são a viscosidade da suspensão e fluido base respectivamente e ( $\phi$ ) a concentração volumétrica das partículas. O modelo de Einstein para nanofluidos é de acordo com a suposição de um líquido newtoniano e mostra uma proporcionalidade linear da viscosidade da suspensão com aumento da concentração de nanopartículas. O modelo foi desenvolvido para partículas de forma esférica sem levar em consideração a dependência da temperatura e a interação entre as partículas.

O modelo proposto por (BRINKMAN, 1952) estendeu a formula de Einstein para um meio contínuo considerando a interação das partículas e concentrações inferiores a 4% vol. Neste caso a Eq. (2.5) representa a viscosidade calculada para nanofluidos,

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1 - \phi)^{2,5}} \quad (2.5)$$

embora para concentrações maiores de 0,01% em volume e considerando o efeito devido ao movimento browniano das partículas de uma suspensão de partículas rígidas e esféricas, (BATCHELOR, 1977) propôs a equação expressa pela Eq. (2.6) que reescrita para sua aplicação em nanofluidos,

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi + 6,5\phi^2)\mu_{bf} \quad (2.6)$$

A viscosidade dinâmica dos nanofluidos,  $\mu_{nf}$ , pode ser calculada usando diferentes equações para misturas bifásicas como relatado anteriormente. Um resumo de alguns modelos mais recente de viscosidade de nanofluidos está listado na Tab. 2.3.

Tabela 2.3 - Modelos analíticos e empíricos para estimar a viscosidade dos nanofluidos

Autor	Modelo	Observação
(WANG; XU; S. CHOI, 1999)	$\mu_{nf} = (1 - 7,3\phi + 123\phi^2)\mu_{bf}$	Considera apenas a concentração volumétrica de partículas.
(TODA; FURUSE, 2006)	$\mu_{nf} = \left( \frac{1 + 0,5\delta\phi - \phi}{(1 - \delta\phi)^2(1 - \phi)} \right) \mu_{bf}$ <p>Onde <math>\delta</math> é um fator de correção que depende do tamanho e concentração de partículas.</p>	Considera a interação das partículas. Apenas aplicado para formas esféricas.
(NGUYEN et al., 2007)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1,1250 - 0,0007 T)$ <p>Para uma concentração de 1% vol.</p> $\mu_{nf} = \mu_{bf}(2,1275 - 0,0215 T + 0,0002 T^2)$ <p>Para uma concentração de 4%vol. (T) é o valor de temperatura em °C.</p>	Foi considerado o efeito da temperatura na faixa de 25 até 75°C.
(CHEN et al., 2007)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left( 1 - \frac{\phi}{0,605} \left( \frac{r_a}{r_p} \right)^{1,2} \right)^{-1,5125}$ <p><math>r_a</math> e <math>r_p</math> são os raios dos agregados e a partícula respectivamente.</p>	Considera o efeito da agregação de partículas.
(MASOUMI; SOHRABI; BEHZADMEHR, 2009)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} + \frac{\rho_p V_b d_p^2}{72Cl}$ <p>C é um fator de correção, (l) é distância entre as partículas, <math>V_b</math> e <math>d_p</math> são a velocidade e o diâmetro da partícula.</p>	Considerando a influência da temperatura e densidade das nanopartículas e as propriedades físicas do fluido base
(YANG et al., 2012)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} \phi \left( 1 + 2,5 \left( \frac{r_p + C1 + C2}{r_p} \right)^3 \right)$ <p>C1 e C2 são variáveis que dependem da camada de absorção e solvatação da nanopartículas.</p>	Considera as camadas de absorção e solvatação no caso do surfactante.

Em outros estudos, (MEYBODI et al., 2016) propuseram uma correlação utilizando diferentes resultados experimentais encontrados na literatura para nanofluidos de óxido de cobre, óxido de alumínio, óxido de silício e titânio. As previsões obtidas por esta nova correlação estão em melhor concordância em comparação com valores experimentais do que os modelos clássicos, especialmente para alta temperatura, alta concentração volumétrica e altos valores de viscosidade.

(AHAMMED; ASIRVATHAM; WONGWISES, 2016) estudaram o efeito da concentração volumétrica e temperatura na viscosidade dinâmica de nanofluidos de grafeno/H<sub>2</sub>O. Os autores desenvolveram uma correlação que quando comparada com os modelos de Brinkman e (WANG; XU; S. CHOI, 1999) não conseguiram boa concordância para os dados experimentais obtidos. A viscosidade teve efeitos significativos na estabilidade e propriedades de transferência de calor dos nanofluidos preparados. Efeitos como a morfologia das folhas e adição de surfactantes foram declarados fatores importantes na viscosidade dos nanofluidos.

Geralmente, são utilizados vários métodos para a determinação experimental da viscosidade, nomeadamente, cilindros concêntricos, ou métodos de cone e placa que de acordo com parâmetros como velocidade angular, ângulo de deflexão ou tensão de cisalhamento, pode-se obter uma proporcionalidade baseada em modelo de mecânica clássica para a viscosidade do fluido.

Para a medição experimental da viscosidade em nanofluidos atualmente existem três tipos de equipamentos que tem sido utilizado na maioria de pesquisas com nanofluidos: o capilar, o de corpo móvel e o rotacional. Os viscosímetros de corpo móvel permitem determinar a viscosidade de fluidos newtonianos através de um pistão metálico que se move dentro de uma câmara preenchida com o fluido. A geometria do corpo geralmente é uma esfera (viscosímetro Hoppler), no entanto, corpos cilíndricos e agulha também podem ser utilizados. O período de oscilação do corpo móvel é proporcional com a viscosidade, para uma intensidade de campo e temperatura constante. Nos viscosímetros rotacionais a viscosidade de fluidos pode ser calculada através da medição do torque requerido para girar a parte móvel do sensor que é separado de sua parte fixa pelo fluido de teste, a uma dada velocidade angular. Existem várias versões de viscosímetros rotativos, os mais comuns em relação à geometria são do tipo com cilindros concêntricos, placas paralelas e de cone-placa. Os viscosímetros capilares são derivados de sistemas de medição de queda de pressão em microcanais e determinam a viscosidade do fluido através da medida de velocidade do escoamento num tubo capilar sob a ação de uma diferença de pressão constante. Sem embargo, a aplicação deste método é limitada pela relação entre as partículas e o diâmetro do tubo.

A Tab. 2.4 apresenta uma lista que inclui trabalhos experimentais sobre a influência da concentração de nanopartículas sobre a viscosidade de nanofluidos. Na maioria dos casos os resultados mostraram um aumento significativo comparado com o fluido base.

Tabela 2.4 - Resultados experimentais de viscosidade em nanofluidos

Autor	Nano partículas	Fluido base	Temperatura	Concentração	Aumento na Viscosidade	Método de Medição
(HUMINIC et al., 2015)	FeC	H <sub>2</sub> O	10-70 °C	0,1 -1 %wt	34%	Brookfield Program viscometer
(SHANBEDI; ZEINALI HERIS; MASKOOKI, 2015)	MWCNT's	H <sub>2</sub> O /CTAB-STD	20-80 °C	0,1% wt para razões de 0,5/1,0/2	20% para Água/CTAB com razão de 0,5-1	LVDVIII Ultra Rheometer,
(SYAM SUNDAR et al., 2014)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	EG / H <sub>2</sub> O 20:80% 40-60% 60:40%	0-60 °C	0,3-1,5% vol.	230%	AR-1000 rheometer (TA Instruments
(LI et al., 2014)	ZnO	EG	15-55 °C	1,75-10,5% wt	Entre 150-200%	Rotation Rheometer (Malvern Instruments
(ESFAHANI; LANGURI; NUNNA, 2016)	Óxido de Grafeno	H <sub>2</sub> O desionizada	25-60°C	0,01-0,5%wt	130%	AR 500 rheometer (TA instruments

## 2.6. Nanofluidos em sistemas de arrefecimento automotivo

Nanofluidos têm grande potencial de aplicação em equipamentos de transferência de calor sendo considerado seu uso como adequado em processos práticos de transporte térmico. Isso dá oportunidade para os pesquisadores e engenheiros para desenvolver

dispositivos térmicos que consigam alcançar alta eficiência térmica, destacando como melhor indicador o aumento na condutividade térmica. O nosso foco principal é avaliar nanofluidos em sistemas de transferência de calor, especificamente em trocadores de calor de escoamento cruzado de um automóvel ou como comumente é chamado de radiador.

Alguns pesquisadores afirmam que aumentos significativos no coeficiente de transferência de calor podem ser alcançados sem sacrificar o poder de bombeamento baseados na teoria de (CHOI et al., 2001), por outro lado outros afirmam que o incremento do coeficiente de transferência de calor é limitado e o aumento é compensado pelo aumento da potência de bombeamento como narrado por (WILLIAMS; BUONGIORNO; HU, 2008).

Em relação aos refrigerantes utilizados em aplicações automotivas algumas características particulares são necessárias nas propriedades térmicas e físicas do fluido, tal como a condutividade térmica, calor específico e ponto de ebulição altos e ao mesmo tempo uma viscosidade e ponto de congelamento baixos.

Em um sistema de arrefecimento automotivo, o radiador é um trocador de calor acoplado a canais distribuídos ao redor dos cabeçotes do motor, através do qual o fluido de arrefecimento é bombeado. Diferentes métodos têm sido propostos para melhorar o desempenho da transferência de calor dos radiadores de automóveis, e eles podem ser classificados em técnicas ativas e passivas.(SHRIKHANDE; KRIPLANI, 2014)(LEAL et al., 2013). A principal desvantagem dos métodos de aprimoramento ativo (ondas de ultrassom, atuação piezoelétrica, etc.) é a necessidade de fontes de energia externas, enquanto as técnicas passivas não são dependentes de fontes externas e portanto são definidas de menor custo operacional e maior confiabilidade, especialmente em dispositivos onde o tamanho e peso jogam um papel importante na eficiência da transferência de calor. Embora as técnicas passivas tradicionais como aumento na área de troca de calor, texturização das superfícies e microcanais (LEONG et al., 2010a) tenham sido objeto de muito estudo no século passado, atualmente esta técnica alcançou certo esgotamento e é em muitos casos ultrapassado. Alguns autores realizaram experimentos utilizando nanofluidos em radiadores automotivos e chegaram a obter resultados promissores que mostram melhorias na troca de calor comparados com a utilização do fluido base.

(NARAKI et al., 2013) estudaram o efeito de nanofluidos de óxido de cobre CuO/ H<sub>2</sub>O sobre o coeficiente de transferência total de calor de um sistema de arrefecimento de motor. As experiências foram realizadas em regime de escoamento laminar. Dois métodos foram utilizados para estabilizar os nanofluidos, isto é, do valor de pH e a adição de surfactante adequado. Os autores concluíram que nanofluidos altamente estáveis e insignificamente aglomerados foram preparados com o valor de pH de 10,1 e com a adição de dodecilsulfato

de sódio (SDS) como surfactante. A concentração em volume de nanopartículas utilizada foi de 0,15 a 0,4% em massa, e a temperatura de entrada foi de 50 até 80°C. Neste estudo observou-se que o coeficiente de transferência de calor global foi melhorado em 6% e 8% para 0,15 e 0,4% respectivamente.

(PEYGHAMBARZADEH et al., 2013) determinaram experimentalmente o desempenho da transferência de calor em radiadores automotivos usando nanofluidos de Cu/H<sub>2</sub>O e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O. Os resultados mostraram que o coeficiente global de transferência de calor apresentou um aumento de até 9%, utilizando nanofluido como refrigerante comparado com a água. Esse aumento foi mais pronunciado na medida que foi aumentada a concentração de nanopartículas e a vazão de nanofluidos, porém houve uma diminuição no coeficiente global de transferência de calor ao aumentar a temperatura de entrada do nanofluido, o que diferiu dos resultados apresentados por outros autores.

(HUSSEIN et al., 2014a) realizaram experimentos em um radiador automotivo utilizando nanofluidos de TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O e SiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O para avaliar a transferência de calor sob regime de escoamento laminar. As condições de operação foram analisadas para vazão volumétrica em 2-8 l/min na entrada em uma faixa de temperatura 60-80°C e concentração em volume de 1-2%. Os resultados mostraram que o número de Nusselt aumenta com a vazão volumétrica e aumenta ligeiramente com aumento da temperatura de entrada e concentração em volume do nanofluido. Foi proposta uma equação de regressão linear para as variáveis de entrada (vazão em volume, temperatura de entrada e concentração em volume de nanofluido) e de resposta (número de Nusselt). Um aumento na transferência de calor foi observado e foi associado com a concentração das nanopartículas. Para um máximo número de Nusselt observou-se melhorias até 11% e 22,5% para TiO<sub>2</sub> e nanopartículas de SiO<sub>2</sub>, respectivamente, comparados com água. Os resultados experimentais obtidos mostram boa concordância com os dados de outros pesquisadores, com um desvio de apenas cerca de 4%.

(SAMIRA et al., 2014) analisaram a queda de pressão e o fator de atrito em um radiador automotivo para nanopartículas de óxido de cobre (CuO) dispersas em H<sub>2</sub>O/etilenoglicol (60:40% vol.) com concentrações de 0,05-0,8% vol. Os ensaios foram realizados para temperaturas de entrada de nanofluido de 35-55°C demonstrando que a presença de nanopartículas provocou também um aumento na queda de pressão do sistema, efeito que se intensificou com o aumento do número de Reynolds. A partir dos dados obtidos nas experiências, foi criada uma correlação empírica que relaciona a queda de pressão em função da temperatura, concentração volumétrica e o número de Reynolds com uma faixa de erro de -8% a 14%.

(SONAGE; MOHANAN, 2015) sintetizaram nanofluidos Zn/H<sub>2</sub>O e ZnO/H<sub>2</sub>O utilizando os métodos de um e dois passos respectivamente; a caracterização foi feita com nanopartículas de 41 nm para o zinco (Zn) e de 35 nm para ZnO. Três nanofluidos de Zn-H<sub>2</sub>O e três ZnO-H<sub>2</sub>O em diferentes concentrações (0.15%, 0.25% e 0.5% vol.) foram testados com o objetivo de realizar uma avaliação experimental e calcular o aumento do coeficiente de transferência de calor e a queda de pressão em relação à água para regime de escoamento turbulento com número de Reynolds entre 4000 e 20000. Entre os nanofluidos testados, o nanofluido Zn-H<sub>2</sub>O com uma concentração de 0,5% provou ter o melhor desempenho de transferência de calor. Também foi avaliado teoricamente o desempenho do nanofluido em um radiador de automóvel para obter benefícios se tornando o nanofluido um fluido de energia eficiente para o sistema de arrefecimento do motor.

(ALI; EL-LEATHY; AL-SOFYANY, 2015) em sua investigação experimental avaliaram a taxa de transferência de calor por convecção forçada para nanofluidos de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/H<sub>2</sub>O em um radiador automotivo com concentrações de 0,1; 0,5; 1%; 1,5% e 2% vol. Os resultados mostraram que a transferência de calor do nanofluido aumentou até uma concentração ótima de 1% vol., sendo que para concentrações maiores foi observado o início gradual do processo de danificação. Foram utilizadas as equações de temperatura média logarítmica (LTMD) e efetividade (NUT) para o cálculo e validação das variáveis de estudo. Os incrementos para número de Nusselt e taxa de transferência de calor foram de 14%, enquanto a potência de bombeamento também teve incrementos máximos de 40% em função da concentração de nanopartículas.

(SRINIVAS et al., 2015) estudaram o efeito anticorrosivo e as propriedades de transferência de calor melhoradas de nanofluidos com base de água carboxilada. Concentrações de 0,025, 0,05 e 0,1% em massa de nanopartículas de nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT'S) em água deionizada com ácido sebáico (C<sub>10</sub>H<sub>18</sub>O<sub>4</sub>) como aditivo foram testados para avaliar corrosão e características de transferência de calor. Estudos de corrosão feitos segundo a norma ASTM D-1384 mostram que o nanofluido preparado tem baixo índice de corrosão sendo adequado para o ambiente do automóvel. Além de MWCNTs, foram preparados nanofluidos com nanopartículas de prata, cobre e óxido de alumínio e foram também testadas quanto ao desempenho de corrosão, observando efeito considerável nas superfícies do sistema de arrefecimento. Os estudos de transferência de calor foram feitos, em uma faixa de número de Reynolds de 2500-6000. Testes de desempenho na transferência de calor de nanofluidos foi realizado em um radiador automotivo com velocidades de entrada do ar mantidas em 5, 10 e 15 m/s. O coeficiente global de transferência de calor melhorou significativamente. Encontrou-se também que a velocidade

de ar, vazão do líquido de arrefecimento e gradientes de temperatura na parede desempenham um papel importante na intensificação do coeficiente global de transferência de calor.

(AMIRI et al., 2015) dispersaram nanofolhas de grafeno dopadas com nitrogênio em uma mistura de  $H_2O/EG$  (40:60% vol.). As propriedades termofísicas e reológicas das concentrações de grafeno (0-0,01% em massa) foram medidas experimentalmente para avaliar o coeficiente de transferência de calor e desempenho térmico. O nanofluido foi testado em temperaturas de 35 até 55°C e vazões de 3-7 l/min. Os resultados mostraram aumentos significativos na queda de pressão em diferentes temperaturas e concentrações, além de baixo coeficiente de atrito. Para o coeficiente de transferência de calor e desempenho térmico os ganhos foram de 83% e 60% respectivamente, situação que levou os autores a concluir que o nanofluido pode ser utilizado como possível substituto de fluido de arrefecimento.

(SARAFRAZ; HORMOZI, 2016) apresentam resultados sobre as características de transferência de calor e de queda de pressão de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs), no interior de um trocador de calor de placas tipo Chevron, considerando a formação de incrustações dos nanotubos de carbono. Os resultados mostram a influência dos parâmetros de funcionamento, tais como características de escoamento ( $700 < Re < 25000$ ), concentração (0,5-1,5% vol.) e temperatura de entrada de (50 - 70°C) no coeficiente global de transferência de calor e na queda de pressão. Os resultados também demonstraram que o coeficiente de transferência de calor é intensificado quando a vazão volumétrica e a concentração de nanopartículas aumentam. A queda de pressão foi penalizada com ligeiros aumentos em função da vazão volumétrica e da concentração. Para condições de operação em longo prazo, foi analisada a resistência ao escoamento devido à formação de incrustações sendo também significativa, esta resistência aumentou com a concentração volumétrica dos nanofluidos, ocasionando uma diminuição do coeficiente de transferência de calor ao longo do tempo.

(DEVIREDDY; MEKALA; VEEREDHI, 2016) determinaram o desempenho térmico e o aumento no coeficiente de transferência de calor por convecção de nanofluidos de  $TiO_2$  em  $H_2O/EG$  (60:40 %vol.), em um radiador automotivo. Os nanofluidos com concentrações de 0,1%, 0,3% e 0,5% em volume foram testados nos experimentos na faixa de 4000-15000 para o número de Reynolds e temperaturas de entrada na faixa de 35 até 55°C, a velocidade do ar na direção transversal foi fixada durante todos os ensaios. Os resultados demonstraram que o aumento do número de Reynolds para o nanofluido apresentou um maior impacto na avaliação do desempenho térmico quando comparado com a temperatura de entrada. Para o coeficiente de transferência de calor por convecção o ganho máximo foi de 37%.

(OLIVEIRA, 2016) avaliou experimentalmente o desempenho térmico de nanofluidos de nanotubos de carbono e grafeno, dispersos em uma mistura de H<sub>2</sub>O/EG (70/30%) e concentração de (0,1-0,3% em massa) em radiadores automotivos. A condutividade térmica foi medida apresentando aumentos de 7,6% e 5,9% respectivamente. O autor também avaliou experimentalmente outras propriedades como viscosidade e densidade em uma faixa de temperatura de 30 até 80°C observando um aumento significativo na viscosidade com o aumento na concentração de nanopartículas atingindo um máximo de 8,6% para nanofluidos de MWCNT. Os resultados obtidos para a análise de desempenho térmico não foram satisfatórios, apresentando ligeiros ganhos para temperaturas de 50 e 60°C e para temperaturas maiores o desempenho foi menor destacando uma possível degradação de nanofluidos quando trabalham em altas temperaturas. Além disso, o autor faz uma análise complementar para a potência de bombeamento indicando que quando os nanofluidos operam provocam um aumento significativo de até 23% na potência que o inversor de frequência entrega ao motor que aciona a bomba para todas condições de testes.

Um resumo das principais pesquisas sobre o desempenho para sistema de arrefecimento do veículo é medição de propriedades termofísicas dos nanofluidos é descrito na Tab. 2.5.

Tabela 2.5 - Resumo dos estudos numérico e experimentais de nanofluido para sistemas de arrefecimento.

Autor	Nanofluido	Tamanho	$\phi$	Condições de ensaios	Resultado
(LEONG et al., 2010b)	CuO/EG	-	0 - 2,0 % vol.	Reynolds: 5000-7000 Temperatura: 70-95 °C.	3,8% incremento taxa de transferência de calor.
(PEYGHAMBARZA DEH et al., 2011)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 nm	0-1% vol.	Vazão: 2-5 l/min Temperatura: 37-49 °C	40% taxa de transferência de calor

(IJAM; SAIDUR, 2012)	TiO <sub>2</sub> , SiC/H <sub>2</sub> O	12 e 27nm	0,8- 4% vol.	Vazão mássica: 0,37-0,40 kg/s $\Delta T_{liq}$ : 50 °C	12,43% coeficiente de transferência de calor.
(NARAKI et al., 2013)	CuO/ H <sub>2</sub> O	60 nm	0,04-0,4% wt.	Vazão: 0,3-0,5 m <sup>3</sup> /h Temperatura: 50-80 °C	23% taxa de transferência de calor
(EBRAHIMI et al., 2014)	SiO <sub>2</sub> – H <sub>2</sub> O	-	0,1-0,4% wt.	Reynolds: 9000-24000 Temperatura: 43-60 °C	9,3% no coeficiente de transferência de calor.
(HUSSEIN et al., 2014b)	TiO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O, SiO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O	30 nm	1-2,5% vol.	Reynolds: 250-1750 Temperatura: 80 °C	20% e 32% para TiO <sub>2</sub> e SiO <sub>2</sub> na taxa de transferência de calor.
(ABBASI; BANIAMERIAN, 2014)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Au, CuO, TiO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O	-	1% para todos os nanofluidos	Velocidade fluido: 0,0084-0,01686 m/s Fluxo de calor: 10kJ/m <sup>2</sup>	Ganho maior do coeficiente de transferência de calor para Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
(DELAVARI; HASHEMABADI, 2014)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG	-	0,1-1% vol.	Reynolds: 9000-24000 Temperatura: 45 °C	Número de Nusselt 45% Para Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG
(HATAMI; GANJI; GORJI-BANDPY, 2014)	CuO- Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - TiO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O, TiO <sub>2</sub> / (EG/ H <sub>2</sub> O)	-	0,04% vol.	Carga motor: 20-60%	Nanofluido TiO <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O aumentou 10% de recuperação de calor.

(ALI et al., 2015)	ZnO- H <sub>2</sub> O	20 nm	0,01-0,3% vol.	Vazão: 7-11 l/min Temperatura: 45-55 °C	46% na taxa de taxa de transferência de calor.
(TIWARI; GHOSH; SARKAR, 2015)	CeO <sub>2</sub> - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - TiO <sub>2</sub> - SiO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O	30 nm 45 nm 10 nm	0-3% vol.	Vazão: 1-4 l/min Temperatura: 30 °C	35,9% vol. De ganho para CeO <sub>2</sub> .
(ELSEBAY et al., 2016)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O Cu/ H <sub>2</sub> O	-	1-7% vol.	Reynolds: 250-1750 Temperatura: 80 °C	45% de incremento para nanofluido Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O
(OLIVEIRA, 2016)	MWCNT/ H <sub>2</sub> O grafeno/( H <sub>2</sub> O -EG 70:30%)	30-50 nm	0,05-0,16% wt. (MWCNT) 0,05-0,3% wt. (grafeno)	Vazão: 0,08-0,11 kg/s Temperatura: 60-90 °C	8% incremento máximo para nanofluido de grafeno.
(DEVIREDDY; MEKALA; VEEREDHI, 2016)	TiO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O -EG (70:30%)	21 nm	0.1%, 0.3% 0.5% vol.	Vazão 2-5 l/min Temperatura 35-45 °C	37% aumento na taxa de transferência de calor

## CAPITULO III

### MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação experimental do desempenho térmico e da perda de carga com nanofluidos foi dividida em três etapas: a primeira etapa foi a produção de nanofluidos estáveis; Em uma segunda etapa, as propriedades térmicas dos nanofluidos (condutividade térmica, viscosidade, densidade e calor específico) foram determinadas experimentalmente; finalmente, a terceira etapa compreendeu os testes experimentais em um radiador automotivo, utilizando nanofluidos como fluido de arrefecimento. Para tais experimentos, foi utilizada uma bancada experimental desenvolvida e instrumentada no Laboratório de Energia e Sistemas térmicos da Universidade Federal de Uberlândia.

Também serão vistos neste capítulo a descrição dos aparatos experimentais, as modificações introduzidas na bancada e os procedimentos de teste de validação da bancada.

#### 3.1. Síntese e caracterização de nanofluidos

O desempenho de trocadores de calor pode ser melhorado utilizando nanofluidos como fluido de trabalho. Neste trabalho, foram utilizadas nanopartículas de grafeno para preparar os nanofluidos. O fluido base foi uma mistura entre H<sub>2</sub>O/EG (50% vol.), que é o fluido de arrefecimento utilizado em diversos radiadores.

Os nanofluidos avaliados no presente trabalho foram sintetizados utilizando um método de dois passos, denominado homogeneização a alta pressão. Uma mistura grafeno/ H<sub>2</sub>O funcionalizada foi adquirida junto à empresa *Nanostructured & Amorphous* e posteriormente diluída em mistura H<sub>2</sub>O / EG, de modo a garantir as concentrações desejadas. A Fig. 3.1 mostra um esquema do processo de homogeneização a alta pressão.

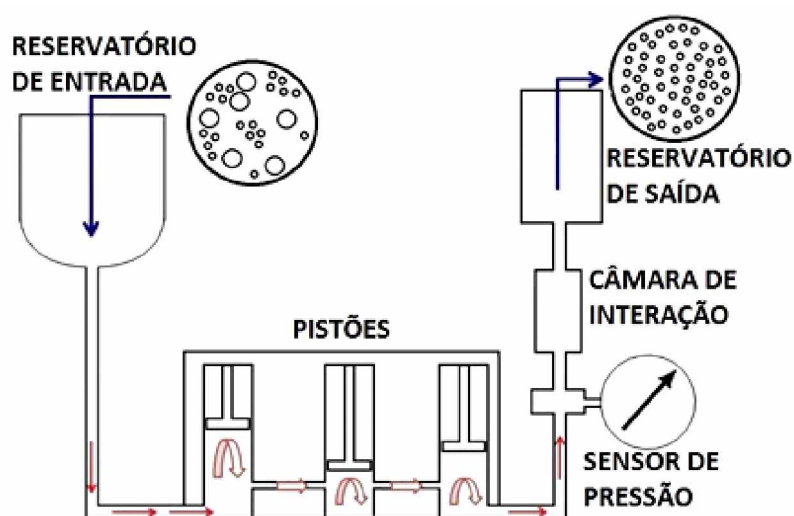


Figura 3.1 - Esquema básico para o processo de homogeneização de alta pressão.

O processo de homogeneização por alta pressão consiste em um equipamento onde a mistura é pressurizada, por meio de pistões, e depois esse fluido é direcionado a uma câmara de interação. Nessa câmara, a combinação de elevadas taxas de cisalhamento, energia de cavitação induzida por grandes gradientes de pressão e impactos da mistura com as paredes é responsável por quebrar as aglomerações de nanopartículas, deixando-as dispersas de forma homogênea no fluido base. A Tab. 3.1 apresenta os dados da solução funcionalizada fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.1 - Propriedades da solução de grafeno/ H<sub>2</sub>O.

Propriedades da solução grafeno/ H <sub>2</sub> O	
Espessura da nanopartícula	0,55 - 3,74 [nm]
Pureza	> 90%
Concentração de nanopartículas	5% em massa
Número de camadas	50
Área superficial específica da nanopartícula	> 500 [m <sup>2</sup> /g]
Massa específica da nanopartícula	2100 [kg/m <sup>3</sup> ]
Calor específico da nanopartícula	0,710 [kJ/kgK]
Condutividade térmica da nanopartícula	5000 [W/mK]

A solução original apresentou uma concentração mássica de 4,2%, valor utilizado para preparar os nanofluidos. A mistura foi diluída em uma quantia adicional de água, de modo a garantir a concentração desejada de nanopartículas, além da concentração desejada de etilenoglicol (50%) no fluido base. Utilizando um microscópio eletrônico de transmissão (MET) foi possível observar claramente, como era esperado, que a estrutura do grafeno é semelhante a uma folha, como mostra a Fig. 3.2a com ampliação de 1 $\mu$ m, e sua espessura com ampliação de 100 nm, conforme ilustra a Fig. 3.2b.

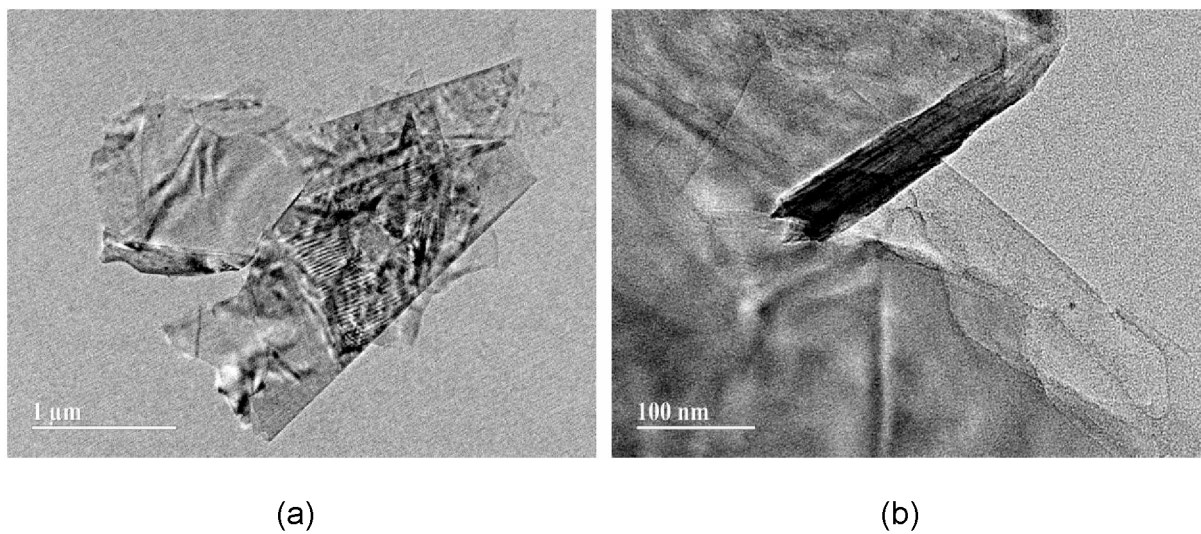


Figura 3.2 - Imagens obtidas por MET do grafeno que mostram: (a) sua estrutura e (b) sua espessura.

A presença de surfactante nos nanofluidos originais foi um parâmetro desconsiderado, pois a concentração de surfactante nos nanofluidos após a diluição foi desprezível (sempre inferior a 0,02%). Além disso, a viscosidade dos nanofluidos foi medida sempre próxima a do fluido base. Para determinar o volume de água e etilenoglicol que deveria ser adicionado à solução original para obter a concentração desejada dos nanofluidos, previamente, definiu-se a concentração volumétrica desejada para cada nanofluido ( $\phi_{final} = 0,01; 0,05$  e  $0,1\%$ ) e o volume final necessário para a realização de todos os testes experimentais e medição de propriedades termofísicas foi ( $V_{final}$ ) de 5500 ml. Logo, pode-se definir o volume das nanopartículas presentes na solução de acordo com a Eq. (3.1)

$$V_{np} = \phi_{final} + V_{final} \quad (3.1)$$

O volume de solução necessário para preparar o nanofluido com a concentração desejada é dado pela soma do volume de nanopartículas ( $V_{np}$ ) e do volume do fluido base da solução ( $V_{bf}$ ), como apresenta a Eq. (3.2).

$$V_{sol} = V_{np} + V_{bf} \quad (3.2)$$

Cada amostra foi introduzida em um processo de homogeneização recirculada durante 1 hora, sob uma pressão de 400 bar, valor considerado para homogeneizar e não aquecer a amostra, pois o aumento da temperatura na câmara de homogeneizado, produto das altas taxas de cisalhamento entre os pistões e o fluido pode provocar a sedimentação das partículas. Assim, o equipamento possui um trocador de calor que funciona em conjunto com um banho térmico inicialmente mantido a 15°C para controlar a temperatura da amostra durante o processo. A Fig. 3.3 demonstra o equipamento utilizado na preparação das amostras.

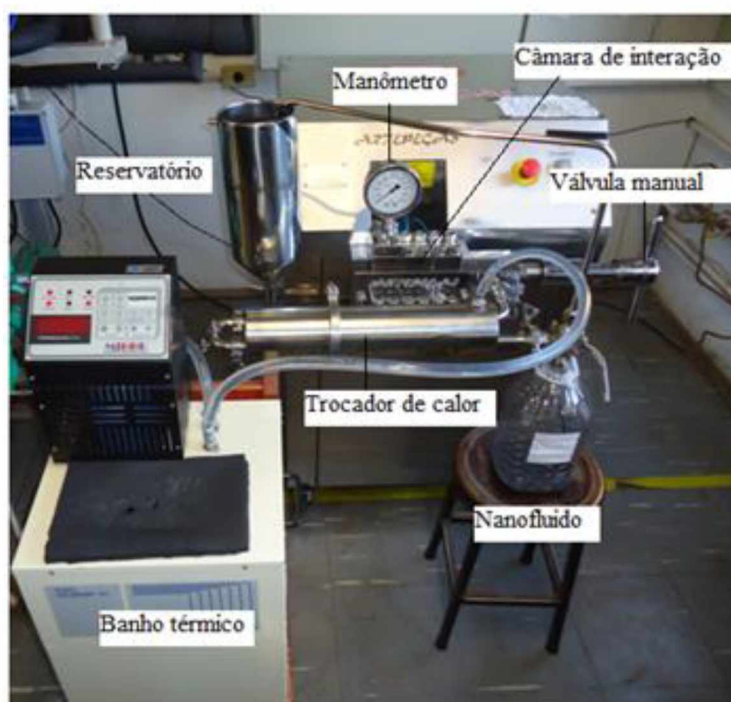


Figura 3.3 - Equipamento em operação para um processo de homogeneização de alta pressão.

Após a preparação das amostras, a concentração real dos nanofluidos foi verificada por meio da evaporação de pequenas amostras. A concentração mássica foi determinada experimentalmente em função da massa de nanopartículas ( $m_{np}$ ) e do fluido base ( $m_{bf}$ ), respectivamente, como apresentado na Eq. (3.3)

$$\%wt_{nf} = \frac{m_{np}}{m_{nf}} = \frac{m_{np}}{m_{np} + m_{bf}} \quad (3.3)$$

Portanto, a concentração volumétrica é definida pela Eq. (3.4)

$$\phi_{nf} = \frac{\frac{m_{np}}{\rho_{np}}}{\frac{m_{np}}{\rho_{np}} + \frac{m_{bf}}{\rho_{bf}}} \quad (3.4)$$

A Tab. 3.2 apresenta a concentração final das amostras após análises gravimétricas por evaporação, obtida a partir de várias medições realizadas com pequenas quantidades de volume (10 ml) para cada concentração preparada.

Tabela 3.2 - Concentração das amostras de nanofluido após produção.

Amostra	$\phi$ [%] (desejado)	$\phi$ [%] (obtido)	wt [%] (obtido)
NG1	0,01	0,011	0,024
NG2	0,05	0,075	0,155
NG3	0,1	0,150	0,330

A estabilidade dos nanofluidos foi avaliada visualmente, observando-se na ocorrência da sedimentação de pequenas amostras em tubos de ensaios. A Fig. 3.4 mostra que após 30 dias, as amostras apresentavam leve sedimentação de nanopartículas no fundo do recipiente.

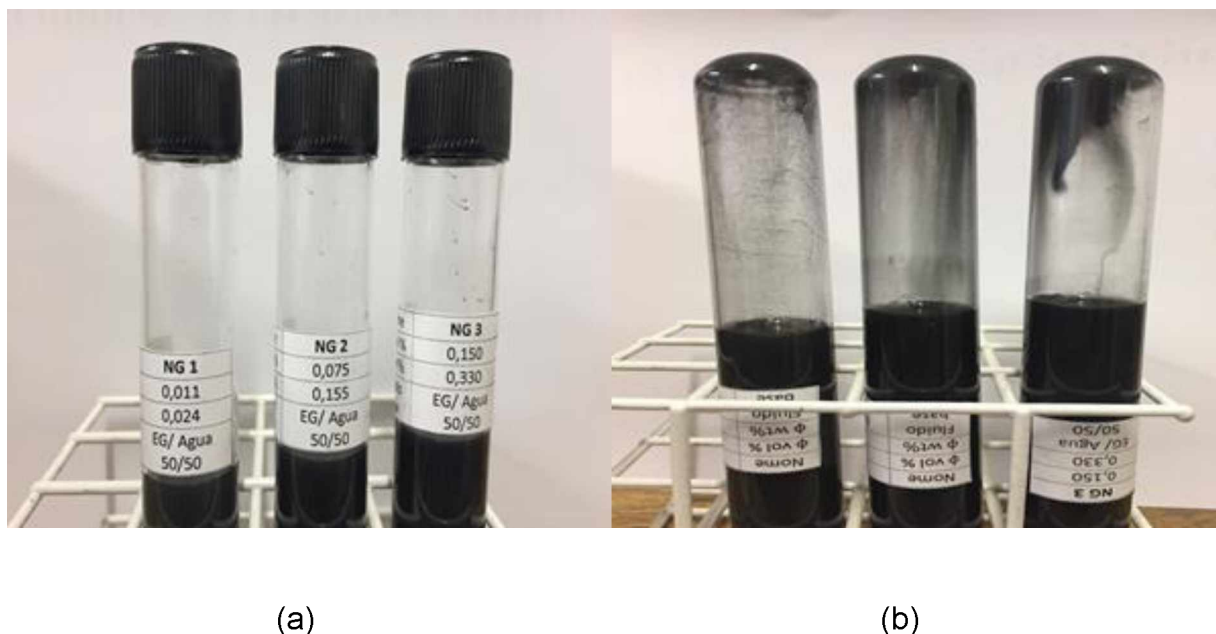


Figura 3.4 - (a) Amostras no momento da preparação. (b) Amostras após 30 dias da preparação.

## 3.2. Medição das propriedades termofísicas dos nanofluidos

### 3.2.1. Condutividade Térmica

A condutividade térmica de nanofluidos foi medida usando a técnica da ponte quente transiente (THB-Transient Hot Bridge), por meio do sensor LINSEIS THB-1. Este método é uma evolução do método de fio quente transiente, que fornece resultados mais exatos e de forma mais independente do operador. O software ligado ao sensor otimiza o processo de medição de modo que a incerteza final é mínima. A Fig. 3.5 ilustra o equipamento utilizado para medição de condutividade térmica dos nanofluidos produzidos.

O método do fio quente transiente convencional tem sido o mais utilizado pelos pesquisadores para a medição da condutividade térmica de nanofluidos, mas ainda assim apresenta algumas desvantagens, entre elas: a perda de calor entre os condutores elétricos, a baixa sensibilidade entre temperatura e tensão de saída do sensor e a alta sensibilidade à tensão mecânica. O sensor tipo THB-1 utilizado elimina em parte estas desvantagens, aumentando a sensibilidade do sinal à temperatura devido a uma configuração de uma ponte

entre os pequenos resistores elétricos, que forma um condutor plano. Este condutor é dividido em dois resistores, de comprimentos diferentes, que resultam numa única fonte de calor. Em contraste com as configurações de pontes com algumas das suas resistências localizadas remotamente da área de medição, um sensor tipo THB é completamente circundado pela amostra. Assim, não são introduzidos erros pelos fios da ponte ou por qualquer fonte de ruído externa.



Figura 3.5 - Sensor THB-1 (medição de condutividade térmica). Disponível em (<https://www.linseis.com/en/our-products/thermal-diffusivity-thermal-conductivity/thbtransient-hot-bridge/>).

A ideia do sensor THB-1 é criar um perfil de temperatura não homogênea dentro da amostra por um aquecimento característico não uniforme. Para este efeito, as resistências do sensor estão dispostas em posições a partir das quais produzem um perfil de temperatura axialmente simétrico de três máximos característicos. A ponte em desequilíbrio gera uma mudança de tensão na saída que é função da medida de condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico da amostra. O aumento transiente da temperatura no fio, medida através do termopar no intervalo de tempo da realização do experimento depende da condutividade térmica do líquido circundante utilizado no teste. O modelo matemático, portanto é representado pela Eq. (3.5),

$$k_m \sim \frac{P_o}{L \cdot \Delta T(t)} F(t) \quad (3.5)$$

sendo  $P_o$  a taxa de transferência de calor e por unidade de área,  $L$  é o comprimento de cada resistor da ponte,  $t$  o tempo contado a partir da liberação da corrente elétrica,  $\Delta T$  a temperatura

média,  $F(t)$  é uma propriedade que depende da geometria do sensor,  $k_m$  é a condutividade térmica do fluido.

Para a realização da medição, o sensor foi introduzido na cavidade do aparato, na qual é inserido o fluido de teste. Para manter o fluido na temperatura de medição desejada, um banho termostático auxiliar (Microquímica MQBM-01) foi utilizado. O equipamento permite a seleção digital da temperatura da água com uma resolução de  $0,1^\circ\text{C}$ , em um intervalo de trabalho entre  $-20^\circ\text{C}$  e  $+150^\circ\text{C}$ .

Além disso, o equipamento tem capacidade para 9 litros e uma vazão de circulação de aproximadamente 6 litros/min, permitindo uma boa homogeneização da temperatura do líquido. O fluido do banho térmico é retirado de circulação e removido da cavidade antes do início de cada teste de condutividade térmica com a finalidade de manter uma estabilidade na temperatura do fluido de teste e reduzir efeitos de convecção natural. O banho termostático e o equipamento para medida de condutividade térmica são mostrados na Fig. 3.6.



(a)



(b)

Figura 3.6 - (a) Banho térmico, (b) aparato experimental para medição de condutividade térmica.

O equipamento THB-1 é diretamente conectado ao computador, por meio de software próprio, para controle dos parâmetros de testes e visualização dos resultados. A

condutividade térmica é medida em um processo transiente, ou seja, dependente do tempo de medição. Desta forma, a potência dissipada e o tempo de aquisição de dados devem ser ajustados de forma que, o software seja capaz de calcular a propriedade. A Fig. 3.7 mostra a interface para ajuste dos parâmetros corrente elétrica e tempo de teste.

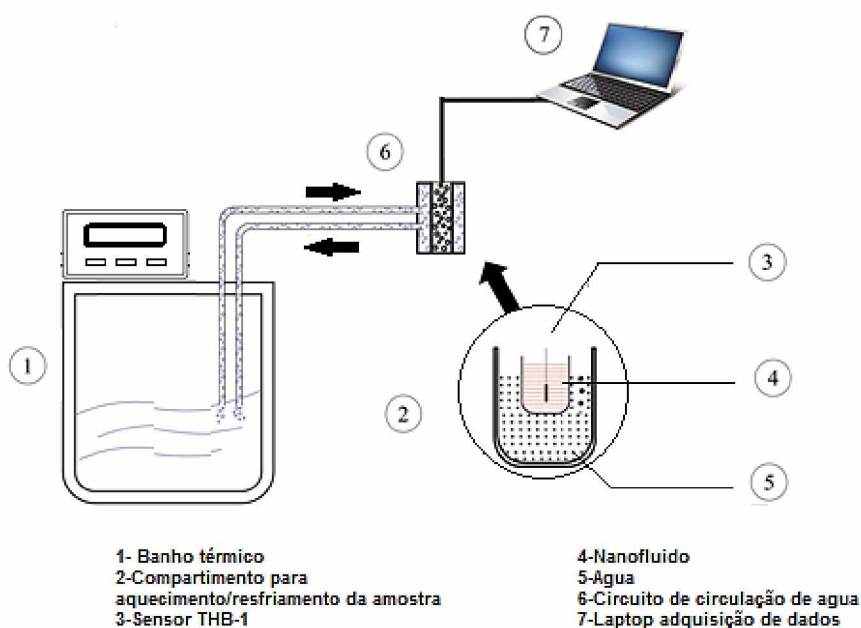


Figura 3.7 - Configuração experimental para medição da condutividade térmica.

Por último, apresenta-se na Fig. 3.8 a interface principal do software que mostra os resultados obtidos para condutividade térmica da amostra. No caso de impossibilidade de cálculo, um erro é indicado, e um ajuste dos parâmetros de tempo e corrente elétrica torna-se necessário, mudando a corrente elétrica e tempo de aquisição. Estes ajustes são realizados de modo a possibilitar um resultado de medição com erro mínimo. O software também mostra a variação do sinal de saída (proporcional à temperatura) em função do tempo. Além disso, a derivada desta função, em consequência, deve ser praticamente constante no período para que seja possível determinar o valor da condutividade térmica.

É importante observar que os parâmetros ideais para realização dos testes variam conforme a natureza do fluido e a temperatura de testes, por isso, um ajuste individual foi feito para cada amostra em cada temperatura antes do início dos testes. Neste trabalho foi determinada a condutividade térmica dos nanofluidos preparados em uma faixa de 25 até 55 °C, aproximadamente. Para todos os testes de propriedades dos nanofluidos, foram

realizadas 5 réplicas, e considerada a média das medições. O desvio padrão foi levado em consideração na análise de incerteza.

Measurement#: 9

Temperature: 34.99 °C

Temperature drift: -1.643 mK/s

Th. conductivity: 4.234e-001 W/m\*K

Th. diffusivity; 3.349e-001 mm^2/s

Err. conductivity: 2.33 %

Err. diffusivity: 13.54 %

Heat capacity: 1.197e+000 J/gK

Figura 3.8 - Interface do software Linseis THB-1 na medição de condutividade térmica

No caso de impossibilidade de cálculo, um erro é indicado, e um ajuste dos parâmetros de tempo e corrente elétrica torna-se necessário, mudando a corrente elétrica e o tempo de aquisição; estes ajustes são realizados de modo a possibilitar um resultado de medição com erro mínimo.

### 3.2.2. Viscosidade

Para a medição da viscosidade e densidade dos nanofluidos foi utilizado um viscosímetro rotacional da Anton Par (Modelo Stabinger™ SVM™ 3000 mostrado na Fig. 3.10) com cilindros concêntricos. O princípio de operação do equipamento é uma modificação do sistema Couette baseado na medição de torque e velocidade com alta resolução. A

pequena célula de medição da viscosidade dinâmica contém um tubo em rotação com velocidade constante. Este tubo é preenchido com a amostra. Um outro tubo possui um ímã integrado (rotor) que flutua na amostra e gira livremente sem atrito. Devido à baixa densidade do rotor, ele é mantido centrado pela força centrífuga como ilustra a Fig. 3.9. O pequeno volume de amostra (~2,5 ml) permite mudanças extremamente rápidas de temperatura (por efeito Peltier) e tempos de estabilização muito curtos. A viscosidade dinâmica é calculada a partir da velocidade do rotor.

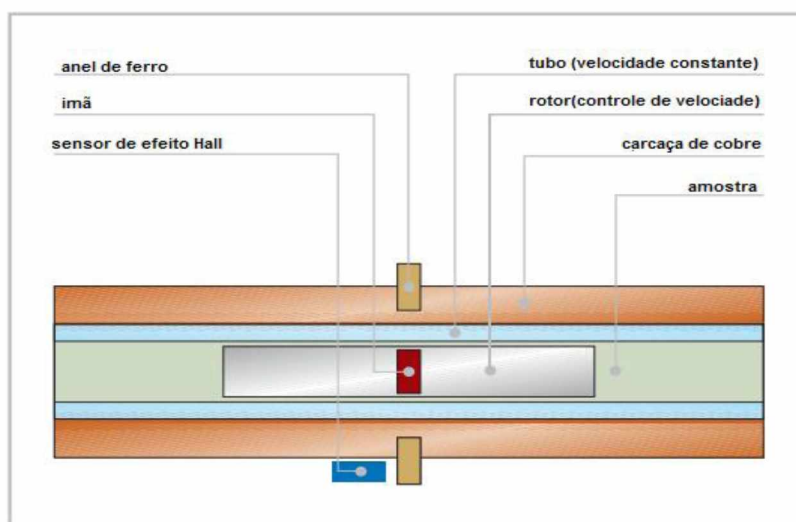


Figura 3.9 - Célula de medição da viscosidade.



Figura 3.10 - Equipamento experimental SVM 3000 utilizado para a medição de viscosidade

O equipamento também possui uma célula de medição da massa específica que opera de acordo com o princípio de oscilação do tubo em "U". Ambas as células (da viscosidade e da massa específica) são preenchidas em uma única operação. As medições são realizadas simultaneamente.

Neste trabalho, a viscosidade e a densidade do fluido base e dos nanofluidos foram medidas em diferentes temperaturas 25, 35, 45, 55, 65, 75 e 85°C com o intuito de avaliar as propriedades dos nanofluidos em função da temperatura contemplando toda a faixa de temperaturas nas quais foram realizados os testes experimentais de transferência de calor com nanofluidos.

### **3.3. Bancada experimental**

A bancada experimental utilizada para avaliar o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos em trocadores de calor automotivos se encontra localizada no laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e nanotecnologia da Universidade Federal de Uberlândia. Este aparato foi totalmente concebido no Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos (LESTnano-UFU), e permite simular condições de trabalho muito próximas ao sistema de arrefecimento automotivo real, com algumas modificações realizadas para o presente trabalho. O aparato possui dois circuitos térmicos principais, um para o lado do fluido de arrefecimento (quente) e outro para o lado do ar (frio).

O circuito de fluido quente representa o sistema de arrefecimento. Este possui um banho termostático, que aquece o fluido, simulando a carga térmica. Uma bomba de engrenagens circula o fluido entre o banho e o radiador. O circuito de ar é composto de um túnel de vento onde o ar atravessa o trocador de calor, em escoamento cruzado; para isto, é dotado de um ventilador. Medições de temperatura à montante e à jusante do trocador de calor, além de uma placa de bocais (por meio da qual é medida a vazão de ar) completam o circuito.

O equipamento permite o controle das temperaturas de entrada do líquido no radiador e de incidência do ar no radiador, assim como controle das vazões de ar e de fluido de arrefecimento. A Fig. 3.11 mostra um diagrama esquemático da bancada experimental.

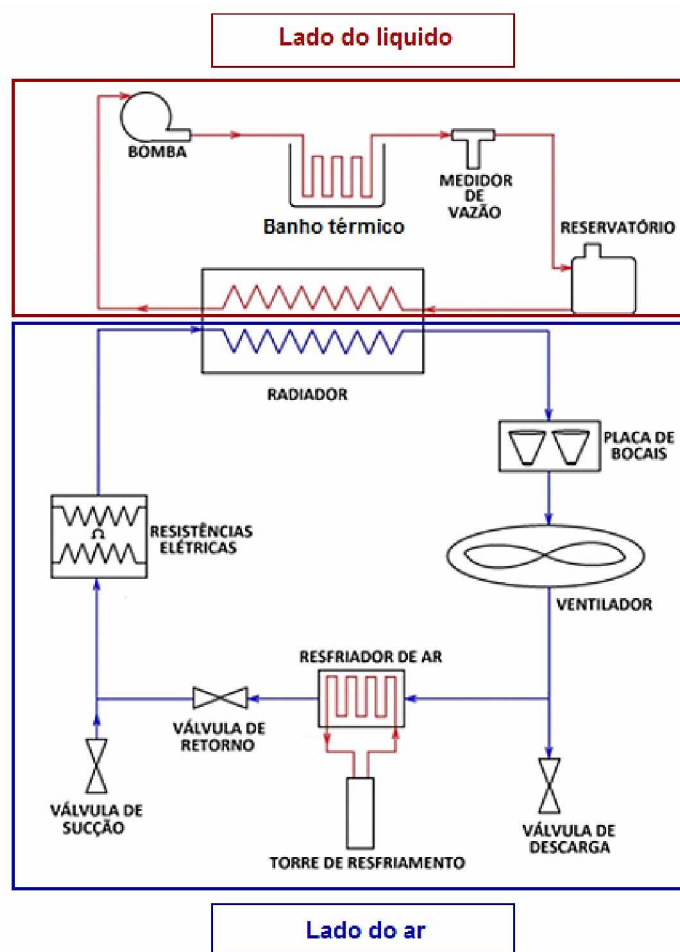


Figura 3.11 - Diagrama esquemático da bancada experimental para trocadores de calor em escoamento cruzado (radiador).

### 3.3.1. Circuito quente

O circuito quente ou de fluido de arrefecimento possui um banho termostático no qual o fluido passa através de uma serpentina, de modo a aquecer o fluido até a temperatura de entrada desejada no radiador. O fluido de arrefecimento utilizado no processo circula no interior da serpentina de cobre com diâmetro de 6,35 mm submersa no banho. A temperatura do banho termostático é controlada e mantida homogênea por meio de um termostato e uma bomba de recirculação de 0,75 kW. O termostato digital ligado com a resistência de 9 kW controla com um sistema liga/desliga, valores preestabelecidos para uma referência de temperatura, além do tempo de funcionamento da resistência que permite manter a temperatura do banho estável. Este efeito simula a carga térmica do motor sobre o fluido de arrefecimento; uma bomba de engrenagens foi utilizada para o bombeamento. A esta bomba foi ligado um inversor

de frequência com o objetivo de variar a vazão do fluido. Foram instalados sensores para o monitoramento de variáveis como temperatura, pressão e vazão mássica.

Foi utilizada uma microbomba da empresa MICROPUMP que tem uma capacidade de até 12 L/min e temperatura de trabalho que atinge os 100°C. Esta bomba tem um sistema de funcionamento de deslocamento positivo permite vazão mássica do fluido de arrefecimento constante em qualquer ponto do circuito, além de ter um melhor comportamento quando trabalhando com nanofluidos devido a que suas engrenagens de teflon têm menor desgaste ocasionado pelo contato metal-metal e não degrada as nanopartículas. Na Fig. 3.12 são ilustradas a microbomba e o banho termostático instalados no circuito quente.



(a)



(b)

Figura 3.12 - (a) microbomba e motor (b) banho termostático.

A temperatura do fluido de arrefecimento foi medida diretamente com sensores RTD (do inglês: *Resistance Temperature Detector*) tipo PT100 imersos na entrada e saída do radiador.

Para obter uma medição direta na potência de bombeamento foi instalado um transmissor de pressão do tipo diferencial modelo Deltabar PMD75 da empresa Endress Hauser com faixa de medição de 3-16 bar (300-1600 kPa). O equipamento é localizado em uma conexão em paralelo com a bomba e conta com um sensor interno piezo-resistivo em conjunto com uma membrana metálica permitindo a medição contínua em líquidos e gases.

A vazão mássica do fluido de arrefecimento foi medida através de um medidor tipo Coriolis (METROVAL RHM-6). O sensor possui uma faixa de medição vai de 0 a 0,160 kg/s possibilitando as medições em toda a faixa de vazões para os testes realizados. O circuito também conta com um reservatório que além de manter a bomba afogada e controlar a pressão do sistema, facilita a medição do volume do fluido de arrefecimento que é colocado na bancada.

Na seção de teste e como elemento principal do circuito quente encontra-se radiador, equipamento utilizado para avaliar o desempenho térmico de nanofluidos. Neste trabalho, usou-se um radiador que utilizam comumente os automóveis Fiat Palio e Uno. A Figura 3.13 mostra um desenho esquemático detalhado do circuito de fluido de arrefecimento acima descrito.

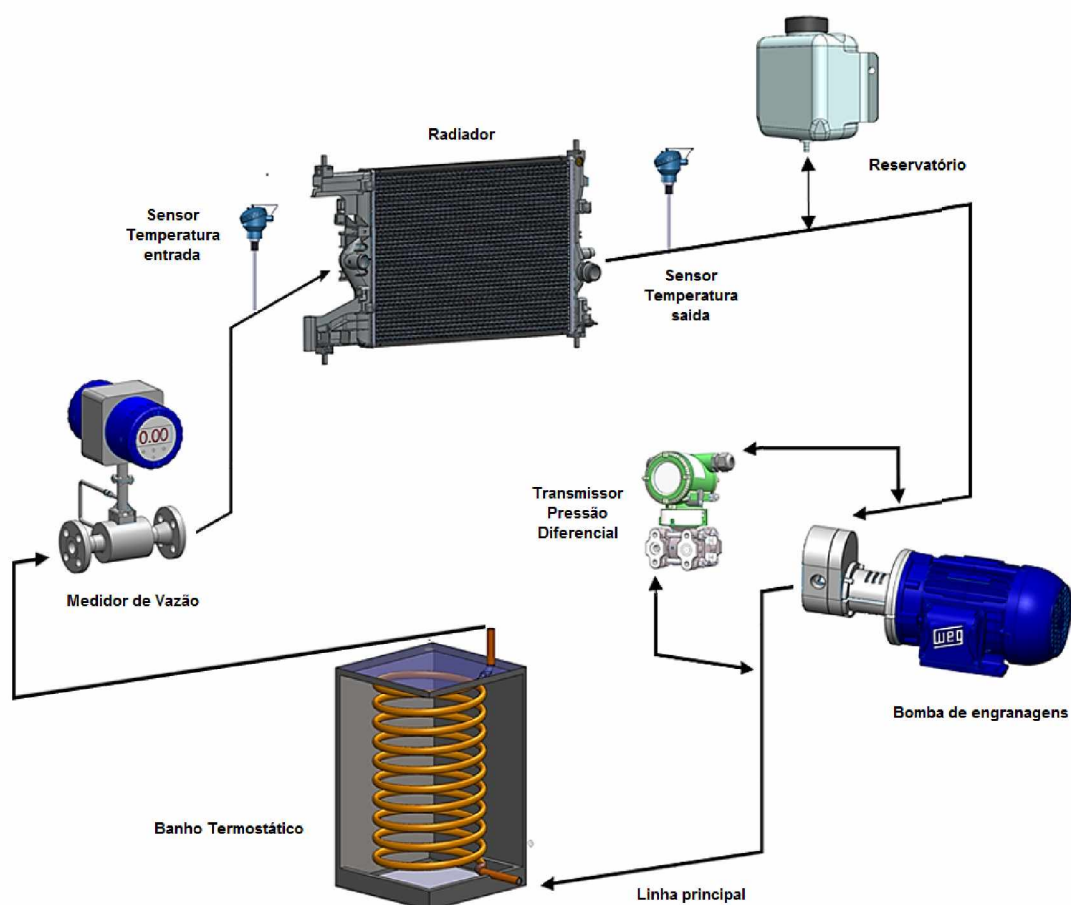


Figura 3.13 - Montagem do circuito para o fluido de arrefecimento.

### 3.3.2. Circuito frio

Para realizar os ensaios de avaliação de desempenho térmico em trocadores de calor de escoamento cruzado foi utilizado um túnel de vento onde o ar escoa através do radiador localizado na seção de testes. O túnel possui um ventilador centrífugo de sucção que tem a capacidade de fornecer uma vazão de 10000 m<sup>3</sup>/h, velocidade que pode ser controlada por um inversor de frequência que está ligado ao motor de 3 HP que aciona o ventilador. O modo de funcionamento do túnel pode ser fechado ou aberto controlando a posição das válvulas tipo “damper”. No duto principal de ar o túnel possui resistências elétricas, um retificador de escoamento e a seção de teste onde está localizado o radiador.

A temperatura de entrada do ar na seção de teste é controlada por meio de um banco de resistências elétricas, com potência total de 6 kW, fixadas à montante da seção de testes. Estas resistências são ligadas a um conversor de potência, que controla a potência dissipada pelas resistências entre o valor zero e potência nominal conforme um sinal de entrada de 4-20mA. O sinal recebido pelo conversor de potência é gerado por um sistema de aquisição de dados da National Instrument, o qual possui um módulo de saída analógica de corrente. O sistema é sintonizado com um controlador PID retroalimentado que modifica o sinal que recebe o conversor através da medida de temperatura com termopares localizados no montante da seção de testes. Para sintonização do controlador é utilizado o método de caixa preta o qual consiste em submeter o sistema a um distúrbio de entrada obtendo um sinal de resposta natural a fim de reproduzir o comportamento do sistema com uma função de transferência que o caracterize. A temperatura do ar, conforme mencionado anteriormente, foi medida através de duas grades de 12 termopares cada, a montante e a jusante do radiador. No total foram utilizados 24 termopares para a medição direta da temperatura obtendo assim uma distribuição média em cada seção. O posicionamento dos termopares como mostrado na Fig. 3.14 segue as recomendações da norma (ASHRAE STANDARD 33, 2000).

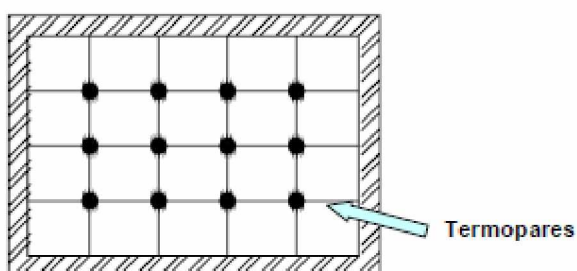


Figura 3.14 - Desenho esquemático do posicionamento dos termopares no túnel de vento.

A seção de testes possui dimensões de 0,40 m de altura por 0,75 m de largura. A parede do túnel de vento é composta por chapas em aço galvanizado. Na região entre as duas grades de termopares (região que compreende a seção de testes) aplicou-se uma camada externa de 32 mm de borracha elastomérica para minimizar a troca de calor com o ambiente externo. As juntas das portas, assim como os flanges dos módulos, foram vedados com borracha de silicone para evitar vazamento de ar.

A vazão de ar foi determinada de acordo com a norma (ASHRAE STANDARD 41.2, 1987) utilizando bocais convergentes. Neste método o escoamento sofre uma perda de carga ao passar pelo bocal, que é correlacionada com a vazão de ar em circulação. A vazão de ar foi controlada variando a rotação do ventilador através de um inversor de frequência. A Fig. 3.15 ilustra os bocais do túnel de vento.

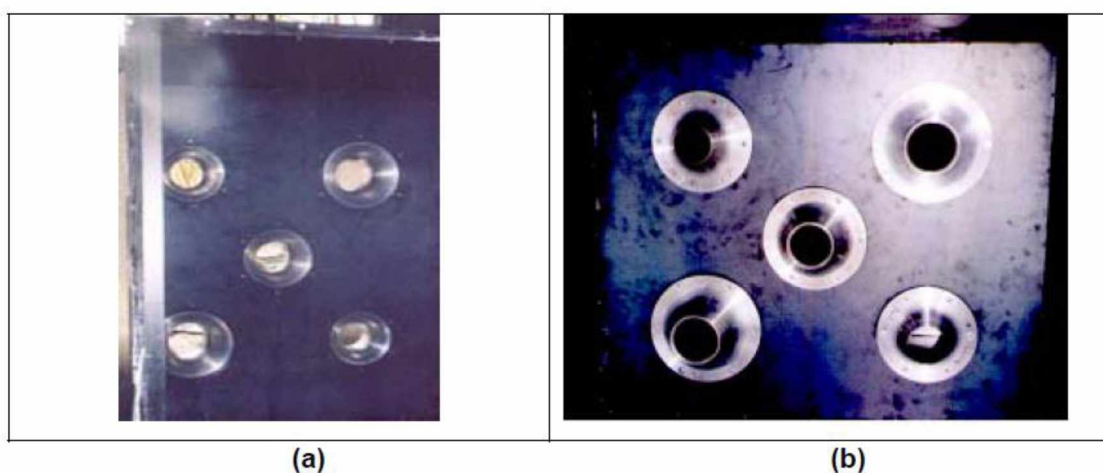


Figura 3.15 - Vistas da placa de bocais: (a) a montante, e, (b) a jusante.

O diferencial de pressão do ar ao atravessar a placa de bocais é medido por meio de dois sensores: o primeiro é um manômetro diferencial em U, instrumento analógico que através da altura da coluna de água permite medir de maneira indireta a queda de pressão dos bocais. O segundo sensor é um transmissor de pressão diferencial do tipo LD301 da empresa SMAR automação, instrumento digital que permite por meio de uma deformação de uma membrana em seu interior obter um sinal elétrico proporcional que logo é utilizado no sistema de aquisição de dados para o cálculo e comparação da vazão mássica de ar com o resultado do primeiro sensor.

Para determinação do coeficiente de descarga total dos bocais é necessário calcular o coeficiente separado de cada um dos bocais e depois se faz o somatório de todos os valores calculados. A vazão total é calculada pela Eq. (3.6),

$$\dot{m}_{ar} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i C d_i \quad (3.6)$$

onde a vazão teórica,  $\dot{m}_i$ , o coeficiente de descarga,  $C d_i$ , são obtidos a partir das Eq. (3.7) e Eq. (3.8)

$$\dot{m}_i = \frac{A_{descarga,i} \sqrt{2 \rho_{ar} \Delta P_{ar}}}{1 - \left( \frac{A_{descarga,i}}{A_{placa}} \right)^2} \quad (3.7)$$

$$C d_i = 0,9975 - 0,00653 \left( \frac{10^6}{Re_{d,i}} \right)^a \quad (3.8)$$

onde  $d_i$  representa o diâmetro de descarga de cada bocal,  $Re_{d,i}$  é o número de Reynolds na descarga do bocal e pode ser calculado através da Eq. (3.9),

$$Re_{d,i} = \frac{4 \dot{m}_i}{\pi d_i \mu_{ar}} \quad (3.9)$$

$\mu_{ar}$  representa a viscosidade dinâmica do ar, Assim os valores de (a) na Eq. (3.8) são os seguintes:

$$a=0,5 \text{ se } Re_{d,i} < 10^6$$

$$a=0,2 \text{ se } Re_{d,i} > 10^6$$

A temperatura de bulbo úmido na seção de admissão do túnel também foi medida assim como na entrada da seção de testes, com o objetivo de comparar alguma mudança nas propriedades físicas do ar ocasionada pelo aquecimento através das resistências. O sensor localizado na entrada do túnel de vento é um termohigrômetro OMEGA RHXL3SD capaz de

fornecer também a medição a umidade relativa, ponto de orvalho e temperatura de bulbo seco. Um segundo sensor localizado na entrada da seção de testes foi construído com um termopar tipo T e envolto por um pavio, conta com um sistema de goteio fazendo que o pavio fique constantemente molhado. A temperatura de bulbo úmido cai, devido ao calor retirado para evaporar a água. O seu resfriamento é diretamente proporcional à quantidade de ar seco. Um diagrama geral do circuito frio é apresentado na Fig. 3.16.

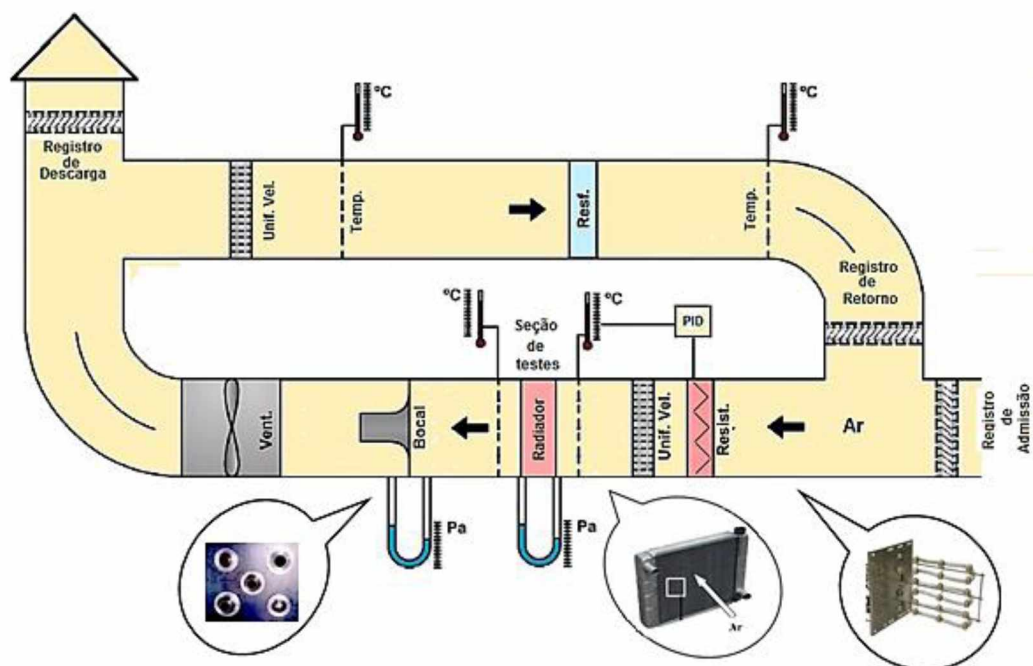


Figura 3.16 - Esquema do túnel de vento utilizado nos ensaios.

### 3.3.3. Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é controlado por uma interface que permite a comunicação entre os equipamentos e o operador que está monitorando o processo gerando e captando sinais, a maioria com protocolo de trabalho de 4-20mA e 0-10V. O módulo principal é um chassi NI Compact cDAQ-9178XT da marca NATIONAL INSTRUMENTS. O chassi conta com 8 módulos de expansão instalados, encarregados de coletar os sinais necessários para monitorar, supervisionar e controlar todas as variáveis ou grandezas físicas que interferem no processo.

Para processamento de sinais o painel de controle foi desenvolvido em LabVIEW®, software que permite criar um entorno gráfico do processo, além de armazenamento de dados permitindo uma análise posterior, deste modo, o operador pode ajustar parâmetros para atender as exigências dos testes ou solucionar anomalias que podem ocorrer durante o

processo. A Fig. 3.17 ilustra o sistema de aquisição de dados utilizado no presente trabalho para integrar instrumentação com o software de processamento.

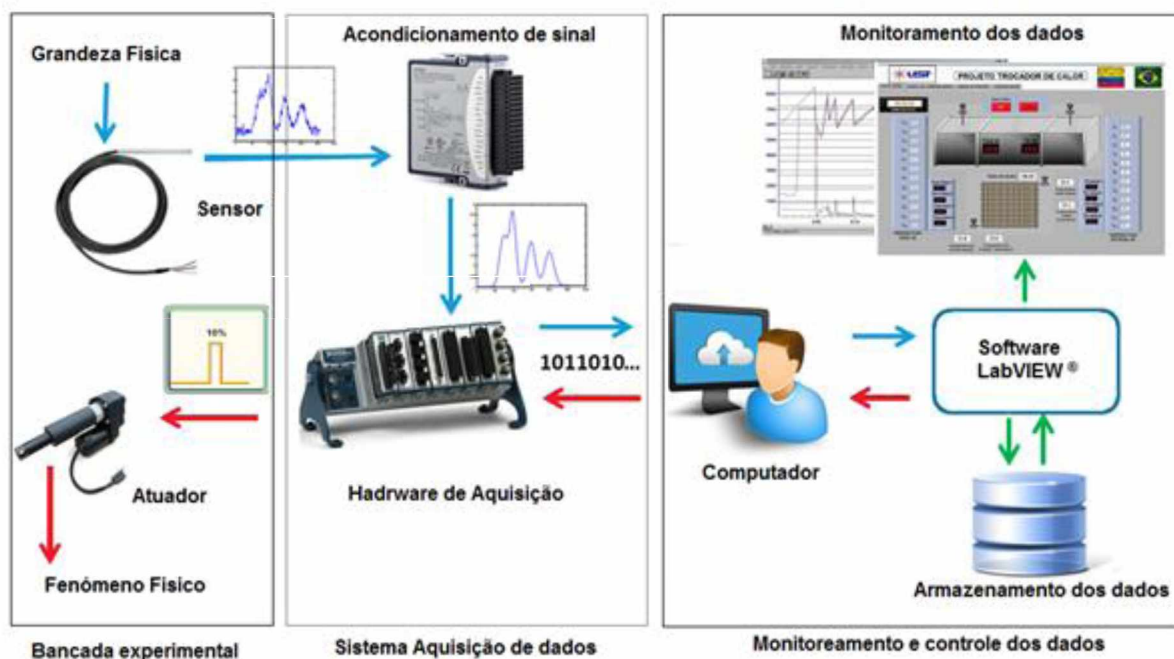


Figura 3.17 - Interface homem-máquina para monitoramento e controle dos testes experimentais.

Trinta e duas variáveis foram registradas durante os experimentos. A Tabela 3.3 mostra de forma detalhada a grandeza medida e a localização de cada um dos sensores utilizados.

Tabela 3.3 - Variáveis lidas pelo sistema de aquisição de dados

Variável	Circuito	Localização	Número de sensores
Temperatura	quente	entrada radiador	1
Temperatura	quente	saída radiador	1
Pressão diferencial	quente	entrada e saída da bomba	1
Medidor de Vazão	quente	após bomba	1
Temperatura	frio	entrada radiador	12

Temperatura	frio	saída radiador	12
Umidade relativa	frio	entrada radiador	2
Pressão diferencial	frio	entrada e saída bocais	2

Finalmente é apresentada uma vista geral da bancada experimental na Fig. 3.18 onde pode se identificar todos os elementos descritos anteriormente.



Figura 3.18 - Montagem completa bancada experimental

### 3.4. Metodologia e análise dos ensaios

Com o objetivo de avaliar o desempenho térmico e a potência de bombeamento de um sistema de arrefecimento automotivo para nanofluidos de grafeno, a bancada experimental foi inicialmente validada utilizando água destilada adotando os procedimentos experimentais similares aos observados na literatura, sugerido pelas normas (ASHRAE STANDARD 41.2, 1987)(ASHRAE STANDARD 33, 2000).

Os testes foram conduzidos em regime permanente e as condições de testes são apresentadas a seguir:

-Vazão mássica do ar: ela foi variada de acordo com a mudança de frequência de trabalho do ventilador e permite validar o comportamento do radiador em diferentes velocidades do carro.

-Para 30Hz: 0,730 kg/s

-Para 35Hz: 0,860 kg/s

-Para 40 Hz: 0,995 kg/s

-Temperatura de entrada do ar: foi mantida constante a 25 °C.

-Vazão mássica do fluido de arrefecimento: Foi variada para avaliar o desempenho térmico do radiador além da potência de bombeamento necessária. As vazões testadas foram 0,70; 0,80; 0,90; 0,10; 0,11 kg/s.

-Temperatura de entrada do fluido de arrefecimento: Variada com a finalidade de avaliar desempenho térmico. As temperaturas testadas foram 55, 65, 75 e 85°C

Na Tabela. 3.4 mostra-se de forma resumida as condições em que a bancada foi operada durante a realização de todos os ensaios.

Tabela 3.4 - Condições de ensaio no presente trabalho

<b>Condições de ensaios</b>	
<b>Fluido base</b>	H <sub>2</sub> O/EG 50%
<b>Nanofluido</b>	grafeno
<b>Concentração de nanopartículas (% vol.)</b>	0,011 ;0,075;0,150
<b>Vazão de liquido (kg/s)</b>	0,07; 0,08; 0,09; 0,1; 0,11
<b>Temperatura entrada liquido (°C)</b>	55; 65; 75; 85
<b>Vazão de ar (kg/s)</b>	0,730; 0,860; 0,995
<b>Temperatura incidência ar (°C)</b>	25

### 3.4.1. Operação

O equipamento experimental, foi ligado e posto em operação mediante a seguinte sequência de ações:

(1) Inicialmente, ativa-se o sistemas de aquisição de dados para verificação e monitoramento de todas as variáveis medidas.

(2) É ligada a resistência do banho térmico para o ajuste da temperatura de trabalho do fluido de arrefecimento, um sistema de controle liga-desliga é ativado juntamente com a resistência. Aciona-se a bomba utilizada para recirculação da água do banho térmico permitindo uma distribuição uniforme de temperatura.

(3) Acionou-se e ajustou-se as máquinas de fluxo (bomba, ventilador) tanto para o vazão mássica do fluido de arrefecimento como para o ar.

(4) Ativou-se a resistência elétrica para o controle da temperatura do ar que incide na entrada do radiador responsável pela introdução da carga térmica do lado do ar.

(5) Ligou-se o controle PID desenhado que tem a função de manter a temperatura de entrada do ar para as condições de trabalho estabelecidas.

(6) O sistema deve funcionar livremente até atingir as condições preestabelecidas pelo operador, situação na qual admite-se que o sistema está em regime permanente.

### 3.4.2. Critério de estabilização

Quando se fala de um critério de estabilização é importante seguir, para qualquer tipo de testes que seja feito no equipamento experimental, um procedimento padronizado para garantir segurança da bancada, repetitividade dos dados nas mesmas condições de trabalho e assim a confiabilidade dos resultados é significativamente alta.

Um dos principais problemas para atingir o regime permanente é a dependência entre si dos parâmetros como vazão mássica e temperatura, devido ao fato que uma alteração significativa da temperatura pode influenciar nas propriedades físicas do fluido de arrefecimento e ocorre uma variação da vazão mássica no circuito. A pressão do circuito também deve apresentar variações mínimas com respeito ao valor nominal. Efeitos como variação da temperatura externa do ar, bolhas presentes no fluido de arrefecimento e possíveis ruídos induzidos no sistema de aquisição de dados, também fazem que o sistema demore em média de 45 minutos para entrar em regime permanente.

Nos ensaios realizados, a bancada trabalha em circuito de ar aberto, que leva a um menor tempo necessário para atingir o regime permanente. Os dados são coletados na condição em que o sistema encontra-se em operação estável, sem apresentar variações temporais de propriedades. Essa condição é 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.

### 3.5. Modelagem matemática

Para o modelamento matemático é necessário uma análise do modelo físico do sistema baseado em previsões, parâmetros e fórmulas matemáticas. No presente trabalho o eixo central na análise de transferência de calor é o radiador. Nele acontece todo o processo de troca de calor confirmando que o balanço energético baseia-se na relação entre o quanto de calor é perdido pelo fluido de arrefecimento e o calor ganho pelo ar.

Partindo do princípio de conservação de energia a Fig. 3.19 mostra-se o volume de controle para a análise de um radiador de automóvel:

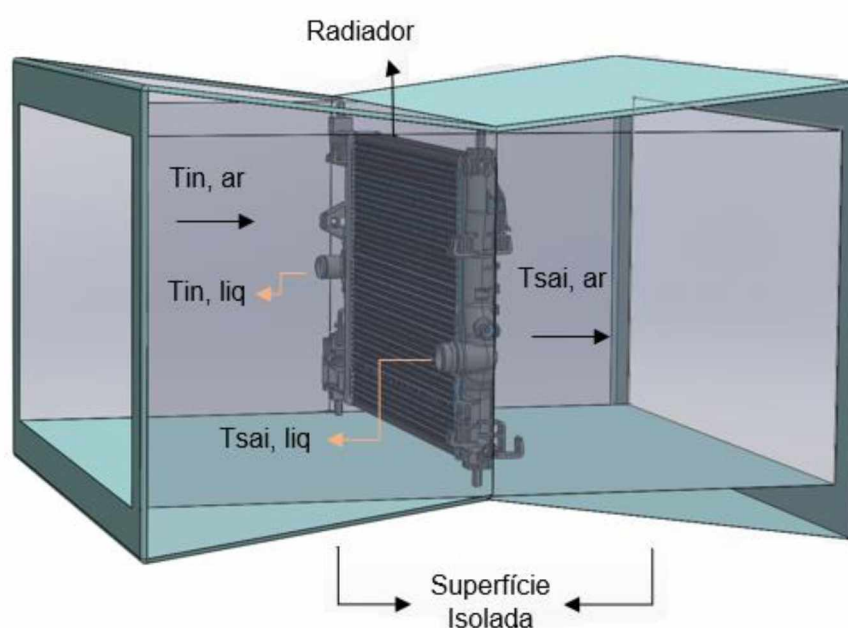


Figura 3.19 - Volume de controle para balanço de energia no radiador.

O modelo físico atual pode ser simplificado para uma melhor interpretação e considerando que o sistema trabalha no regime permanente são levadas em conta as seguintes hipóteses:

- Sistema adiabático, as perdas de calor com o ambiente são desprezíveis.
- Temperatura do fluido de arrefecimento e do ar constante na entrada e saída do radiador.
- Vazão mássica de líquido e ar são mantidas constantes.
- Não há reação química no sistema.
- Mudanças das energias cinéticas e potencial são desprezíveis.
- Resistência térmica da parede é distribuída uniformemente em todo radiador.
- Não há mudança de fase nas correntes de fluido que escoam através do radiador.
- O coeficiente de transferência de calor individual e 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 velocidade e temperatura de entrada em cada lado do fluido são uniformes ao longo da seção transversal do escoamento.

### 3.5.1. Coeficiente de transferência de calor

Desde o ponto de vista termodinâmico para uma análise de transferência de calor em um trocador de calor entre dois fluidos que estão a diferentes temperaturas e se encontram separados por uma parede sólida é necessário relacionar a taxa de transferência de calor ( $\dot{Q}$ ), a área superficial ( $A$ ), a taxa de capacidade de calor ( $C$ ), coeficiente de global de transferência de calor ( $U$ ) e as temperaturas iniciais e finais ( $T_i$ ,  $T_o$ ). As equações que descrevem os fenômenos seguem estas relações básicas e seu balanço energético pode ser obtido a partir da primeira lei da termodinâmica Eq. (3.10).

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (3.10)$$

Como o sistema é considerado adiabático, e os fluidos não apresentar mudança de fase a Eq. 3.10 pode ser reescrita como:

$$\dot{Q}_q = \dot{Q}_f \quad (3.11)$$

$$(\dot{m} C_p \Delta T)_q = (\dot{m} C_p \Delta T)_f \quad (3.12)$$

onde os subscritos (q) e (f) representam o lado quente e frio do trocador. A Eq. (3.12) representa a taxa de transferência de calor em um trocador de calor com dois fluidos.

Para uma análise de transferência de calor proporcional a área de troca em aplicações de escoamento cruzado como nesse caso, onde são conhecidas as temperaturas de entrada e saída dos fluidos método mais utilizado para cálculo do coeficiente global de transferência de calor (U) e através da média logarítmica das diferenças de temperatura ( $\Delta T_{lm}$ ) de acordo com Eq. (3.13).

$$\dot{Q} = F U A \Delta T_{lm} \quad (3.13)$$

onde o (F) é o fator de correção para o cálculo de (U), porém para aplicações de trocadores de escoamento cruzado este valor é próximo de 1. Consequente podemos reescrever a Eq. (3.13) como se mostra na Eq. (3.14)

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (3.14)$$

Os gradientes de temperatura  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  são definidos pelas Eqs. (3.15) e (3.16)

$$\Delta T_1 = T_{in,liq} - T_{sai,ar} \quad (3.15)$$

$$\Delta T_2 = T_{sai,liq} - T_{in,ar} \quad (3.16)$$

O número de Reynolds relativo ao diâmetro interno do tubo é dado pela Eq. (3.17)

$$Re_{liq} = \frac{4 \dot{m}_{liq}}{n \pi d_h \mu_{liq}} \quad (3.17)$$

onde  $n$  é o número de tubos do trocador,  $d_h$  representa o diâmetro hidráulico de cada tubo,  $\mu_{liq}$  é a viscosidade considerada para uma temperatura média entre o valor da entrada e saída do trocador como observado na Eq. (3.18)

$$T_m = 0,5 (T_{in,liq} + T_{sai,liq}) \quad (3.18)$$

Como o escoamento no interior dos tubos é laminar, para aplicações em trocadores de calor de escoamento cruzado pode-se aproximar o escoamento para a condição de temperatura de parede constante, para o qual o número de Nusselt tem o valor constante. O número adimensional de Nusselt é dado pela Eq. (3.19)

$$Nu = \frac{h_{med} d_h}{k} \quad (3.19)$$

sendo  $k$  a condutividade térmica do fluido,  $h_{med}$  o coeficiente de transferência de calor médio teórico avaliada na temperatura  $T_m$  para cada ensaio. Neste trabalho o coeficiente médio de transferência foi calculado experimentalmente utilizando a diferença media logarítmica de temperatura citada anteriormente. No caso foi feito um rearranjo para ser expressa em função do coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) como mostra a Eq. (3.20)

$$h_{med,exp} = \frac{\dot{Q}}{A_{int} \Delta T_{lm}} \quad (3.20)$$

onde  $h_{med,exp}$  representa o coeficiente de transferência de calor medido experimentalmente e  $A_{int}$  representa área lateral interna dos tubos.

Deve ser ressaltado que para um caso ideal, o calor liberado pelo fluido de arrefecimento deve ser igual ao calor absorvido pelo ar. Desta forma, foi definido um critério para garantir a validade dos testes experimentais calculando o calor pelo lado do ar e pelo lado do fluido. A Eq. 3.21 representa o critério para validade dos testes seguindo as recomendações das normas (ASHRAE STANDARD 33, 2000) e (ASME PTC.30, 1991).

$$\left| \frac{\dot{Q}_{liq} - \dot{Q}_{ar}}{\dot{Q}_m} \right| \leq 10\% \quad (3.21)$$

onde,

$$\dot{Q}_m = 0,5 (\dot{Q}_{liq} + \dot{Q}_{ar}) \quad (3.22)$$

### 3.5.2. Potência de bombeamento

A principal vantagem da utilização de nanofluidos para sistemas de arrefecimento de automóveis é a condutividade térmica elevada de nanopartículas sólidas, que pode ser centenas ou milhares de vezes maior do que os fluidos de transferência de calor convencionais. No entanto, o aumento da condutividade térmica de nanofluidos é muitas vezes acompanhado pelo aumento da viscosidade e isto influencia fortemente na transmissão térmica e inércia do nanofluido, bem como a potência de bombeamento necessária. Com a finalidade de avaliar vários aspectos de eficiência do sistema de arrefecimento automotivo foi também medida experimentalmente a queda de pressão na bomba do fluido de arrefecimento. O sensor modelo Deltabar S PMD75 (fornecidos por Endress+Hauser), foi localizado em paralelo com a bomba de engrenagens permitindo obter o diferencial de pressão entre a entrada e saída. De acordo com a Eq. (3.23) e conhecendo as propriedades físicas dos fluidos de trabalho foi calculado de maneira indireta a potência de bombeamento no sistema.

$$\dot{W}_B = \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \quad (3.23)$$

onde  $\Delta P$  é o diferencial de pressão na bomba,  $\rho$  é a massa específica do fluido e  $\dot{m}$  a vazão mássica.

### 3.6. Incerteza de medição

As grandezas aqui trabalhadas podem ser divididas em dois tipos: medidas e calculadas. Existem parâmetros que podem ser medidos diretamente através de um instrumento de medição adequado e previamente calibrado, neste caso os valores de temperatura, pressão e vazão mássica. O cálculo indireto de parâmetros como taxa de transferência de calor, coeficiente de transferência de calor, número de Reynolds, potência de bombeamento está correlacionado com os valores medidos através de um equacionamento matemático e sua incerteza calculada depende da incerteza associada aos valores medidos.

Deste modo, foi realizada a determinação da incerteza dos parâmetros calculados utilizando o método de propagação de incerteza no software EES. O software EES utiliza o método descrito em uma norma técnica do NIST (National Institute of Standards and Technology), (TAYLOR; KUYATT, 1994). Segundo a norma, assumindo que as medidas individuais são independentes e aleatórias, a propagação de incerteza para uma variável calculada Y pode ser determinada por meio da Eq. (3.24):

$$u_c = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (3.24)$$

onde  $u_c$  representa a incerteza da variável calculada,  $u(x_i)$  representa a incerteza da variável medida.

Desta maneira, são apresentados na Tab. 3.5 a incerteza associada aos equipamentos utilizados na realização dos ensaios.

Tabela 3.5 - Incerteza dos parâmetros medidos

Parâmetros medidos			
Instrumento	Parâmetro	Faixa de medição	Incerteza
Termopar tipo T	$(T_{in}, T_{out})_{ar}$	-270 à 400 °C	$\pm 0,2$ °C
RTD tipo PT 100	$(T_{in}, T_{out})_{liq}$	-200 à 500 °C	$\pm 0,1$ °C
Transmissor de pressão diferencial na bomba	$(\Delta P)_{liq}$	0 à 1600 kPa	$\pm 0,25$ %
Transmissor de pressão diferencial nos bocais	$(\Delta P)_{ar}$	0,125 à 5 kPa	$\pm 0,075$ %
Medidor de Vazão tipo Coriolis	$\dot{m}_{liq}$	0,0098 à 0,1686 kg/s	$\pm 0,15$ %
Temperatura de bulbo úmido	$(T_{bu})$	-21,6 à 50 °C	$\pm 0,8$ °C

Viscosímetro (massa específica)	$\rho$	0,65 à 3 g/cm <sup>3</sup>	$\pm 0,0005$ g/cm <sup>3</sup>
Viscosímetro (viscosidade dinâmica)	$\mu$	0,2 à 20000 mPa.s	$\pm 0,35\%$
Condutímetro	$k$	0,01 à 1 W/mK	$\pm 3\%$
Balança analítica (BK-500)	$m$	0,01 à 510 g	$\pm 0,0001$ g

Na Tabela. 3.6, são apresentadas as faixas de valores das incertezas associadas aos parâmetros calculados. As incertezas associadas foram obtidas através do método da soma quadrática dos efeitos das variáveis.

Tabela 3.6 - Incerteza parâmetros calculados

Parâmetros calculados		
Instrumento	Parâmetro	Incerteza
Vazão do ar	$\dot{m}_{ar}$	$\pm 0,012\%$
Taxa transferência de calor	$\dot{Q}$	$\pm 3\%$
Coefficiente de transferência de calor médio	$h$	$\pm 6,01\%$
Condutância Térmica global	$UA$	$\pm 6,01\%$
Temperatura média logarítmica	$T_{lm}$	$\pm 0,30$ °C
Potência de bombeamento	$\dot{W}_{bom}$	$\pm 0,29$ %
Número de Reynolds	$Re$	$\pm 0,25$ %

## CAPITULO IV

### RESULTADOS

Os resultados obtidos do presente trabalho estão organizados da seguinte forma: resultados experimentais obtidos na medição das propriedades térmicas, especificamente condutividade térmica, viscosidade e densidade do fluido base e nanofluidos preparados, incluindo uma validação dos dados visando uma comparação entre os resultados experimentais e teóricos presentes em tabelas ou correlações da literatura; e avaliação do desempenho termo-hidráulico de um trocador de calor automotivo (radiador) localizado na bancada experimental construída e modificada no laboratório (LESTnano) para reproduzir o comportamento de um sistema de arrefecimento real.

É importante ressaltar que para observar qualquer tipo de comparação entre os resultados teóricos com os medidos experimentalmente e contrastar o efeito do fluido base quando agregando as nanopartículas é utilizada a Eq. (4.1),

$$x_c(\%) = 100\left(\frac{|y_c - y_f|}{y_f}\right) \quad (4.1)$$

onde, a variável  $x_c$  é o resultado porcentual da comparação,  $y_c$  é a variável a ser comparado e  $y_f$  é o parâmetro de comparação.

#### 4.1. Propriedades termofísicas

Nesta seção são apresentados os resultados das medições da densidade, viscosidade e condutividade térmica dos nanofluidos e fluido base. O calor específico foi obtido teoricamente.

Foram preparados nanofluidos de grafeno utilizando como fluido base uma mistura de H<sub>2</sub>O/EG (50% vol.) em três diferentes concentrações (0,01; 0,05 e 0,1% vol.). Assim, os valores das propriedades termofísicas do fluido base foram obtidas da base de dados do software EES (*Engineering Equation Solver*). A informação já tabelada deste software é regulada pela IIR (*International Institute of Refrigeration*) e é baseada na norma (ASHRAE, 2001). As propriedades termofísicas das nanopartículas foram consideradas como sendo as mesmas do material particulado disponibilizadas pelo fabricante na Tab. 3.1.

#### 4.1.1. Densidade

Para validar os ensaios experimentais na medição da densidade foram comparados os resultados obtidos para o fluido base que neste caso se torna o fluido de referência (H<sub>2</sub>O:EG 50% vol.) com propriedades termofísicas conhecidas das tabelas termodinâmicas e mostrados na Fig. 4.1.

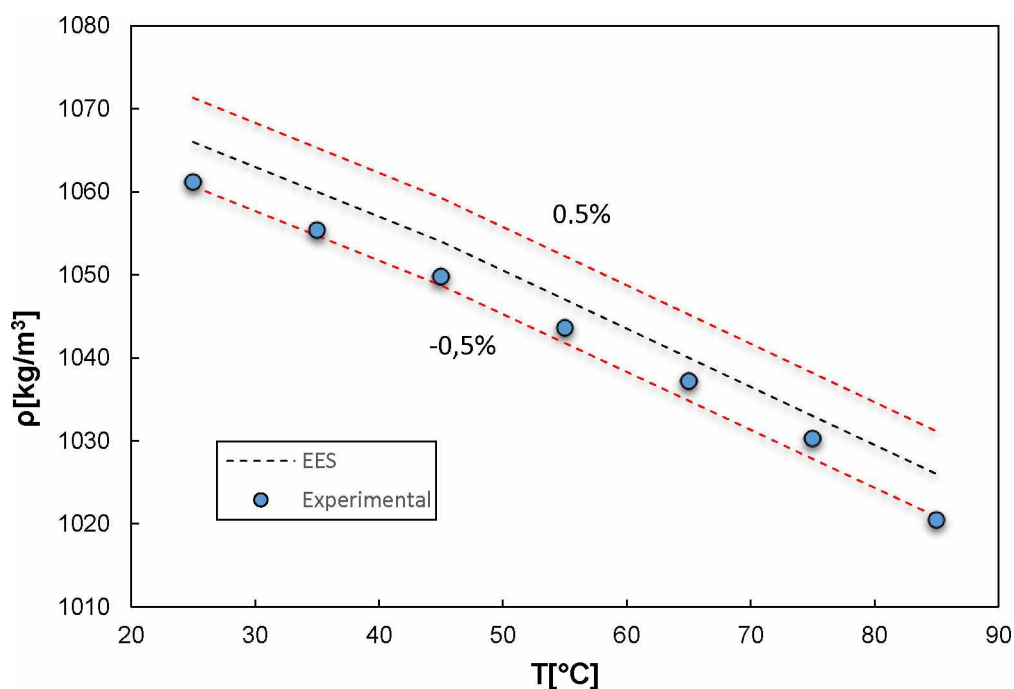


Figura 4.1– Comparação e validação dos valores experimentais da densidade obtidos para o fluido base (H<sub>2</sub>O:EG 50% vol.).

Verificou-se que os resultados obtidos experimentalmente têm boa concordância com as tabelas termodinâmicas com um desvio máximo de  $\pm 0,5\%$  indicando que o equipamento experimental pode ser utilizado para a medição da densidade dos nanofluidos nesta faixa de valores.

Para observar o comportamento da densidade dos nanofluidos para as amostras utilizadas neste estudo foram realizadas medições para uma faixa de 25°C até 85°C com incrementos de 10°C. A Fig. 4.2 ilustra o comportamento da densidade dos nanofluidos produzidos em função da temperatura.

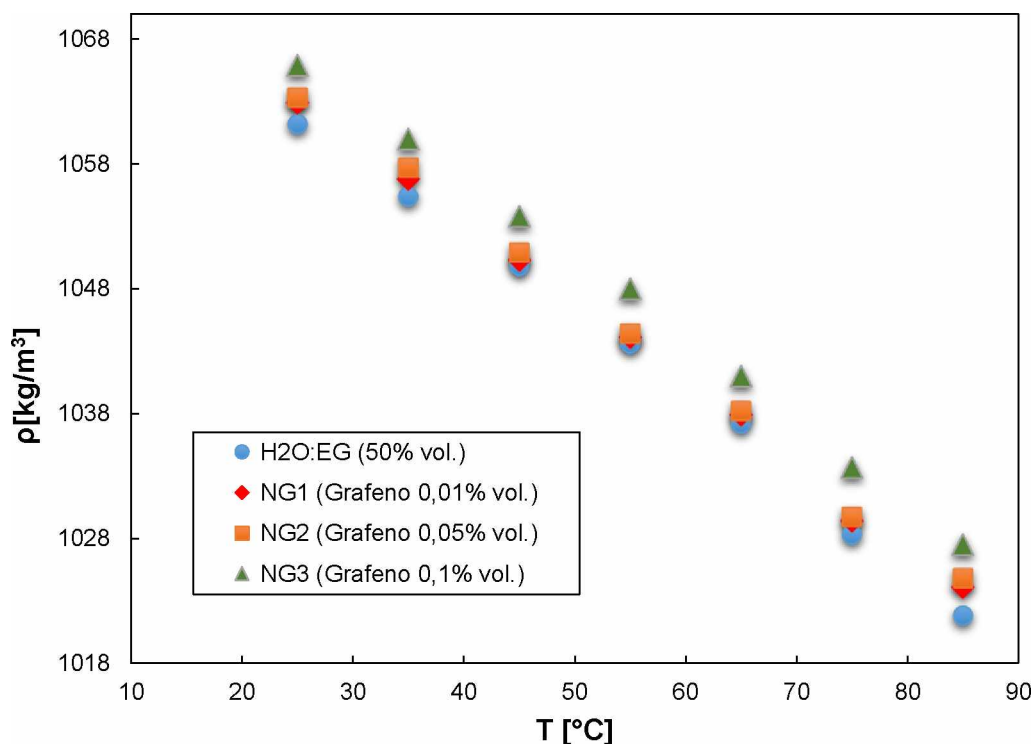


Figura 4.2 – Comportamento experimental da densidade de nanofluidos de grafeno/(H<sub>2</sub>O:EG 50%) com a temperatura.

Os resultados experimentais para densidade dos nanofluidos são semelhantes a alguns resultados da literatura, por exemplo (ELIAS et al., 2014), (LI; ZOU, 2016). Estes valores de densidade obtidos tanto para o fluido base como para os nanofluidos testados foram linearmente decrescentes na medida que a temperatura aumenta. O máximo incremento apresentado na densidade foi de apenas 0,5%, que corresponde à amostra NG3. Portanto pode ser afirmado, que para nanofluidos de grafeno/H<sub>2</sub>O:EG, com concentração em volume de nanopartícula de até 0,1% a densidade dos nanofluidos dentro da faixa de temperatura avaliada não apresentaram incrementos significativos.

Uma comparação com correlação da literatura também foi efetuada, utilizando o modelo proposto por (PAK; CHO, 1998) para determinar a densidade de nanofluidos conforme mostrado na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 - Comparação entre a densidade experimental e teórica dos nanofluidos.

Concentração (%vol.)	0,01	0,05	0,1	0,01	0,05	0,1
Temperatura [°C]	55	55	55	75	75	75
Experimental [kg/m <sup>3</sup> ]	1044,1	1044,4	1048,0	1029,4	1029,7	1033,7
(PAK; CHO, 1998)	1047,1	1047,5	1048,0	1033,1	1033,5	1034,7
Desvio máximo [%]	0,3	0,3	0	0,3	0,3	0,02

Outro efeito importante a ser analisado é o da concentração de nanopartículas, como ilustrado na Fig. 4.3. Ao aumentar a concentração de nanopartículas nos nanofluidos também houve uma tendência de aumento para o conjunto de dados apresentado. Isto deve-se ao fato de que as nanopartículas sólidas são menos sensíveis à temperatura em comparação com as moléculas do fluido base.

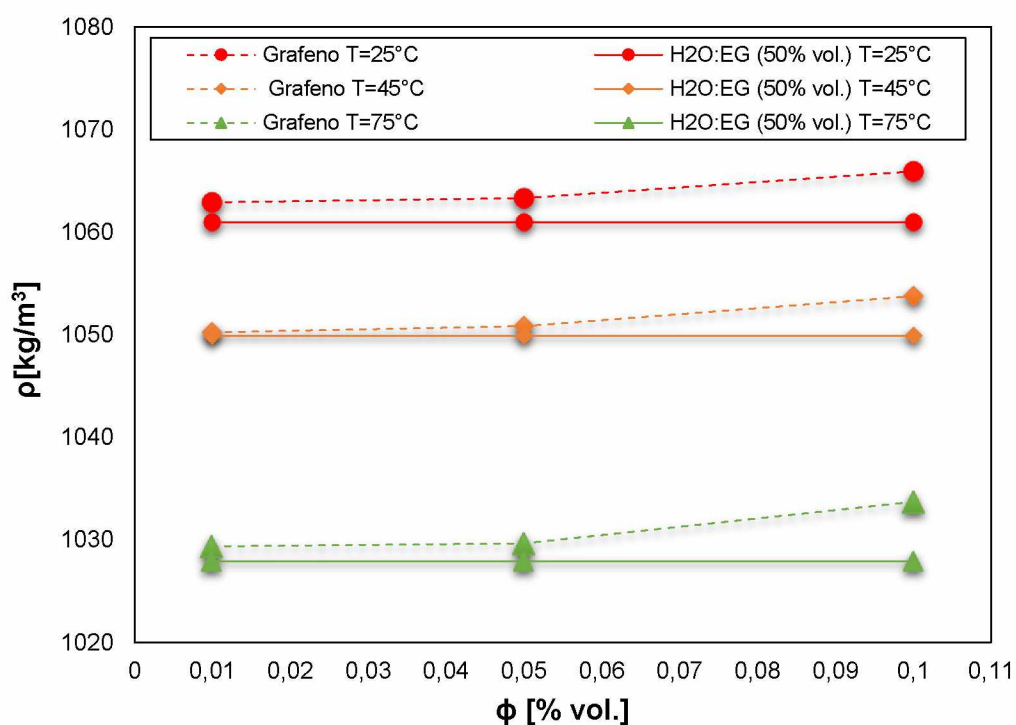


Figura 4.3 - Incremento da densidade de nanofluido em função da concentração volumétrica de nanopartículas.

#### 4.1.2. Calor específico

O calor específico do nanofluido foi determinado assumindo o equilíbrio térmico entre as nanopartículas e o fluido base, e utilizando equações encontradas na literatura. A Eq. (4.2) baseada na correlação proposta por (XUAN; ROETZEL, 2000) tem sido a mais utilizada na literatura para calcular o calor específico de nanofluido ( $C_{p_{nf}}$ ) para diversos tipos de nanopartícula,

$$C_{p_{nf}} = \frac{(1 - \phi)\rho_{bf}C_{p_{bf}} + \phi \rho_{np}C_{p_{np}}}{(1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np}} \quad (4.2)$$

onde  $\rho_{np}$  é a densidade da nanopartícula,  $\rho_{bf}$  é a densidade do fluido base,  $C_{p_{bf}}$  e  $C_{p_{np}}$  o calor específico do fluido base e da nanopartícula respectivamente.

A Figura 4.4 ilustra o comportamento do calor específico com a temperatura. Observa-se que o calor específico dos nanofluidos testados comparados com o fluido base foram ligeiramente menores, para todas as concentrações analisadas.

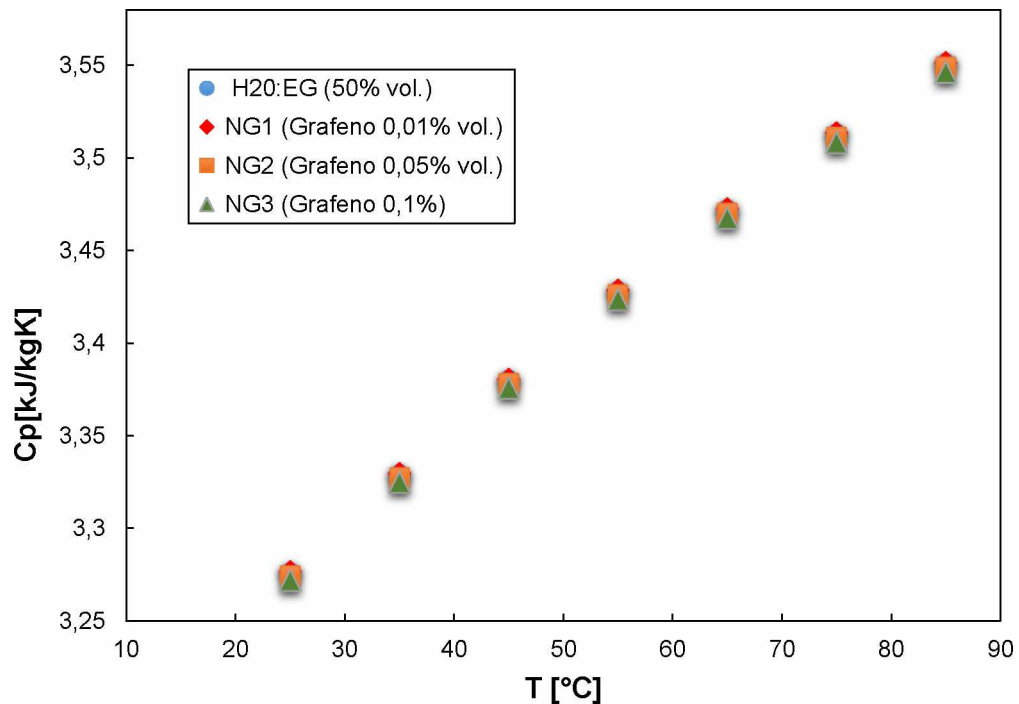


Figura 4.4 - Variação do calor específico de nanofluidos de grafeno/(H<sub>2</sub>O:EG 50%) com a temperatura.

Este efeito deve-se ao fato de que o calor específico das nanopartículas é menor que o do fluido base. No caso, o efeito da temperatura provocou um aumento em torno de 6 % para todas as concentrações quando a temperatura de teste foi aumentada de 25 para 85°C. São poucos os estudos que tem sido realizados para avaliação do calor específico de nanofluidos, em comparação com outras propriedades termofísicas como condutividade térmica, viscosidade e massa específica. No entanto, esta grandeza possui um papel importante no desempenho térmico dos nanofluidos em aplicações de arrefecimento, principalmente devido ao baixo calor específico das nanopartículas, sendo necessário aplicar menos calor para aumentar a temperatura dos nanofluidos a concentrações de volume de nanopartículas mais elevadas.

#### 4.1.3. Viscosidade dinâmica

A viscosidade dinâmica de todas as amostras foi medida utilizando um viscosímetro Stabinger SVM 3000 da Anton Paar. Para garantir que os resultados experimentais obtidos para a viscosidade estejam em um nível aceitável de confiabilidade foi necessário repetir o processo de comparação entre os valores experimentais e teóricos para o fluido base como ilustrado na Fig. 4.5.

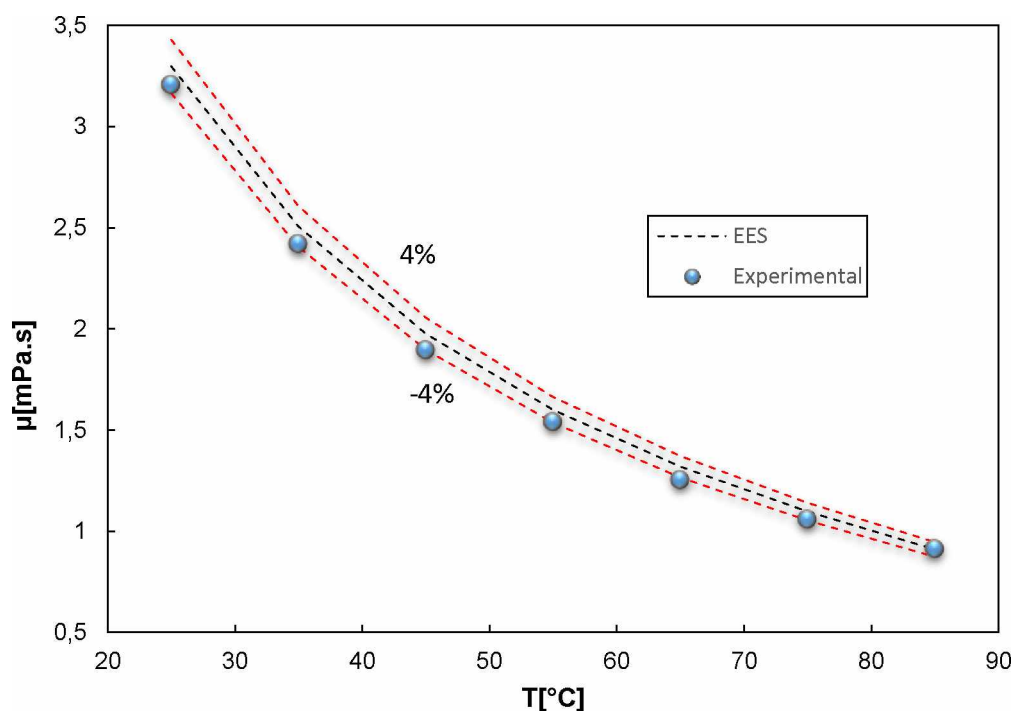


Figura 4.5 - Comparação e validação dos valores experimentais para viscosidade dinâmica obtidos para o fluido base (H<sub>2</sub>O:EG 50% vol.).

Os valores medidos mostram uma boa concordância com os valores encontrados em tabelas termodinâmicas, sendo o desvio máximo  $\pm 4\%$ . Os resultados obtidos para a viscosidade dinâmica de todos os nanofluidos testados mostraram que a viscosidade diminui com o aumento da temperatura, conforme esperado. Estes resultados estão evidenciados na Fig. 4.6.

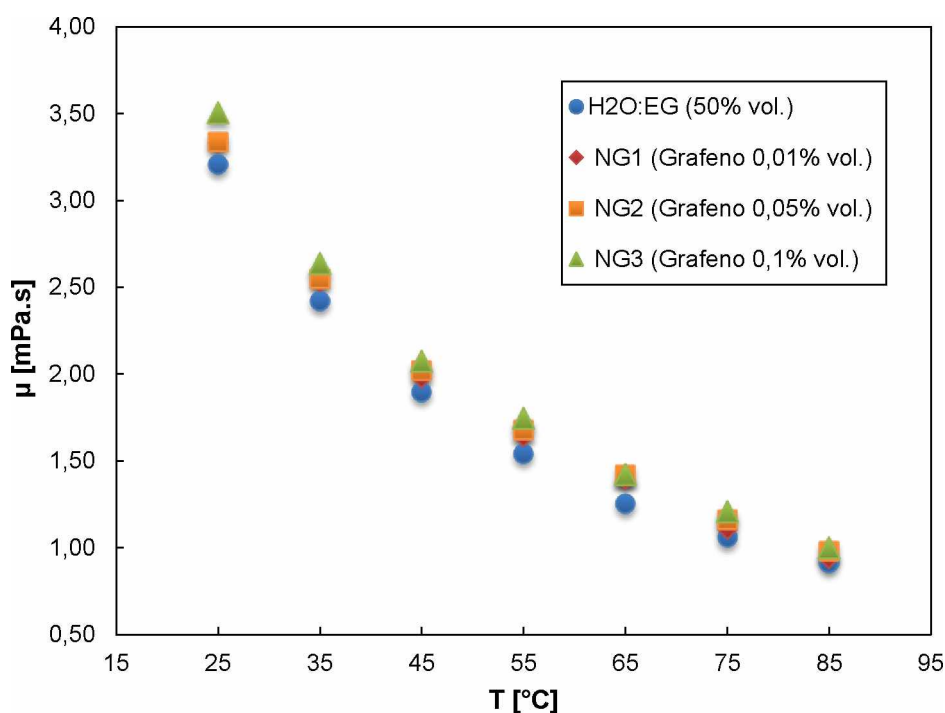


Figura 4.6 - Variação da viscosidade de nanofluidos de grafeno/(H<sub>2</sub>O:EG 50% vol.) com a temperatura.

Com o aumento da temperatura, mais próximos se tornam os valores da viscosidade do nanofluido e do fluido base. O incremento médio foi de 6,2% para menor concentração (0,01% vol.), de 13,2% para concentração intermediária (0,05% vol.), e para máxima concentração (0,1% vol.), foi de 13,5%.

Com relação ao comportamento dos nanofluidos em função da concentração, os resultados podem ser melhor observados na Fig. 4.7, que ilustra o comportamento dos nanofluidos para cada temperatura medida em função da concentração. Pode-se observar que a viscosidade é crescente com a concentração, para todas as temperaturas analisadas.

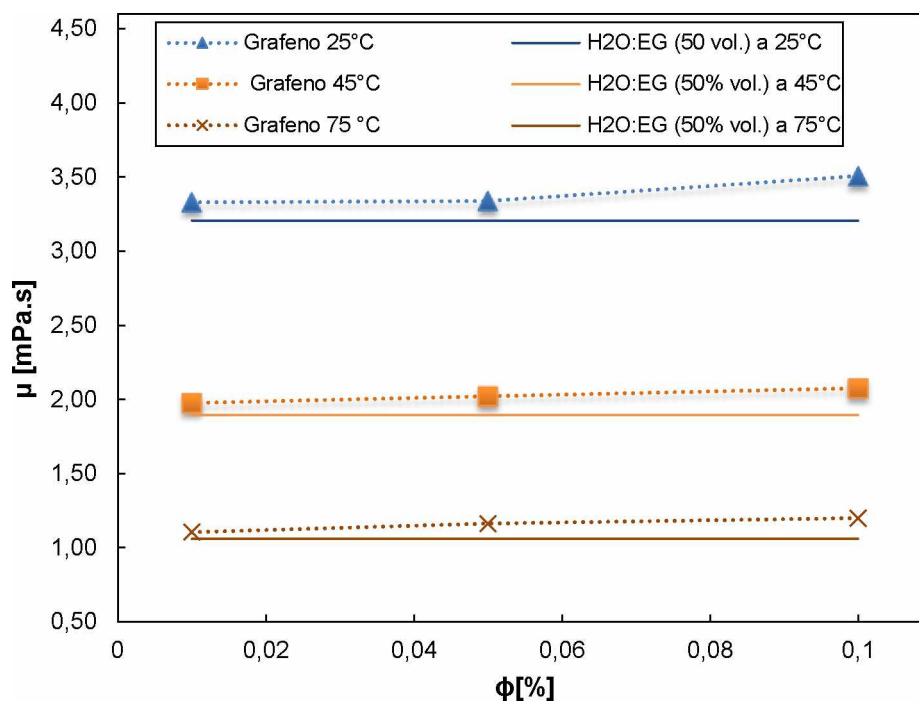


Figura 4.7 - Variação da viscosidade de nanofluidos de grafeno/(H<sub>2</sub>O:EG 50% vol.) com a concentração volumétrica.

Uma diminuição da viscosidade foi observada para a maior concentração, sendo de 71% quando a temperatura foi aumentada de 25 °C para 85 °C. Desta forma, quanto maior à temperatura a distância intermolecular torna-se maior provocando um efeito de diminuição na viscosidade do fluido. As correlações utilizadas para estimar a viscosidade do nanofluido mostraram uma boa concordância com os resultados experimentais em todas as concentrações, conforme apresenta a Tab. 4.2.

Tabela 4.2 - Comparação entre a viscosidade dinâmica experimental e teórica do nanofluido para T=65 °C.

Concentração em volume [%]	0,01	0,05	0,1
Experimental [mPa.s]	1,3955	1,41925	1,4245
Brinkman (1952)	1,2536	1,2548	1,2564
Wang, Xu e Choi (1999)	1,2542	1,2579	1,2626

Os modelos de (BRINKMAN, 1952) e (WANG; XU; S. CHOI, 1999) apresentaram um desvio máximo na faixa de  $\pm 10\%$  para uma temperatura de teste de  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.1.4. Condutividade Térmica

A condutividade térmica do fluido base e dos nanofluidos em três diferentes concentrações foi medida experimentalmente pelo método da ponte quente transiente (*transient hot bridge*) em uma faixa de temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  até  $55^{\circ}\text{C}$  com intervalos de  $10^{\circ}\text{C}$ . A fim de obter uma maior confiabilidade nas leituras o processo de medição foi repetido em dez leituras para cada temperatura. Uma vez que foram feitas todas as medições para condutividade térmica, foi realizado um processo de verificação das leituras comparando os valores experimentais com base em tabelas termodinâmicas para uma solução ( $\text{H}_2\text{O}/\text{EG}$  50% vol.). Os dados de validação apresentaram uma discordância máxima de 6% com relação aos valores das tabelas, conforme apresentado na Fig. 4.8.

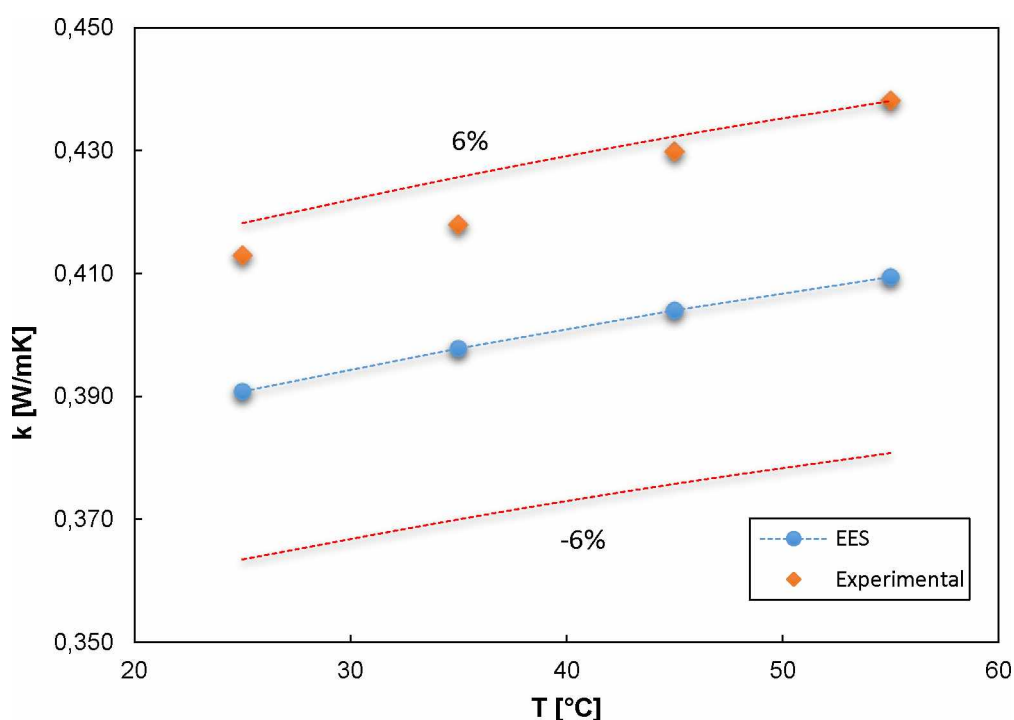


Figura 4.8 - Validação dos valores experimentais de condutividade térmica obtidos para o fluido base ( $\text{H}_2\text{O}/\text{EG}$  50% vol.).

A Figura 4.9 apresenta os valores de condutividade térmica em função da concentração volumétrica de nanopartículas de grafeno (0,01;0,05;0,1%)

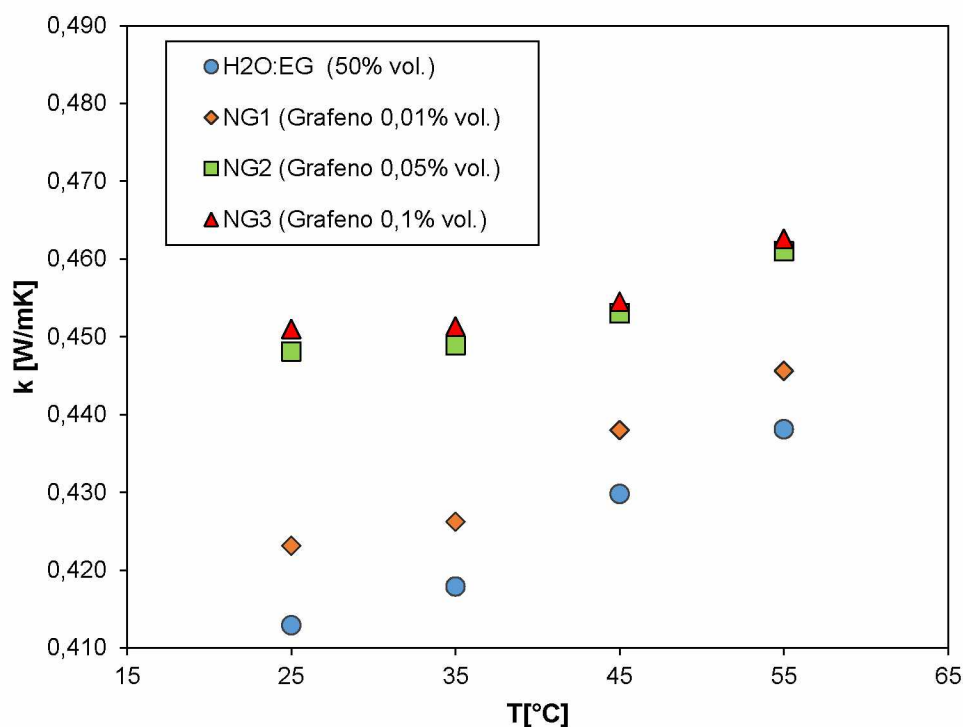


Figura 4.9 - Condutividade térmica experimental de nanofluidos de grafeno em (H<sub>2</sub>O/EG 50% vol.) em diferentes concentrações.

Observa-se claramente que a condutividade térmica aumenta em função da temperatura e a concentração de nanopartículas. Para os nanofluidos analisados evidenciou-se um aumento de até 9,2% para NG3 (grafeno 0,1% vol.) em comparação com o fluido base a 55°C. Esta intensificação é principalmente associada a uma maior condutividade térmica das nanopartículas.

Também foi avaliado o efeito da temperatura apresentando aumentos em toda a faixa de medição. Mas ao contrário da literatura, na medida que a temperatura aumenta, os ganhos se tornam cada vez menores, provavelmente devido à degradação na estabilidade do nanofluido, que dificulta realizar a medição sob a hipóteses que a sonda esta imersa em um meio homogêneo é isotrópico. Portanto, se o nanofluido sofre alguma alteração na estabilidade a tendência da condutividade do nanofluido é a de ser mais próxima à condutividade do fluido base.

A condutividade térmica medida também foi comparada com as previstas por algumas correlações da literatura, reportadas no Capítulo 2. Os resultados mostraram uma relativa boa concordância com o modelos desenvolvidos por (HAMILTON; CROSSER, 1962) e (NAN; SHI; LIN, 2003b) em seus trabalhos com um desvio máximo de 8%. A partir da Fig. 4.9 e Fig. 4.10

pode-se observar que todos os nanofluidos exibem maiores condutividades térmicas comparadas com o fluido base, bem como as condutividades térmicas previstas pelos modelos da literatura. Outros trabalhos da literatura têm sido contraditórios com relação ao presente trabalho, chegando a obter valores inferiores quando considerando os modelos clássicos.

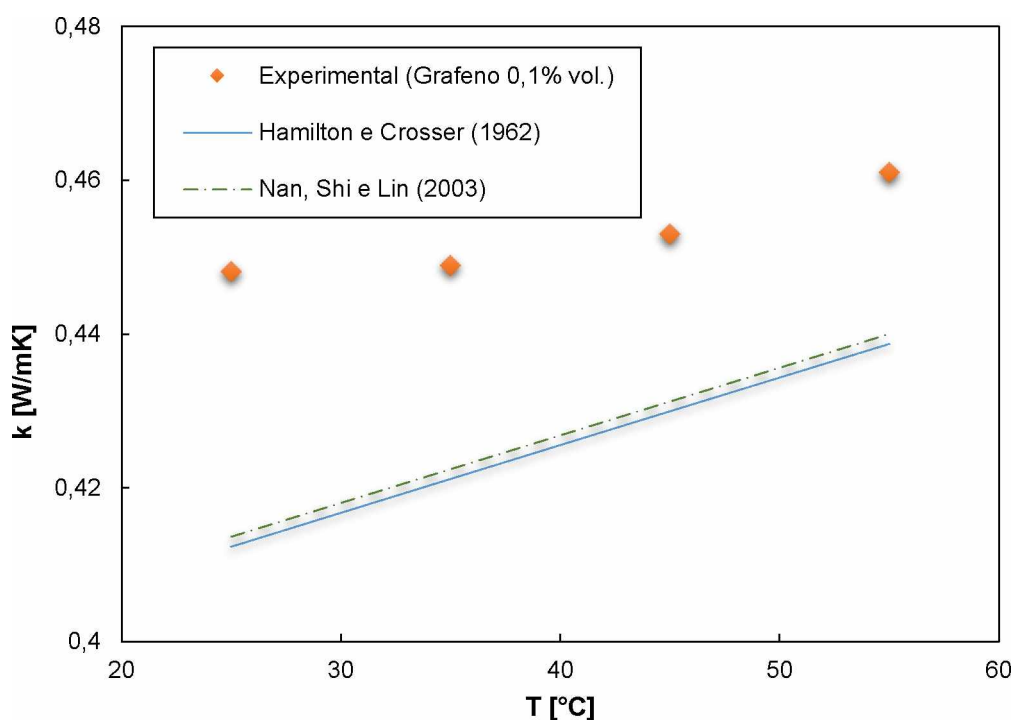


Figura 4.10 - Comparação entre os resultados experimentais de nanofluido de grafeno (0,05% vol.), com modelos de correlação.

#### 4.2. Balanço de energia e validação da bancada experimental

Desprezando as perdas, a taxa de transferência de calor liberada do ar e a taxa de transferência de calor recebida pelo fluido de arrefecimento devem ser iguais (isto é,  $\dot{Q}_{\text{ar}} \approx \dot{Q}_{\text{liq}}$ ). Baseado neste aspecto, os resultados obtidos para o fluido base foram validados comparando os lados do ar e de fluido quente. Esta validação é fundamental tendo em vista que as propriedades térmicas do fluido base são conhecidas, enquanto para os nanofluidos não existe uma base de dados, sendo estas propriedades também medidas experimentalmente. No presente estudo a diferença entre a taxa de calor liberada pelo ar e a taxa de calor recebida pelo fluido de arrefecimento ( $\text{H}_2\text{O}/\text{EG}$  50% vol.) em termos de percentagem é referida no balanço de energia da Eq. (3.21) e apresentado na Fig. 4.11.

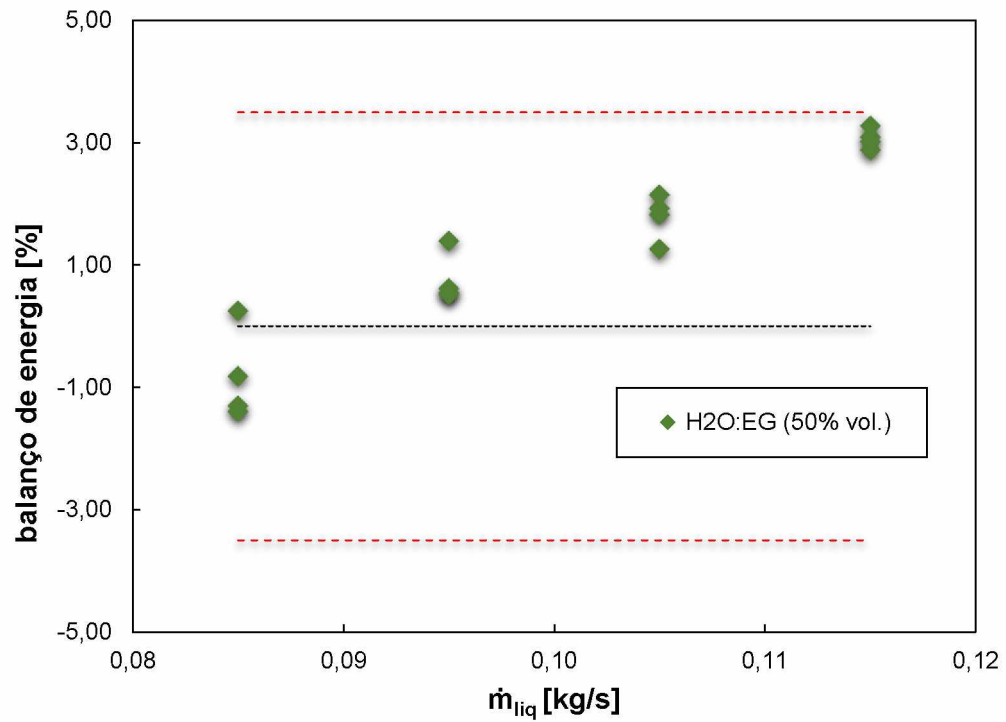


Figura 4.11 - Balanço de energia para bancada funcionando com H<sub>2</sub>O/EG (50% vol.).

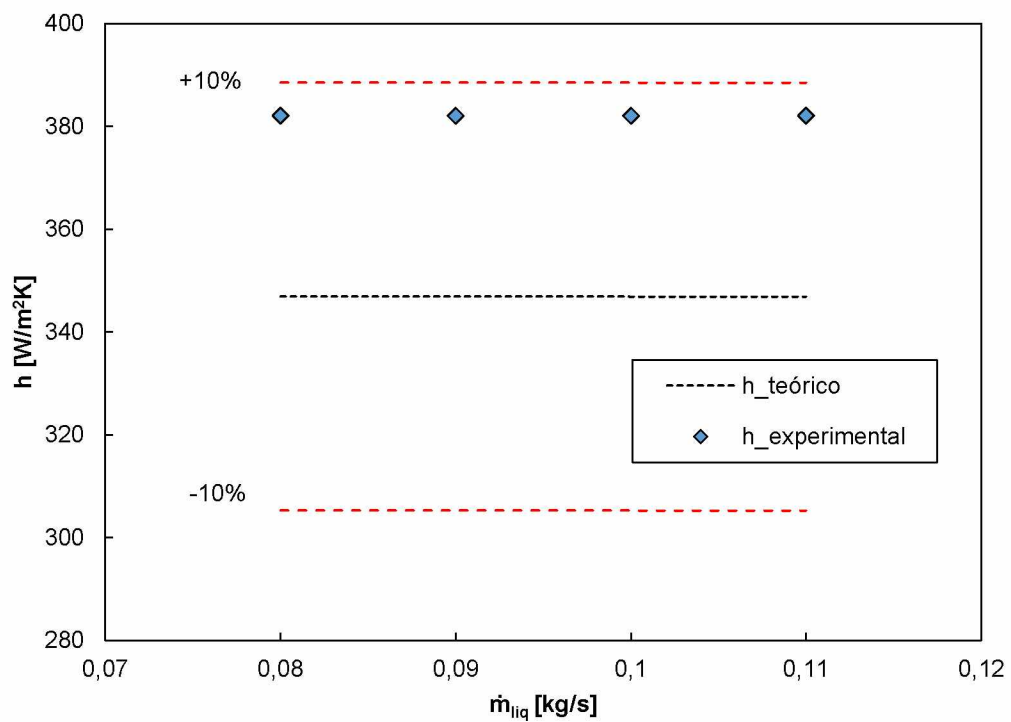


Figura 4.12 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor teórico e experimental para H<sub>2</sub>O/EG (50% vol.) em uma temperatura de 65 °C.

As diferenças entre a taxa de calor liberada pelo fluido de arrefecimento e a taxa de calor ganho pelo ar são inferiores a 3,5%, indicando mínimas perdas para o ambiente externo. Assim a Fig.4.12, apresenta a comparação entre os valores médios dos resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor com valores teóricos obtidos por meio da Eq. (3.19). Observa-se que existe uma boa concordância entre os resultados experimentais e os teóricos. A maior discrepância entre os valores experimentais e os teóricos foi de 9,5%. A validação dos resultados indica que os ensaios estão adequados para a avaliação do desempenho dos nanofluidos, com mínimos desvios e erros.

### 4.3. Desempenho termo-hidráulico de nanofluidos em radiador automotivo

Esta parte da pesquisa foi projetada para investigar o desempenho térmico do radiador automotivo usando fluido de arrefecimento convencional (como por exemplo, H<sub>2</sub>O-EG (50% vol.)) assim como nanofluidos de grafeno em três diferentes concentrações (0,01; 0,05 e 0,1% vol.) em uma mistura de H<sub>2</sub>O-EG (50% vol.) como fluido base.

Em seguida, os resultados foram utilizados para avaliar os principais parâmetros que influenciam no desempenho térmico de um sistema, tais como:

- Taxa de transferência de calor
- Coeficiente Global de transferência de calor
- Potência de bombeamento

Os ensaios foram conduzidos em três condições de velocidade do ar (2,1;2,4;2,8 m/s), enquanto a temperatura de entrada do ar foi mantida constante em 25 °C. A vazão mássica de fluido variou entre (0,08-0,11 kg/s) com temperaturas na entrada de 55- 85 °C. Assim, cada amostra foi submetida à 48 testes. De forma sucinta as condições de teste também estão apresentadas na Tab. 3.4.

#### 4.3.1. Taxa de transferência de calor

*- Influência da vazão mássica e concentração de nanofluido na taxa de transferência de calor*

As figuras. 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 mostram a taxa de transferência de calor no radiador utilizando (H<sub>2</sub>O/EG 50% vol.) e nanofluidos compostos por grafeno em função da vazão mássica, para temperaturas de entrada do líquido de 55, 65, 75 e 85 °C com velocidade do ar

de 2,1 m/s. De maneira geral, para os nanofluidos testados, a taxa de transferência de calor apresentou uma diminuição quando comparados com o fluido base, sendo que a concentração de (0,01% vol.) apresentou um desempenho 40% inferior.

Entretanto, para todos os valores de temperatura e vazão mássica, observou-se uma tendência de aumento na taxa de transferência de calor com a concentração de nanopartículas. Ainda assim, os nanofluidos de concentração (0,05% e 0,1% vol.) apresentaram um decréscimo no valor da taxa de transferência de calor de 10 e 4% respectivamente. Estes valores percentuais podem ser visualizados na Tab. 4.3, Tab. 4.4, Tab. 4.5 e Tab. 4.6 para cada condição de teste realizada.

A Tab. 4.3 e a Fig. 4.13 ilustram os resultados para a taxa de transferência de calor média em nanofluidos de grafeno comparados com o fluido base para uma temperatura de 55 °C. Pode-se observar que o nanofluido de concentração 0,01% obteve o maior decréscimo na taxa de transferência de calor com um valor 37,2%. Os nanofluidos de concentração de 0,05 e 0,1% vol. exibiram comportamentos mais próximos ao fluido base, mas com decréscimos de 9,67 e 3,37% respectivamente. De forma geral o desempenho foi inferior para as todas amostras analisadas quando comparado com o fluido base.

Tabela 4.3 - Taxa de transferência da calor relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 55°C.

$\dot{m}$ (kg/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %
<b>0,08</b>	1,60	-	1,01	-37,20	1,45	-9,67	1,55	-3,37
<b>0,09</b>	1,86	-	1,22	-34,60	1,78	-4,38	1,82	-2,23
<b>0,1</b>	2,11	-	1,45	-31,19	2,01	-4,87	2,10	-0,80
<b>0,11</b>	2,36	-	1,69	-28,45	2,25	-4,85	2,35	-0,28

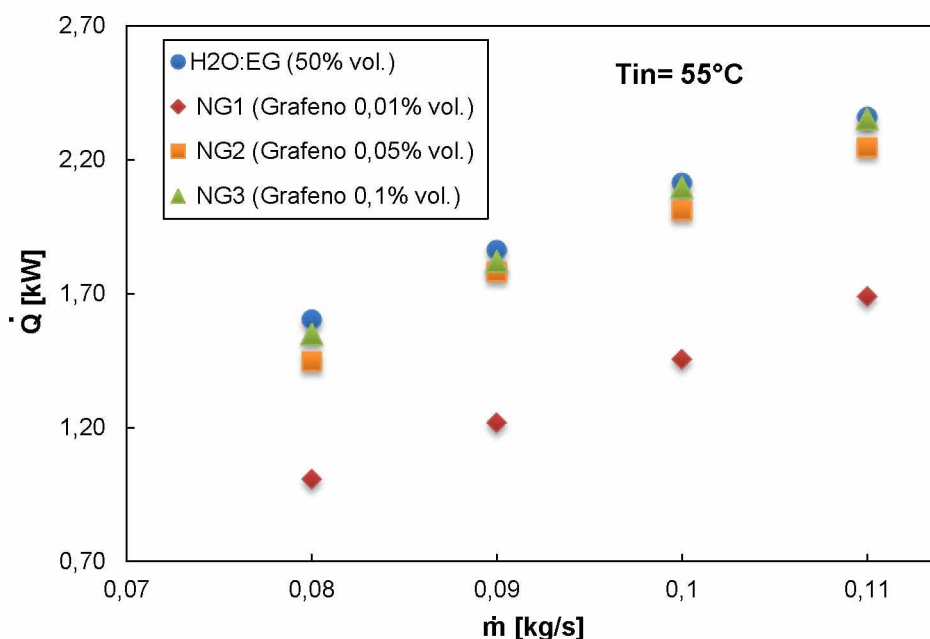


Figura 4.13 - Taxa de transferência de calor para nanofluidos de grafeno em diferentes vazões mássicas para uma temperatura de entrada no radiador de 55°C.

Os nanofluidos de grafeno apresentaram diminuição no calor transferido em todas as condições com temperatura de entrada 65°C, o que pode ser verificado na Fig. 4.14. O valor relativo apresentou decréscimos menores mas continua sendo distante do fluido base. O nanofluido de concentração 0,1% apresentou os resultados mais próximos ao do fluido base, porém inferiores em até 0,59%, enquanto para as menores concentrações a queda foi de até 31,1 e 3,2 % para os nanofluidos de concentração 0,01% e 0,05%. Estes resultados podem ser visualizados na Tab. 4.4

Tabela 4.4 - Taxa de transferência da calor relativo para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 65°C.

$\dot{m}$ (kg/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	$\dot{Q}$ (kW)	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}$ (kW)	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}$ (kW)	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}$ (kW)	$\dot{Q}$ relativo %
0,08	2,21	-	1,52	-31,08	2,14	-3,26	2,22	0,59
0,09	2,61	-	1,83	-29,99	2,48	-5,06	2,60	-0,54
0,1	2,96	-	2,14	-27,54	2,84	-3,99	2,94	-0,61
0,11	3,30	-	2,45	-25,85	3,16	-4,20	3,28	-0,44

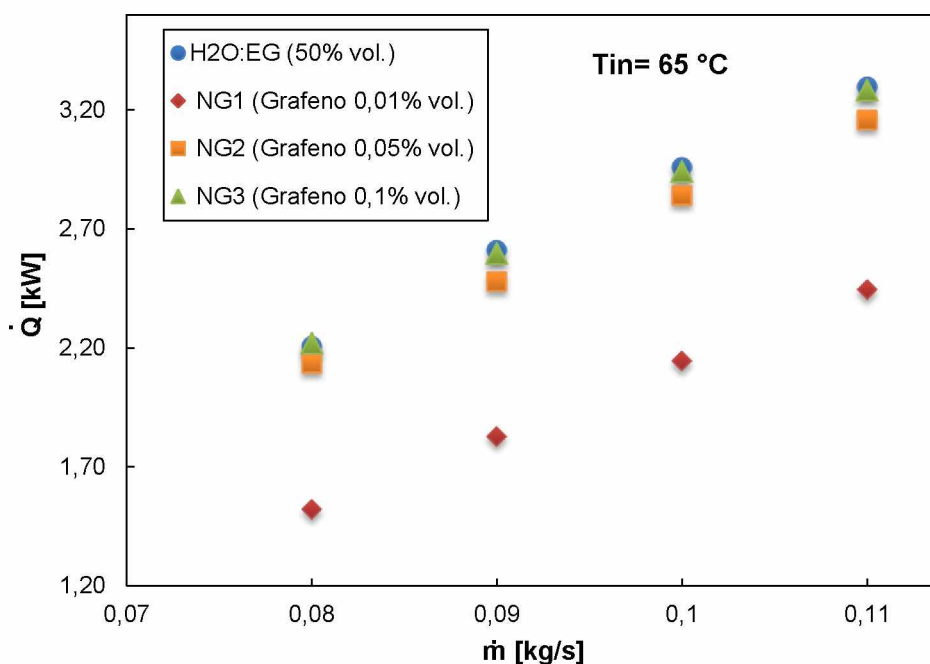


Figura 4.14 - Taxa de transferência de calor para nanofluidos de grafeno em diferentes vazões mássicas para uma temperatura de entrada no radiador de 65°C.

A Figura 4.15 apresenta a taxa de transferência de calor para a temperatura de entrada do líquido 75 °C. Assim, como nos ensaios com temperaturas de entrada de 55 e 65 °C, o nanofluido com concentração 0,1% foi o que mais se aproximou do fluido base, com diminuição na taxa de transferência de calor mínima de 0,07%, enquanto para os demais nanofluidos foram verificadas quedas na taxa de transferência de calor, mínima de 28,9 e 2,93%. Estes resultados podem ser observados na Tab. 4.5.

Tabela 4.5 - Taxa de transferência da calor relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 75°C.

$\dot{m}$ (kg/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %
0,08	2,93	-	2,08	-28,90	2,81	-4,13	2,93	-0,07
0,09	3,41	-	2,47	-27,75	3,27	-4,26	3,40	-0,37
0,1	3,88	-	2,88	-25,90	3,69	-5,06	3,87	-0,27
0,11	4,33	-	3,34	-22,96	4,14	-4,31	4,29	-0,94

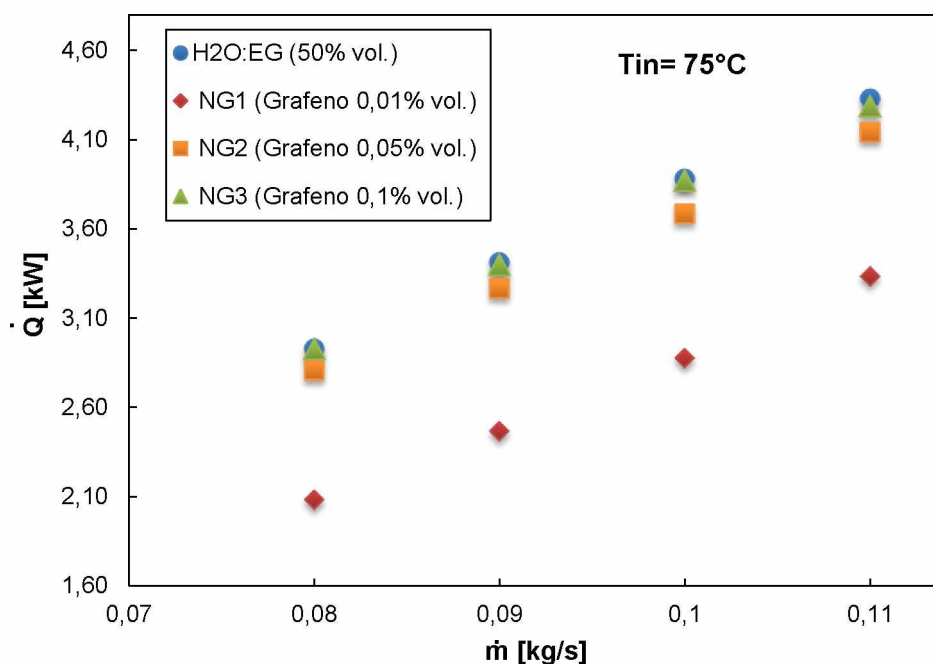


Figura 4.15 - Taxa de transferência de calor para nanofluidos de grafeno em diferentes vazões mássicas para uma temperatura de entrada no radiador de 75°C.

Na Fig. 4.16 apresenta-se a taxa de transferência de calor para os nanofluidos de grafeno nos testes com temperatura de entrada 85 °C. A taxa de desempenho do nanofluido de 0,01% ficou ainda abaixo do fluido base mas com quedas menores, reforçando a ideia de uma possível aglomeração e sedimentação de nanopartículas com o aumento da temperatura. Já os nanofluidos de concentração 0,1 e 0,05% apresentaram, assim como nos testes anteriores decréscimos na taxa de transferência de calor, neste caso, de 3,55 e 1,68 %. As taxas de transferência de calor relativas estão apresentadas na Tab. 4.6.

Tabela 4.6 - Taxa de transferência da calor relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C.

$\dot{m}$ (kg/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %	$\dot{Q}(\text{kW})$	$\dot{Q}$ relativo %
0,08	3,69	-	3,14	-14,92	3,56	-3,55	3,63	-1,68
0,09	4,30	-	3,65	-15,23	4,13	-4,00	4,36	1,30
0,1	4,88	-	4,20	-13,92	4,67	-4,22	4,87	-0,10
0,11	5,42	-	4,66	-13,97	5,15	-5,07	5,43	0,11

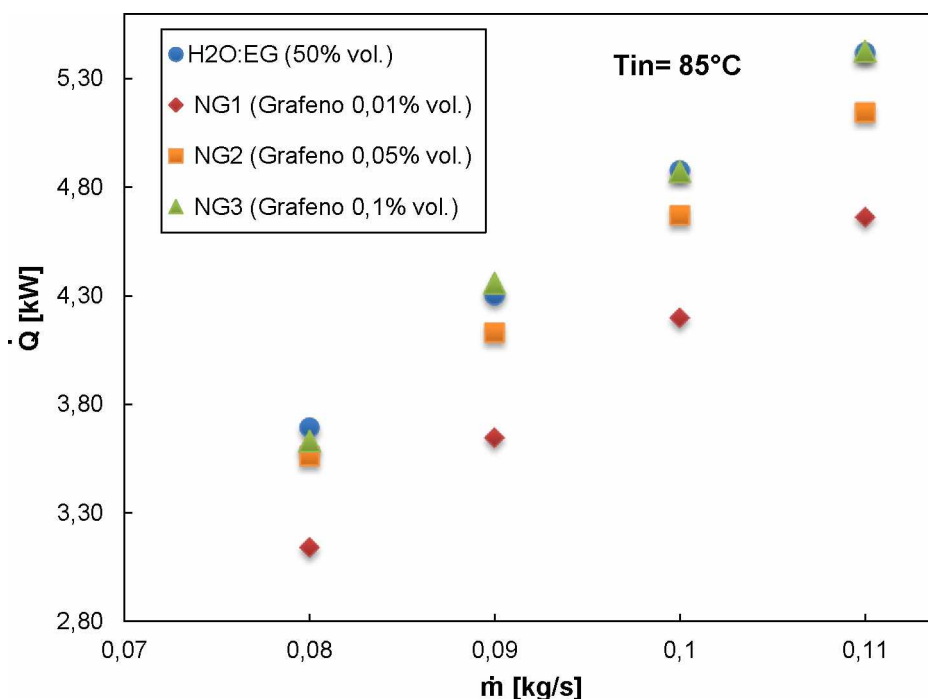


Figura 4.16 - Taxa de transferência de calor para nanofluidos de grafeno em diferentes vazões mássicas para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C.

#### 4.3.2. Influência da velocidade do ar na condutância térmica

Em análise adicional, foi analisado o comportamento da condutância térmica do radiador (UA) em função dos parâmetros de teste. Esta variável que envolve o efeito convectivo e condutivo indica a capacidade de troca de calor entre o fluido de arrefecimento e o ar. As figuras 4.16 a 4.19 mostram o coeficiente UA para os nanofluidos de grafeno, para as diversas condições de entrada. Os nanofluidos de concentração 0,01%, 0,05% vol. apresentaram valores de UA inferiores ao do fluido base para os testes com temperatura de entrada 85°C, enquanto apenas o nanofluido 0,1% apresentou UA ligeiramente inferiores.

De forma geral a tendência para a condutância térmica dos nanofluidos testados é similar à taxa de transferência de calor apresentando maiores desvios na condição de menor vazão do fluido de arrefecimento e menor concentração de nanopartículas, com um valor médio de 17% de redução e diminuindo os decréscimos significativamente na medida que a concentração de nanopartículas aumenta, ficando num valor médio de 1,5% abaixo quando comparado com fluido base. Assim, apenas avaliando esta condição de entrada o nanofluido não apresentou elevado potencial de melhora no desempenho térmico, ainda que com

condutividade térmica superior ao fluido base. As tabelas 4.6 a 4.10 mostram os valores relativos de UA para os ensaios realizados.

Tabela 4.7 - Condutância térmica relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C e vazão mássica 0,08 kg/s.

Vel <sub>ar</sub> (m/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %
2,1	0,0726	-	0,0609	-16,12	0,0681	-6,20	0,0705	-2,89
2,4	0,0737	-	0,0609	-17,31	0,0696	-5,56	0,0714	-3,12
2,8	0,0746	-	0,0614	-17,67	0,0696	-6,68	0,0720	-3,46

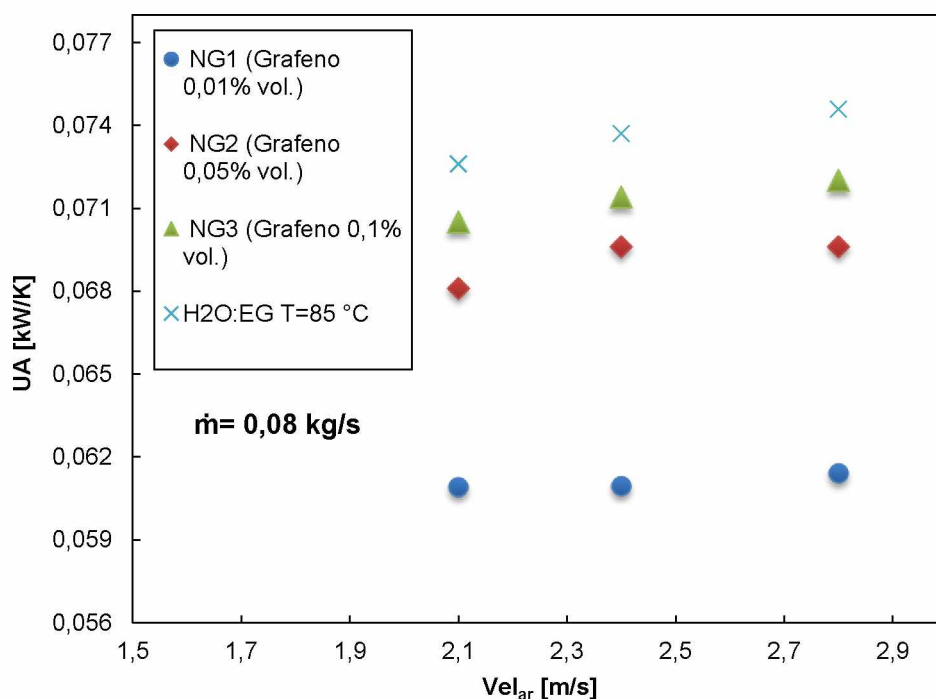


Figura 4.17 - Condutância térmica de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C.

Tabela 4.8 - Condutância térmica relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C e vazão mássica 0,09 kg/s.

Vel <sub>ar</sub> (m/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %
2,1	0,0870	-	0,0722	-17,07	0,0833	-4,25	0,0853	-1,95
2,4	0,0872	-	0,0724	-17,00	0,0835	-4,24	0,0854	-2,06
2,8	0,0875	-	0,0724	-17,25	0,0834	-4,65	0,0856	-2,14

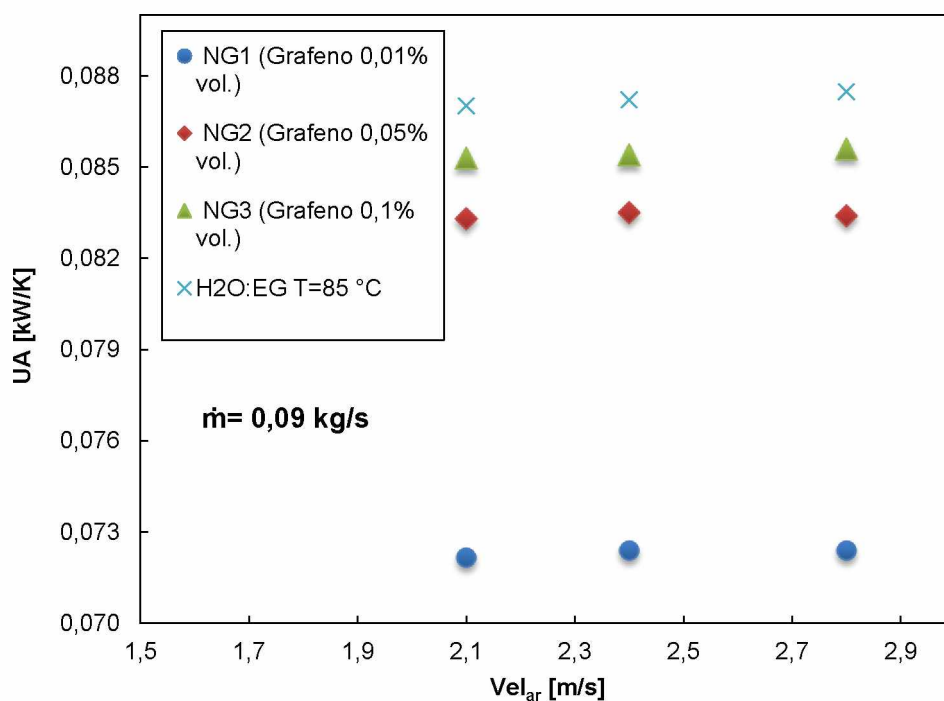


Figura 4.18 - Condutância térmica de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C.

Para as vazões de entrada de 0,1 e 0,11 kg/s, os nanofluidos de grafeno apresentaram os resultados mais próximos do fluido base, mas ainda assim nenhum desempenho foi

superior. O nanofluido também teve tendência para o aumento da condutância térmica como o aumento da velocidade do ar.

Tabela 4.9 - Condutância térmica relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C e vazão mássica 0,1 kg/s.

Vel <sub>ar</sub> (m/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %
2,1	0,0985	-	0,0840	-14,72	0,0955	-3,09	0,0976	-0,91
2,4	0,0990	-	0,0841	-15,05	0,0960	-3,03	0,0976	-1,41
2,8	0,1000	-	0,0842	-15,80	0,0960	-4,00	0,0978	-2,24

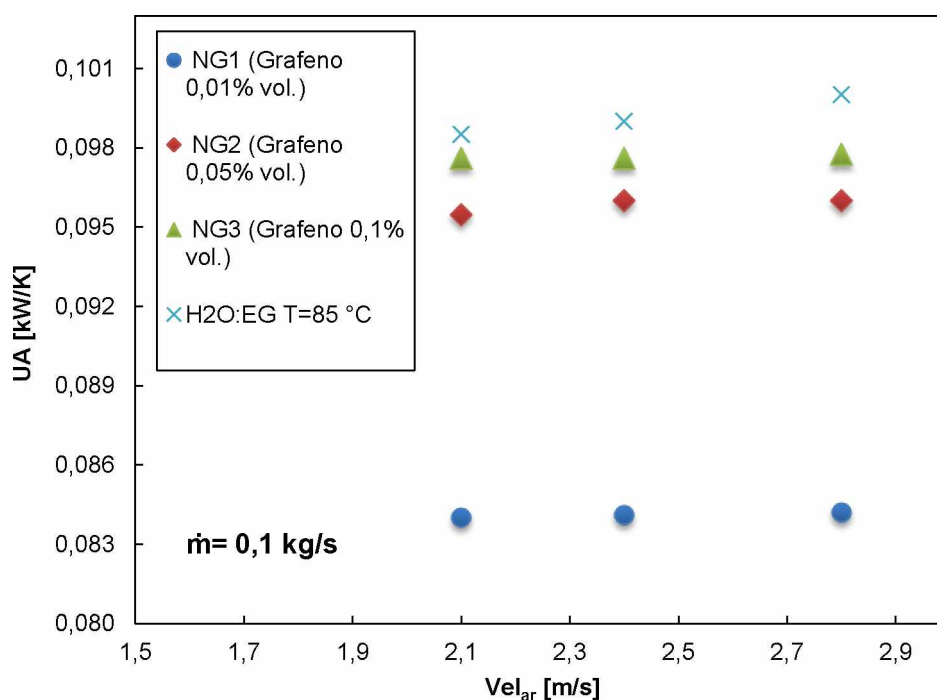


Figura 4.19 - Condutância térmica de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C.

Tabela 4.10 - Condutância térmica relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C e vazão mássica 0,11 kg/s.

Vel <sub>ar</sub> (m/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %	UA (kW/K)	UA relativo %
2,1	0,1107	-	0,0946	-14,54	0,1065	-3,79	0,1089	-1,63
2,4	0,1108	-	0,0951	-14,14	0,1067	-3,70	0,1090	-1,62
2,8	0,1115	-	0,0951	-14,71	0,1069	-4,13	0,1094	-1,88

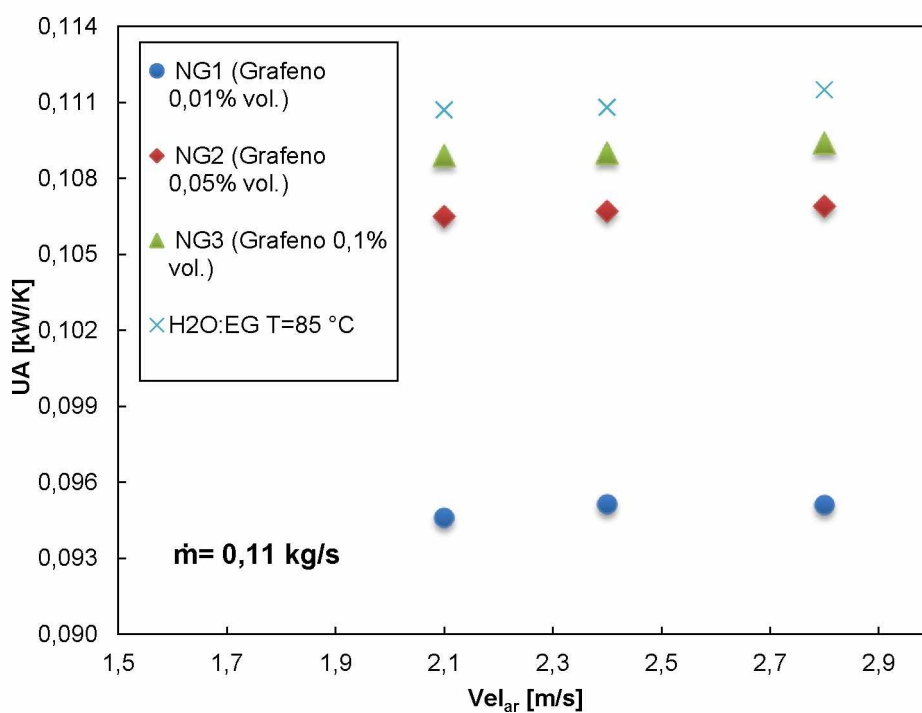


Figura 4.20 - Condutância térmica de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C.

#### 4.3.3. Potência de bombeamento

Nanofluidos avaliados experimentalmente dependem em grande parte da razão de ganho para condutividade térmica (associado com o aumento na transferência de calor) e o aumento da viscosidade (associados diretamente com a potência de bombeamento. Por esta

razão, avaliou-se também o desempenho hidráulico do sistema de arrefecimento automotivo por meio da potência de bombeamento consumida em função da vazão mássica e a concentração de nanopartículas. Os resultados obtidos para as três concentrações de grafeno (0,01 ; 0,05 e 0,1% vol.) em comparação com o fluido base são ilustrados nas Figs. 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23 e arranjados como potência de bombeamento relativa nas Tabs. 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13.

Tabela 4.11 - Potência de bombeamento relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 55°C.

$\dot{m}$ (kg/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %
<b>0,11</b>	30,75	-	30,44	-1,02	30,58	-0,56	30,78	0,10
<b>0,1</b>	23,32	-	23,19	-0,56	23,28	-0,17	23,28	-0,17
<b>0,09</b>	17,18	-	17,13	-0,31	17,18	0,00	17,14	-0,23
<b>0,08</b>	12,20	-	12,18	-0,16	12,20	0,00	12,18	-0,16

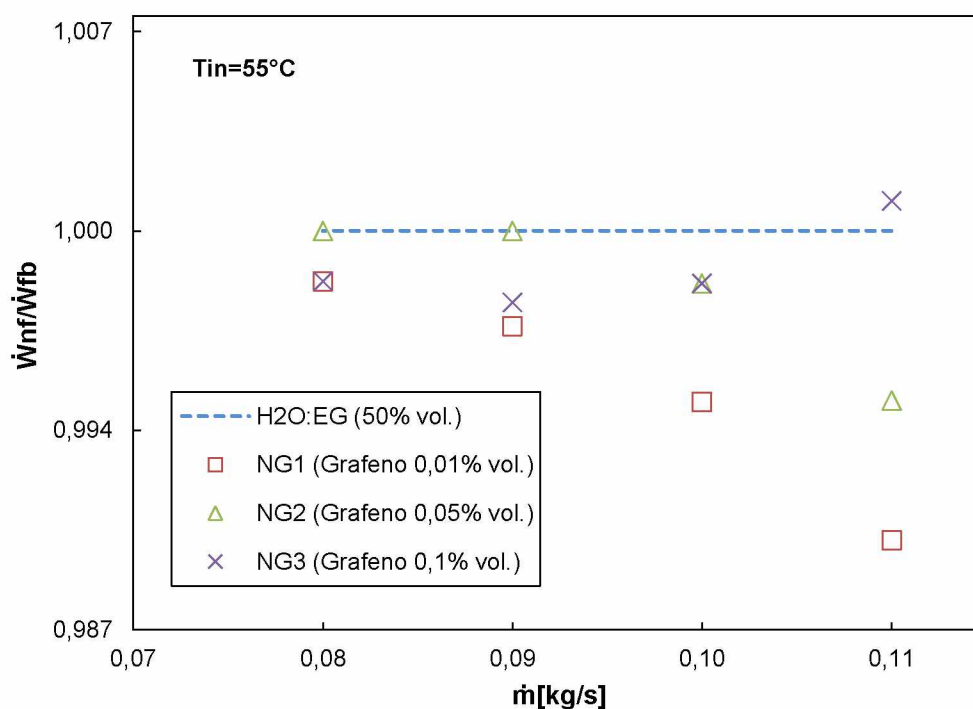


Figura 4.21 - Potência de bombeamento relativa de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 55°C.

Para uma temperatura de 55°C o nanofluido de concentração 0,01% teve reduções na potência de bombeamento de até 1,02 % com aumento da viscosidade. O fato da potência de bombeamento ser reduzida pode ser resultado de que para maiores vazões o efeito da nanopartícula influencia positivamente na queda de pressão do circuito hidráulico, sem embargo para as concentrações de 0,05 e 0,1% não foi observada uma tendência clara sendo inclusive o comportamento do nanofluido similar com fluido base.

Tabela 4.12 - Potência de bombeamento relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 65°C.

$\dot{m}$ (kg/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %
0,11	30,19	-	30,12	-0,22	30,29	0,35	30,41	0,74
0,1	23,04	-	22,87	-0,72	23,15	0,50	23,20	0,71
0,09	17,00	-	16,95	-0,32	17,13	0,76	17,10	0,58
0,08	12,13	-	12,07	-0,46	12,20	0,61	12,19	0,53

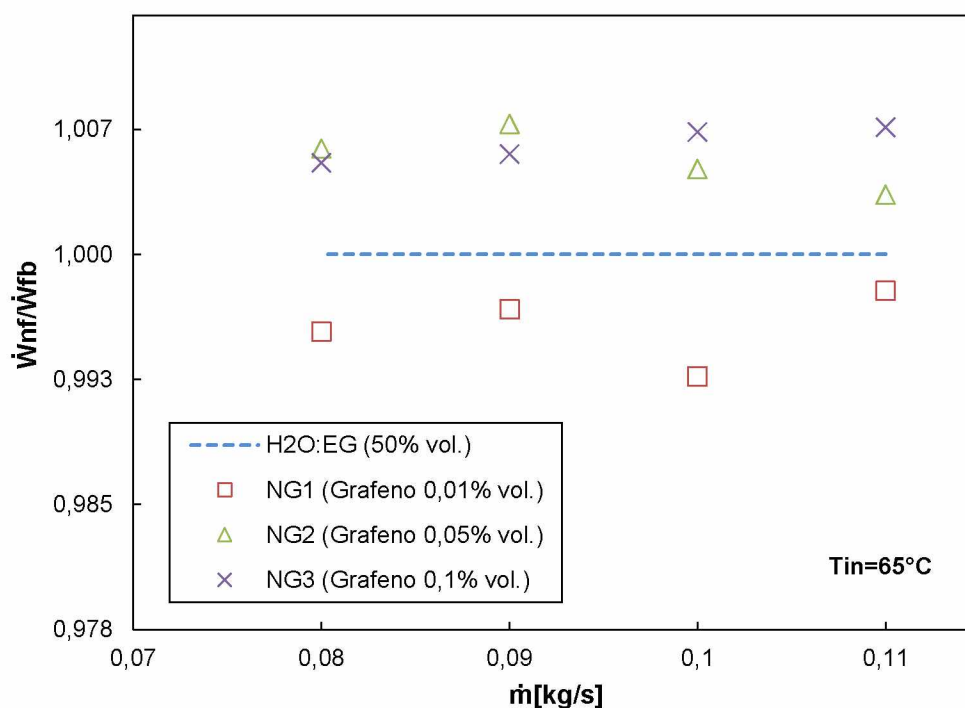


Figura 4.22 - Potência de bombeamento relativa de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 65°C.

Para uma temperatura de 65°C se evidencia que o efeito da temperatura do fluido é significativo na potência de bombeamento. Os nanofluidos de concentração 0,01% e 0,05 % mostraram comportamentos próximos do fluido base. Já para a concentração de 0,1% a potência de bombeamento ficou acima do fluido base com um incremento de até 0,7% para uma vazão de 0,11 kg/s. O fato da potência de bombeamento maior pode ser explicada pelo fato que para maiores temperaturas o efeito de formação de aglomerados e sedimentação de nanopartículas torna-se maior.

Tabela 4.13 - Potência de bombeamento relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 75°C.

$\dot{m}$ (kg/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %
0,11	29,88	-	29,79	-0,30	29,80	-0,25	30,33	1,50
0,1	22,71	-	22,73	0,11	22,75	0,20	23,15	1,92
0,09	16,80	-	16,80	0,03	16,98	1,09	17,16	2,13
0,08	12,02	-	12,04	0,17	12,08	0,54	12,27	2,08

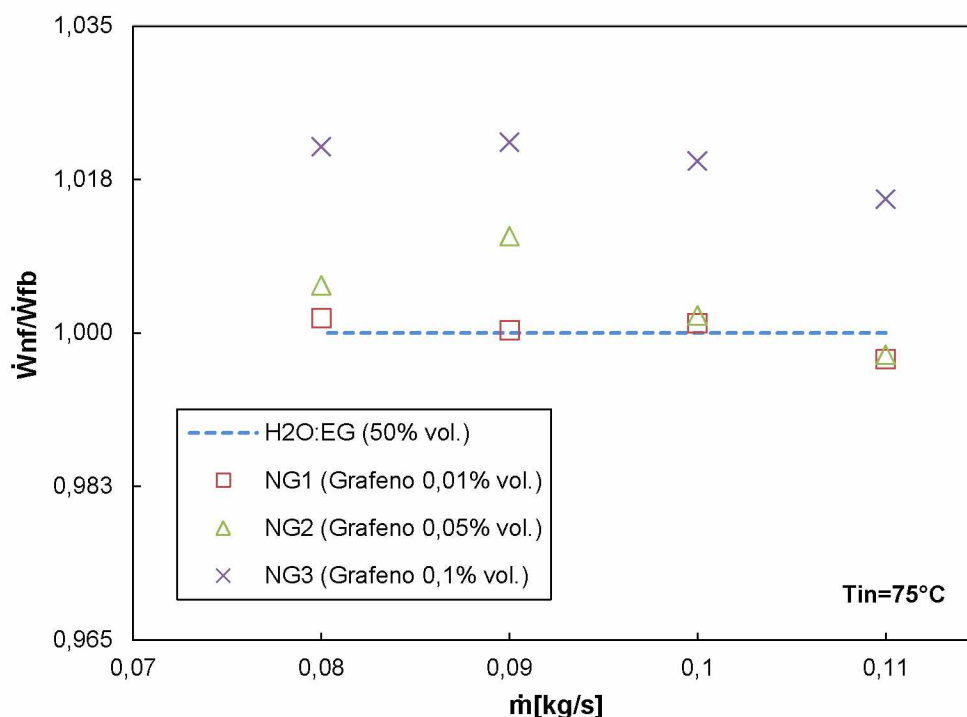


Figura 4.23 - Potência de bombeamento relativa de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 75°C.

Tabela 4.14 - Potência de bombeamento relativa para os ensaios com temperatura de entrada de nanofluido de 85°C.

$\dot{m}$ (kg/s)	$\phi = 0$		$\phi = 0,01 \%$		$\phi = 0,05 \%$		$\phi = 0,1 \text{ kg/s}$	
	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %	$P_{\text{bom}}$ (W)	$P_{\text{bom}}$ relativo %
0,11	29,5	-	29,4	-0,6	29,7	0,7	30,2	2,1
0,1	22,5	-	22,5	-0,1	22,8	1,0	23,1	2,4
0,09	16,6	-	16,6	0,1	16,9	1,4	17,1	2,9
0,08	11,9	-	11,9	-0,3	12,1	0,9	12,4	3,5

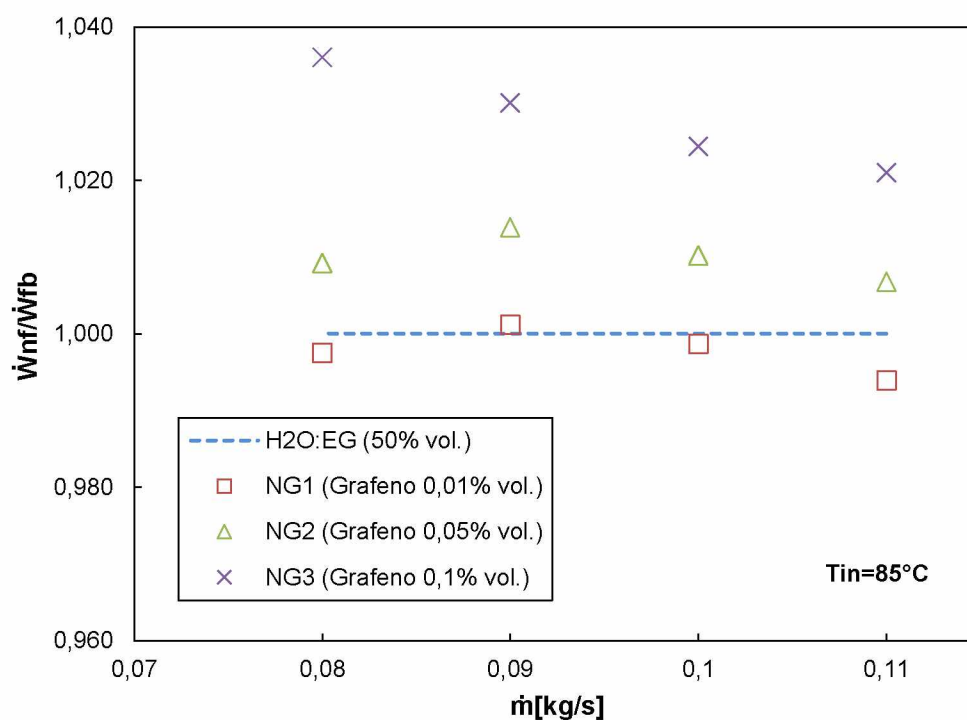


Figura 4.24 - Potência de bombeamento relativa de nanofluidos de grafeno para uma temperatura de entrada no radiador de 85°C.

Um maior aumento na potência de bombeamento para as temperaturas de 75 e 85°C reforça ainda mais a ideia de que o nanofluido perde estabilidade com o aumento da temperatura. As engrenagens da bomba certamente sofreram desgaste ao longo dos testes, fato que influenciou no aumento da potência de bombeamento. Os resultados obtidos para a potência de bombeamento em função da vazão e a temperatura mesmo que tendo decréscimos para algumas condições de teste, em geral teve um comportamento inferior ao

fluido base. Conclui-se que o nanofluido para as temperaturas normais de operação de um radiador automotivo apresenta um desempenho tanto térmico como hidráulico menor. Uma análise a través do cálculo do coeficiente de desempenho termo-hidráulico poderá evidenciar qualitativamente este fato.

#### 4.3.4. Coeficiente de desempenho termo-hidráulico

A diminuição na taxa de transferência de transferência foi uma tendência evidenciada para todas as amostras de nanofluidos de grafeno testadas. Por outro lado, a potência de bombeamento teve decréscimos em algumas condições de teste, porém o último passo consiste em avaliar o coeficiente de desempenho termo-hidráulico do sistema de arrefecimento definido pelo coeficiente de eficiência apresentado na Eq. (4.3), que é utilizado em várias pesquisas para caracterizar o desempenho energético global do sistemas térmicos quando possíveis novos fluidos de arrefecimento são utilizados (FERROUILLAT et al., 2013).

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{nf} / \dot{W}_{nf}}{\dot{Q}_{bf} / \dot{W}_{bf}} \quad (4.3)$$

Onde  $\eta$  representa o coeficiente de desempenho,  $\dot{W}_{nf}$ ,  $\dot{W}_{bf}$ ,  $\dot{Q}_{nf}$  e  $\dot{Q}_{bf}$  são as potencias de bombeamento e as taxas de transferência de calor para o nanofluido e fluido base.

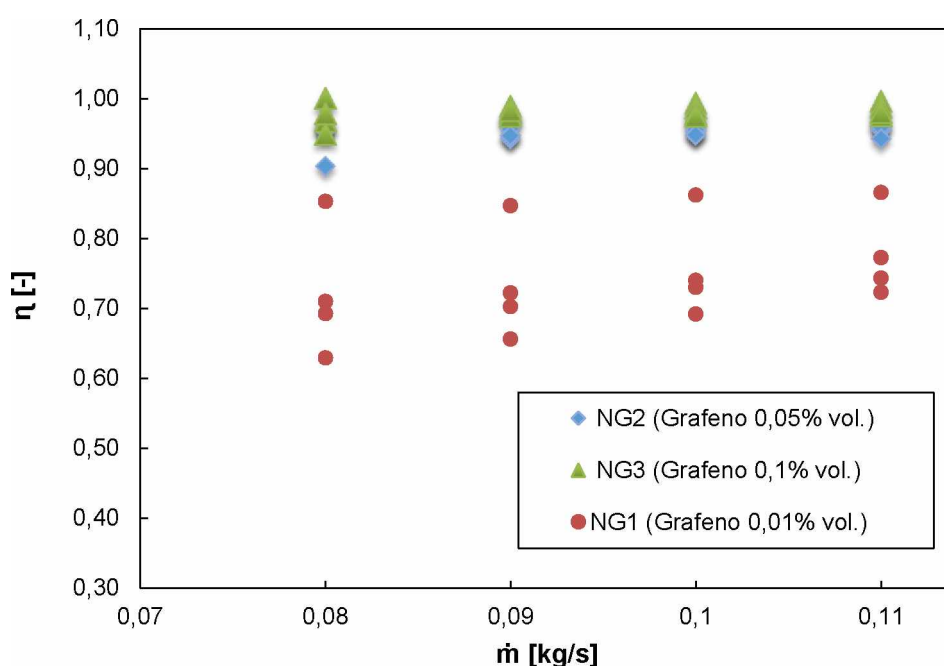


Figura 4.25 - Coeficiente de desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de grafeno em função da vazão mássica diferentes vazões mássicas.

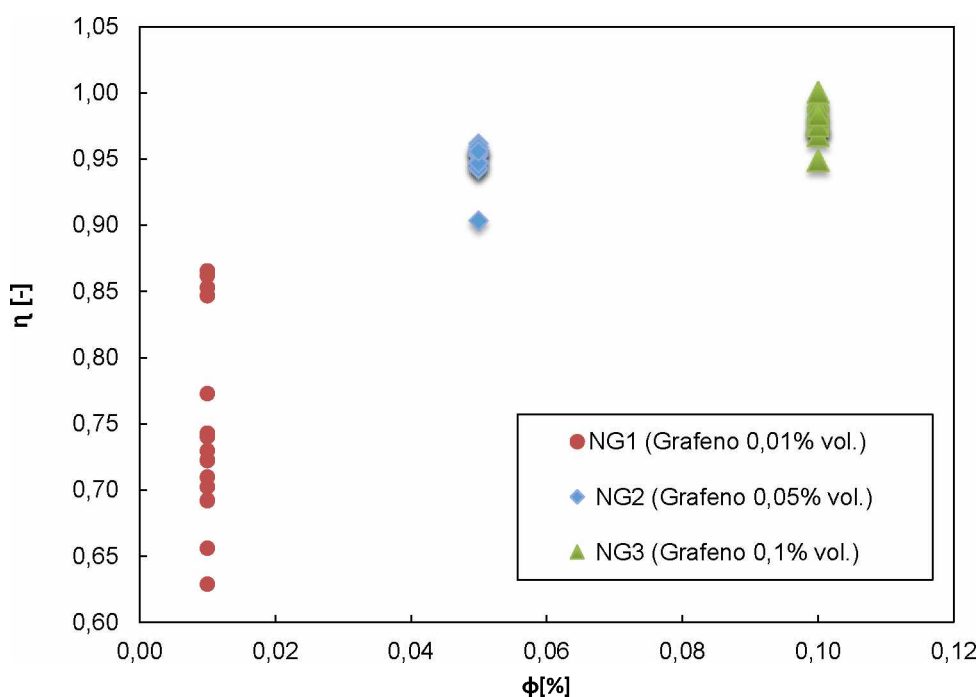


Figura 4.26 - Coeficiente de desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de grafeno em função da concentração de nanopartículas.

As Figs. 4.25 e 4.26 mostram os resultados do coeficiente de desempenho para os ensaios que apresentaram em função da vazão mássica e a concentração volumétrica respetivamente. Observou-se que para os casos onde ocorreu uma maior diminuição na potência de bombeamento e provavelmente um melhor comportamento termo-hidráulico do nanofluido o coeficiente de desempenho é menor que 1. De modo geral o desempenho termo-hidráulico de nanofluido foi insatisfatório para todas as concentrações.

#### 4.4. Comparação com dados da literatura

Os resultados obtidos nos testes com nanofluidos em radiadores automotivos no presente trabalho apresentaram certas discrepâncias com relação a maioria dos dados encontrados na literatura, na qual são apresentados, de maneira geral, resultados que indicam elevado aumento na transferência de calor e potência de bombeamento. Neste trabalho foram encontrados decréscimos nas taxas de transferência de calor em toda a faixa de temperaturas analisadas e ligeiros decrementos na potência de bombeamento para as temperaturas de 55 e 65°C. Segundo (OLIVEIRA, 2016) o motivo dos resultados não possuírem concordância

com a literatura é devido à maioria dos pesquisadores analisam os principais parâmetros de transferência de calor,  $Q$  e  $U$  (ou  $h$ ), em função do número de Reynolds que, uma vez fixado, implica na necessidade do aumento da vazão mássica ao utilizar nanofluidos (porque a viscosidade dos nanofluidos é superior à dos fluidos base). Ou seja, o aumento apresentado na taxa de transferência de calor é fortemente influenciado pelo aumento na vazão mássica e não pela utilização de nanofluidos.

Em seus trabalhos, (PEYGHAMBARZADEH et al., 2013) e (M'HAMED et al., 2016) analisaram o coeficiente global de transferência de calor e também o coeficiente de transferência de calor por convecção em função do número de Reynolds, como ilustrado na Fig.4.27. O aumento na viscosidade alterou os valores de Reynolds dos testes, influenciando no parâmetro de comparação entre fluido base e nanofluido. No caso da Fig. 4.25b foi mantido o número de Reynolds constante destacando um aumento no coeficiente de transferência de calor convecção influenciado pelo aumento da vazão mássica.

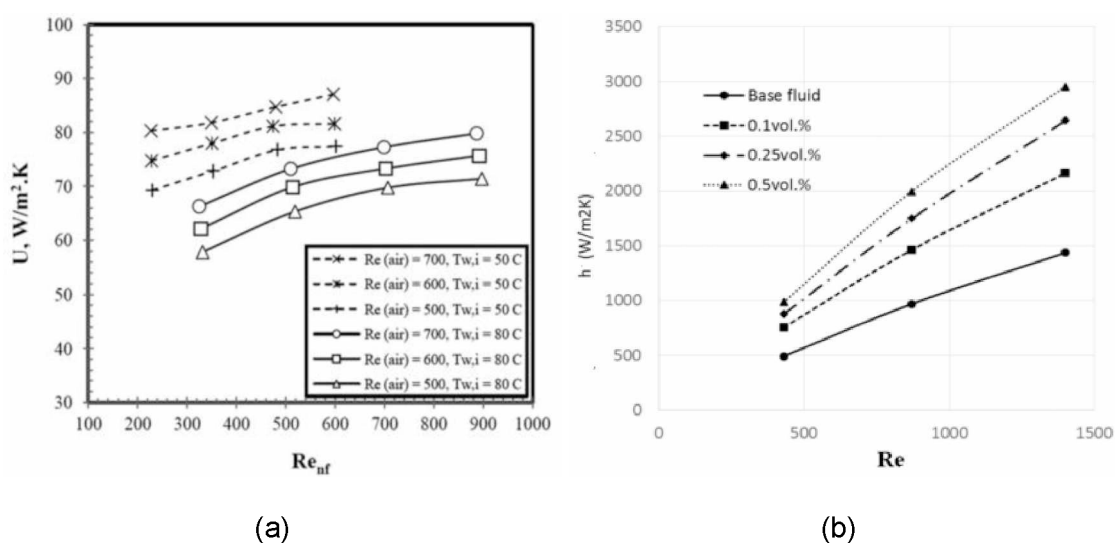


Figura 4.27 - Resultados experimentais de (PEYGHAMBARZADEH et al., 2013) e (M'HAMED et al., 2016). (a) Coeficiente global de transferência de calor para os nanofluidos de concentração 0,15%. (b) incremento na transferência de calor para Nanotubos de carbono (MWCNT).

(AMIRI et al., 2016) trabalharam como nanopartículas de grafeno em três diferentes concentrações e dispersadas em uma mistura de ( $H_2O$  /EG) e obtiveram incrementos significativos no coeficiente de desempenho termo-hidráulico em função da vazão volumétrica para diferentes temperaturas de trabalho do fluido de arrefecimento. Como indicado na

Fig.4.27, o coeficiente de desempenho foi aumentado para as três concentrações em até 60%. Vale ressaltar que as concentrações utilizadas foram ainda mais baixas que as utilizadas no presente trabalho, mas os resultados apresentaram uma tendência similar sem atingir melhora significativa.

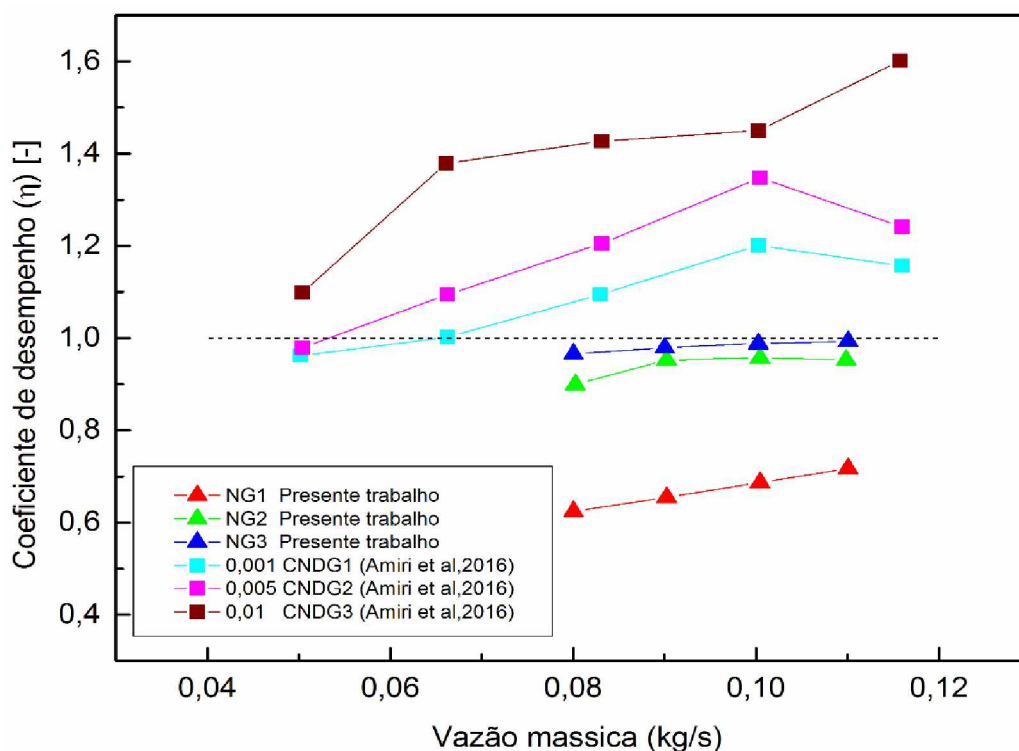


Figura 4.28 - Resultados experimentais obtidos por (AMIRI et al., 2016) para desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de grafeno.

No caso da condutividade térmica (SELVAM; LAL; HARISH, 2016) analisaram esta propriedade experimentalmente para nanopartículas de grafeno dispersas em água e etilenoglicol em diferentes concentrações. As porcentagens de aumento foram mais significativas para os nanofluidos que tinham etilenoglicol como fluido base. A Fig. 4.29 mostra os ganhos obtidos pelos autores para a condutividade térmica destacando o aumento em quase um 21%. No presente trabalho a tendência de aumento foi similar, porém com incrementos menores do nanofluido que tinha como fluido base H<sub>2</sub>O/EG.

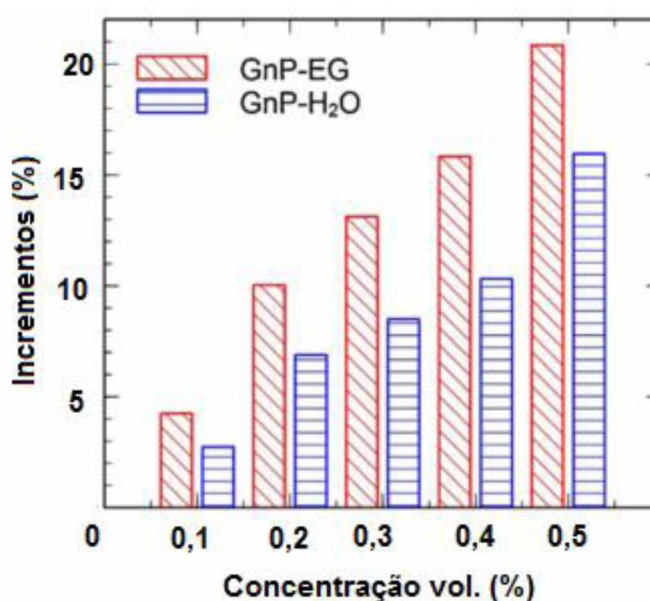


Figura 4.29 - Resultados experimentais obtidos por (SELVAM et al., 2016) para o aumento na condutividade térmica de nanofluidos de grafeno.

Com relação a sistemas de arrefecimento automotivo, (OLIVEIRA, 2016) avaliou a taxa de transferência de calor para nanofluidos de grafeno em três diferentes concentrações e uma mistura de H<sub>2</sub>O/EG (30% vol.), encontrando incrementos na transferência de calor em algumas condições de testes, especialmente em experimentos com temperatura de entrada 50 e 60°C. Por outro lado, nos experimentos com temperatura de entrada 70 e 80°C, o desempenho dos nanofluidos foi geralmente inferior ao fluido base. Nos ensaios realizados pelo autor, as concentrações são similares comparadas com o presente trabalho, porém, na faixa de 50-60°C os resultados foram contraditórios, mas para temperaturas maiores os resultados tornam-se concordantes influenciado pelo aumento da temperatura na condição de entrada no radiador.

Considerando potência de bombeamento, (TENG; YU, 2013) mediram a viscosidade de nanofluidos para três diferentes concentrações de nanotubos de carbono em uma H<sub>2</sub>O/EG (NC1, NC2 e NC3) e avaliaram a potência de bombeamento num radiador de motocicleta. Os resultados para viscosidade do autor mostrados na Fig. 4.30 mostraram uma tendência similar com os dados obtidos neste trabalho, aumentando a viscosidade com a concentração e diminuindo os ganhos na medida que a temperatura aumenta.

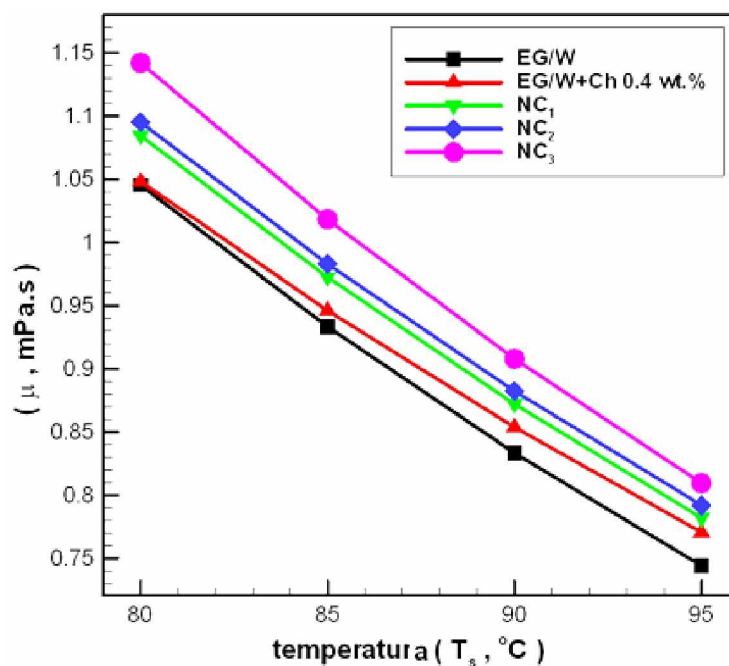


Figura 4.30 - Resultados experimentais obtidos por (TENG; YU, 2013) na medida de viscosidade dinâmica de nanofluidos de nanotubos de carbono.

Na Figura 4.31 ilustra os resultados da potência bombeamento em função da temperatura de entrada e a vazão volumétrica para o trabalho de (TENG et al., 2015). Os autores discutem o aumento do fator de atrito causado pela concentração de nanopartículas, assim para as menores vazões trabalhadas não existe uma tendência clara em função da temperatura, basicamente devido à menor concentração de partículas o efeito da viscosidade é insignificante. No caso comparando a tendência para a potência de bombeamento, em geral os incrementos foram significativos para condições de maior vazão e temperatura, produto da nanopartícula aglomerar e sedimentar.

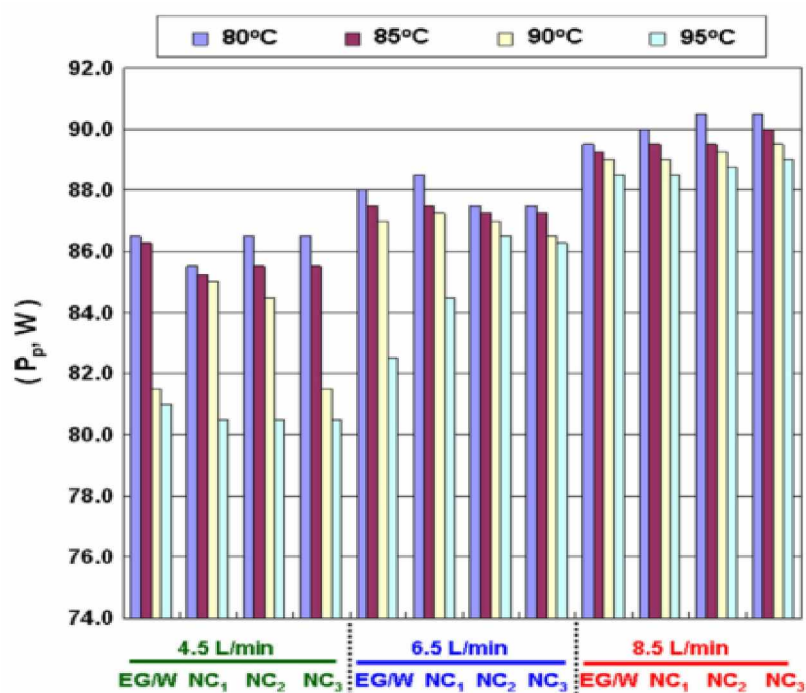


Figura 4.31 - Resultados experimentais obtidos por (TENG et al., 2015) na potência de bombeamento para nanofluidos de nanotubos de carbono.

## CAPITULO V

### CONCLUSÕES

Uma avaliação experimental foi realizada para estudar o efeito do nanofluido de grafeno com (H<sub>2</sub>O/EG 50% vol.) como fluido base no desempenho termo-hidráulico de um sistema de arrefecimento automotivo. Diferentes condições de teste foram mantidas para identificar quais parâmetros influenciam mais nas propriedades termofísicas e a transferência de calor dos nanofluidos preparados.

As principais conclusões de cada etapa do trabalho são relatadas a seguir:

*- Propriedades Termofísicas dos nanofluidos*

A condutividade térmica do fluido base foi aumentada significativamente com a adição de nanopartículas. Observou-se um aumento de 2,5% na condutividade térmica para  $\phi=0,01\%$ , 9,2% para a amostra de  $\phi=0,10\%$  à uma temperatura de 25 °C, destacando assim efeito intensificador das nanopartículas quando dispersadas no fluido base.

Referente à temperatura, a tendência foi discrepante com a maioria dos resultados da literatura apresentando um aumento de 6,7% para o fluido base e apenas de 2,5% para amostra  $\phi=0,10\%$  quando a temperatura foi mudada de 25 para 55 °C. Os maiores aumentos na condutividade térmica foram observados para a temperatura de 25 °C.

A densidade do nanofluido foi ligeiramente superior ao do fluido base apresentando um aumento diretamente proporcional com a temperatura para todas as amostras preparadas. Para o nanofluido com maior concentração de nanopartículas o incremento foi de 0,44% para 0,55% à medida que a temperatura variou de 25 para 85 °C.

Para viscosidade dinâmica dos nanofluidos, os valores obtidos foram superiores ao fluido base para todas as concentrações testadas. Com o aumento da temperatura a viscosidade relativa foi menor, além disso o comportamento foi crescente ao aumentar a concentração de nanopartículas com um incremento médio de 6,2% para a concentração

(0,01% vol.), de 13,2% para concentração intermediária (0,05% vol.), e para máxima concentração (0,1% vol.), foi de 13,5%.

Os modelos baseados nas teorias propostas utilizados para estimar a massa específica, a viscosidade dinâmica e a condutividade térmica apresentaram uma boa concordância com os resultados experimentais tanto para avaliação das propriedades do fluido base como para os nanofluidos.

#### *- Desempenho termo-hidráulico*

Mesmo com condutividade térmica continue sendo superior para os nanofluidos, houve redução na taxa de transferência de calor para todos os nanofluidos ensaiados. Observou-se uma tendência de aumento na taxa de transferência de calor com a concentração de nanopartículas e a influência da temperatura foi significativa até o ponto de que para a temperatura de 85 °C a amostra  $\phi=0,10\%$  apresentou comportamento próximo do fluido base. Os resultados determinaram o pior comportamento para amostra  $\phi=0,01\%$  com um decréscimo 14% para a maior temperatura de teste.

Uma análise da condutância térmica mostrou que mesmo aumentando a vazão de ar não houve melhora significativa em comparação com o fluido base, reforçando a ideia de que nas condições analisadas, os nanofluidos preparados não apresentam possíveis vantagens para ser substituídos pelo H<sub>2</sub>O/EG.

A potência de bombeamento calculada a partir da queda de pressão da bomba foi menor para as amostras de (0,01% e 0,05% vol.) e uma temperatura de 55°C, com decréscimos de em média 1,02 e 0,56% respectivamente. Por outro lado, a amostra  $\phi=0,10\%$  teve incrementos em todas a faixa de temperaturas e vazões mássicas medidas, evidenciado assim que para maiores concentrações o efeito da viscosidade sobre a potência de bombeamento torna-se significativo.

Observou-se que para os casos onde ocorreram decréscimos na potência de bombeamento o coeficiente de desempenho ainda foi menor que 1, isto devido ao fato que para os resultados obtidos para taxa de transferência de calor houve decréscimos mais significativos. Assim, de modo geral o desempenho termo-hidráulico de nanofluido foi insatisfatório para todas as concentrações mesmo com uma condutividade térmica aumentada e baixos incrementos na viscosidade dinâmica.

A degradação dos nanofluidos foi evidenciada após os testes, quando os nanofluidos foram submetidos a diversas condições de temperatura, a sedimentação foi extremamente acelerada. Em apenas 10 dias as nanopartículas de grafeno sedimentaram quase que completamente.

## SUGESTÕES E TRABALHOS FUTUROS

Considerando a etapa de produção, mesmo que a literatura mostre diferentes processos de síntese de nanofluidos, uma análise de estabilidade precisa ser realizada considerando o efeito do processo de dispersão, tipo e geometria da nanopartícula e o tipo de dispersante. Assim uma possível explicação para resultados experimentais contraditórios poderiam ser o resultado de não adotar uma técnica padronizada de trabalho.

Normalmente um sistema de arrefecimento automotivo opera em uma faixa de temperatura de 80 até 110 °C, com grandes probabilidades para o aumento na condutividade térmica enquanto a viscosidade diminui. No entanto, pode existir uma temperatura crítica de trabalho na qual dependendo das características do nanofluido poderia ocorrer uma degradação irreversível das propriedades termofísicas. Por isso, antes de qualquer ensaio em sistemas térmicos em altas temperaturas, sugere-se uma análise das propriedades do fluido base e as nanopartículas a serem utilizadas para preparação do nanofluido.

Um fator importante que influencia no desempenho dos fluidos de arrefecimento é o regime de escoamento, chegando a alterar inclusive suas propriedades térmicas e reológicas. Além disso, um estudo do impacto das nanopartículas no processo de corrosão do radiador precisar ser realizado para avaliar o fator de viabilidade da utilização de nanofluidos como fluido de arrefecimento.

Baseados nas sugestões anteriores propõem-se trabalhos para realizar futuramente em testes como trocadores de calor automotivos:

- Um procedimento mais sistemático para avaliar o comportamento dos nanofluidos, uma vez que, o processo de produção é baseado somente em informações descritas na literatura ou na experiências individuais das diferentes pesquisas realizadas do laboratório.
- Realizar os ensaios para trocadores de calor automotivo numa faixa mais abrangente de regime de escoamento, sendo possível avaliar os nanofluidos em um sistema arrefecimento automotivo real.
- Controle rigoroso para as condições ambientais como umidade relativa, temperatura ambiente e de bulbo úmido, devido à utilização de ar como fluido de trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, M.; BANIAMERIAN, Z. Analytical Simulation of Flow and Heat Transfer of Two-Phase Nanofluid ( Stratified Flow Regime ). v. 2014, 2014.

AHAMMED, N.; ASIRVATHAM, L. G.; WONGWISES, S. Effect of volume concentration and temperature on viscosity and surface tension of graphene-water nanofluid for heat transfer applications. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 123, n. 2, p. 1399–1409, 2016.

ALI, H. M. et al. Experimental investigation of convective heat transfer augmentation for car radiator using ZnO–water nanofluids. **Energy**, v. 84, p. 317–324, 2015.

ALI, M.; EL-LEATHY, A. M.; AL-SOFYANY, Z. The Effect of Nanofluid Concentration on the Cooling System of Vehicles Radiator. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 6, n. 0, p. 962510–962510, 2015.

AMIRI, A. et al. Synthesis of ethylene glycol-treated Graphene Nanoplatelets with one-pot, microwave-assisted functionalization for use as a high performance engine coolant. **Energy Conversion and Management**, v. 101, p. 767–777, 2015.

AMIRI, A. et al. Toward improved engine performance with crumpled nitrogen-doped graphene based water–ethylene glycol coolant. **Chemical Engineering Journal**, v. 289, p. 583–595, 2016.

ARZANI, H. K. et al. Experimental and numerical investigation of thermophysical properties, heat transfer and pressure drop of covalent and noncovalent functionalized graphene nanoplatelet-based water nanofluids in an annular heat exchanger. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 68, p. 267–275, 2015.

ASHRAE. **ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals**. [s.l: s.n.]. v. 53

ASHRAE STANDARD 33. **Method of Testing Forced Circulation Air Cooling and Air Heating Coils**. Atlanta, GA.: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 2000

ASHRAE STANDARD 41.2. **Standard Methods for Laboratory Air-Flow Measurement** American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, , 1987.

ASME PTC.30. **Air Cooled Heat Exchangers**. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1991.

AZMI, W. H. et al. Effects of working temperature on thermo-physical properties and forced convection heat transfer of TiO<sub>2</sub> nanofluids in water – Ethylene glycol mixture. **Applied Thermal Engineering**, v. 106, p. 1190–1199, 2016.

BASHIRNEZHAD, K. et al. A comprehensive review of last experimental studies on thermal conductivity of nanofluids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 122, n. 2, p. 863–884, 2015.

BATCHELOR, G. K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. **Journal of fluid mechanics**, v. 83, n. 1, p. 97–117, 1977.

BECK, M. P. et al. The thermal conductivity of alumina nanofluids in water, ethylene glycol, and ethylene glycol + water mixtures. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 12, n. 4, p. 1469–1477, 2010.

BLOSI, M. et al. Microwave-assisted polyol synthesis of Cu nanoparticles. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 13, n. 1, p. 127–138, 2011.

BRINKMAN, H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. **Journal of Chemical Physics**, v. 20, n. 4, p. 571–581, 1952.

BROWN, R. F. R. S. XXVII. A brief account of microscopical observations made in the months of June, July and August 1827, on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies. **Philosophical Magazine Series 2**, v. 4, n. 21, p. 161–173, 1828.

BRUGGEMAN, D. A. G. Dielectric constant and conductivity of mixtures of isotropic materials. **Ann Phys (Leipzig)**, v. 24, p. 636–679, 1935.

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

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

CHEN, L. C. Preparation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles by submerged arc nanoparticle synthesis system. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 495, n. 2, p. 476–480, 2010.

- CHOI, S. U. . et al. Nanofluids for Vehicle Thermal Management. **Sae Technical Paper Series**, n. 724, p. 01–1706, 2001.
- CHOI, S. U. S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **ASME FED 231**, 1995.
- DAS, S. K. et al. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids. **Journal of Heat Transfer**, v. 125, n. 4, p. 567–574, 17 jul. 2003.
- DAS, S. K. et al. **Nanofluids Science and Technology**. Hoboken, NJ (USA): John Wiley & Sons ISBN:978-0-470-07473-2, 2007.
- DELAVERI, V.; HASHEMABADI, S. H. CFD simulation of heat transfer enhancement of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ethylene glycol}$  nanofluids in a car radiator. **Applied Thermal Engineering**, v. 73, n. 1, p. 380–390, 2014.
- DEVENDIRAN, D. K.; AMIRTHAM, V. A. A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 21–40, 2016.
- DEVIREDDY, S.; MEKALA, C. S. R.; VEEREDHI, V. R. Improving the cooling performance of automobile radiator with ethylene glycol water based  $\text{TiO}_2$  nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 78, p. 121–126, 2016.
- DRZAZGA, M. et al. Influence of nonionic surfactant addition on drag reduction of water based nanofluid in a small diameter pipe. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 21, n. 1, p. 104–108, 2013.
- EASTMAN, J. A. et al. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. **Applied Physics Letters**, v. 78, n. 6, p. 718–720, 2001.
- EBRAHIMI, M. et al. Experimental investigation of force convection heat transfer in a car radiator filled with  $\text{SiO}_2$ -water nanofluid. **International Journal of Engineering, Transactions B: Applications**, v. 27, n. 2, p. 333–340, 2014.
- EINSTEIN, A. Eine neue Bestimmung der Molekul-dimensionen. **Ann. d. Phys.**, v. 19, p. 289–306, 1905.
- ELIAS, M. M. et al. Experimental investigation on the thermo-physical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles suspended in car radiator coolant. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 54, p. 48–53, 2014.
- ELSEBAY, M. et al. Numerical Resizing Study of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{CuO}$  Nanofluids in the Flat Tubes

of a Radiator. **Applied Mathematical Modelling**, 2016.

ESFAHANI, M. R.; LANGURI, E. M.; NUNNA, M. R. Effect of particle size and viscosity on thermal conductivity enhancement of graphene oxide nanofluid. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 76, p. 308–315, 2016.

FANG, X. et al. Increased thermal conductivity of eicosane-based composite phase change materials in the presence of graphene nanoplatelets. **Energy and Fuels**, v. 27, n. 7, p. 4041–4047, 2013.

FARAHMANDJOU, M. et al. Stability Investigation of Colloidal FePt Nanoparticle Systems by Spectrophotometer Analysis. **Chinese Physics Letters**, v. 26, n. 2, p. 27501, 2009.

FERROUILLAT, S. et al. Influence of nanoparticle shape factor on convective heat transfer and energetic performance of water-based SiO<sub>2</sub> and ZnO nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, v. 51, n. 1–2, p. 839–851, 2013.

GHADIMI, A.; SAIDUR, R.; METSELAAR, H. S. C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 17–18, p. 4051–4068, 2011.

GOHARSHADI, E. K. et al. Nanofluids for Heat Transfer Enhancement-A Review. 2013.

HAJIPOUR, M.; MOLAEI DEHKORDI, A. Mixed-convection flow of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid in a channel partially filled with porous metal foam: Experimental and numerical study. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 53, p. 49–56, 2014.

HAJJAR, Z.; RASHIDI, A. MORAD; GHOZATLOO, A. Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 57, p. 128–131, 2014.

HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. **I & EC Fundamentals**, v. 1, n. 3, p. 187–191, 1962.

HASSANI, S. et al. A new correlation for predicting the thermal conductivity of nanofluids; using dimensional analysis. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 90, p. 121–130, 2015.

HATAMI, M.; GANJI, D. D.; GORJI-BANDPY, M. CFD simulation and optimization of ICEs exhaust heat recovery using different coolants and fin dimensions in heat exchanger. **Neural Computing and Applications**, v. 25, n. 7–8, p. 2079–2090, 2014.

HEMMAT ESFE, M. et al. Efficiency of ferromagnetic nanoparticles suspended in ethylene glycol for applications in energy devices: Effects of particle size, temperature, and

concentration. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 58, p. 138–146, 2014.

HOSSEIN KARIMI DARVANJOOGHI, M.; NASR ESFAHANY, M. Experimental investigation of the effect of nanoparticle size on thermal conductivity of in-situ prepared silica–ethanol nanofluid. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 77, p. 148–154, 2016.

HUMINIC, A. et al. Thermal conductivity, viscosity and surface tension of nanofluids based on FeC nanoparticles. **Powder Technology**, v. 284, p. 78–84, 2015.

HUSSEIN, A. M. et al. Heat transfer enhancement using nanofluids in an automotive cooling system. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 53, p. 195–202, 2014a.

HUSSEIN, A. M. et al. Heat transfer augmentation of a car radiator using nanofluids. **Heat and Mass Transfer**, v. 50, n. 11, p. 1553–1561, 2014b.

IJAM, A.; SAIDUR, R. Nanofluid as a coolant for electronic devices (cooling of electronic devices). **Applied Thermal Engineering**, v. 32, n. 1, p. 76–82, 2012.

ISMAY, M. J. L.; DOROODCHI, E.; MOGHTEADERI, B. Effects of colloidal properties on sensible heat transfer in water-based titania nanofluids. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 91, n. 3, p. 426–436, 2013.

JANG, S. P.; CHOI, S. U. S. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. **Applied Physics Letters**, v. 84, n. 21, p. 4316–4318, 2004.

KARIMI-NAZARABAD, M.; GOHARSHADI, E. K.; YOUSSEFI, A. Particle shape effects on some of the transport properties of tungsten oxide nanofluids. **Journal of Molecular Liquids**, v. 223, p. 828–835, 2016.

KARTHIK, R. et al. Thermal conductivity of CuO-DI water nanofluids using 3- $\omega$  measurement technique in a suspended micro-wire. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 40, p. 1–9, 2012.

KEBLINSKI, P. et al. Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-Sized Particles ( Nano Fluids ). v. 45, n. April 2016, p. 855–863, 2002.

KUMAR, D. H. et al. Model for Heat Conduction in Nanofluids. **Phys. Rev. Lett.**, v. 93, n. 14, p. 144301, 2004.

LEAL, L. et al. An overview of heat transfer enhancement methods and new perspectives: Focus on active methods using electroactive materials. **International Journal of Heat and**

**Mass Transfer**, v. 61, n. 1, p. 505–524, 2013.

LEE, J. H.; LEE, S. H.; PIL JANG, S. Do temperature and nanoparticle size affect the thermal conductivity of alumina nanofluids? **Applied Physics Letters**, v. 104, n. 16, 2014.

LEONG, K. C.; YANG, C.; MURSHED, S. M. S. A model for the thermal conductivity of nanofluids - The effect of interfacial layer. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 8, n. 2, p. 245–254, 2006.

LEONG, K. Y. et al. Review on Performance of Automotive Radiator operated with Nanofluid based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 17–18, p. 2685–2692, 2010a.

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, 2010b.

LI, H. et al. Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, v. 88, p. 363–368, 2014.

LI, X.; ZOU, C. Thermo-physical properties of water and ethylene glycol mixture based SiC nanofluids : An experimental investigation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 101, p. 412–417, 2016.

LINSEIS THERMAL ANALYSIS. **THB - Transient Hot Bridge**. Disponível em: <<https://www.linseis.com/en/our-products/thermal-diffusivity-thermal-conductivity/thb-transient-hot-bridge/>>. Acesso em: 4 nov. 2016.

M'HAMED, B. et al. Experimental study on thermal performance of MWCNT nanocoolant in Perodua Kelisa 1000cc radiator system. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 76, p. 156–161, 2016.

MAHBUBUL, I. M.; SAIDUR, R.; AMALINA, M. A. Latest developments on the viscosity of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 4, p. 874–885, 2012.

MASOUMI, N.; SOHRABI, N.; BEHZADMEHR, A. A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 42, n. 5, p. 55501, 2009.

MAXWELL, J. C. A treatise on electricity and magnetism, **Oxford: Clarendon Press**, 1873.

MEHRALI, M. et al. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets. **Nanoscale research letters**, v. 9, n. 1, p. 15, 2014.

MEYBODI, M. K. et al. A novel correlation approach for viscosity prediction of water based

nanofluids of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{CuO}$ . **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 58, p. 19–27, 2016.

MOHAMAD, A. A. Myth about nano-fluid heat transfer enhancement. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 86, p. 397–403, 2015.

MOOSAVI, M.; GOHARSHADI, E. K.; YOUSSEFI, A. Fabrication, characterization, and measurement of some physicochemical properties of  $\text{ZnO}$  nanofluids. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 31, n. 4, p. 599–605, 2010.

NAN, C. W.; SHI, Z.; LIN, Y. A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites. **Chemical Physics Letters**, v. 375, n. 5–6, p. 666–669, 2003a.

NAN, C. W.; SHI, Z.; LIN, Y. A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites. **Chemical Physics Letters**, v. 375, n. 5–6, p. 666–669, 2003b.

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

NGUYEN, C. T. et al. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids - Hysteresis phenomenon. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 28, n. 6, p. 1492–1506, 2007.

NIKKAM, N. et al. Experimental investigation on thermo-physical properties of copper/diethylene glycol nanofluids fabricated via microwave-assisted route. **Applied Thermal Engineering**, v. 65, n. 1–2, p. 158–165, 2014.

NOVOSELOV, K. S. et al. Two-dimensional atomic crystals. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 102, n. 30, p. 10451–10453, 2005.

OLIVEIRA, G. A. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE NANOFLUIDOS EM RADIADORES AUTOMOTIVOS**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

OLIVEIRA, G. A.; BANDARRA, E.; WEN, D. Synthesis and Characterization of Silver / Water. v. 43, p. 69–83, 2012.

OLIVEIRA, G. A.; CARDENAS C., E. M.; BANDARRA F., E. P. Experimental study on the heat transfer of MWCNT/water nanofluid flowing in a car radiator. **Applied Thermal Engineering**, 2016.

PAK, B. C.; CHO, Y. I. Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids With Submicron Metallic Oxide Particles. **Experimental Heat Transfer**, v. 11, n. 2, p. 151–170,

1998.

PANG, C. et al. Heat conduction mechanism in nanofluids. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 28, n. 7, p. 2925–2936, 2014.

PEYGHAMBARZADEH, S. M. et al. Improving the cooling performance of automobile radiator with  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /water nanofluid. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 10, p. 1833–1838, 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.

SADEGHINEZHAD, E. et al. A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications. **Energy Conversion and Management**, v. 111, p. 466–487, 2016.

SAMIRA, P. et al. Pressure drop and thermal performance of  $\text{CuO}$ /ethylene glycol (60%)-water (40%) nanofluid in car radiator. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 32, n. 4, p. 609–616, 2014.

SARAFRAZ, M. M.; HORMOZI, F. Heat transfer, pressure drop and fouling studies of multi-walled carbon nanotube nano-fluids inside a plate heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 72, p. 1–11, 2016.

SELVAM, C.; LAL, D. M.; HARISH, S. Thermal conductivity enhancement of ethylene glycol and water with graphene nanoplatelets. **Thermochimica Acta**, v. 642, p. 32–38, 2016.

SHANBEDI, M.; ZEINALI HERIS, S.; MASKOOKI, A. Experimental investigation of stability and thermophysical properties of carbon nanotubes suspension in the presence of different surfactants. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 120, n. 2, p. 1193–1201, 2015.

SHIMA, P. D.; PHILIP, J.; RAJ, B. Role of microconvection induced by Brownian motion of nanoparticles in the enhanced thermal conductivity of stable nanofluids. **Applied Physics Letters**, v. 94, n. 22, 2009.

SHRIKHANDE, N. S.; KRIPLANI, V. M. Heat Transfer Enhancement in Automobile Radiator using Nanofluids: A Review. v. 3, n. 3, p. 174–177, 2014.

SINGH, K. To Study the Performance of Nano-Refrigerant ( $\text{R134a}+\text{Al}_2\text{O}_3$ ) Based Refrigeration System. Patiala, India: Thapar University, 2014.

SOLTANIMEHR, M.; AFRAND, M. Thermal conductivity enhancement of  $\text{COOH}$ -functionalized MWCNTs/ethylene glycol–water nanofluid for application in heating and cooling systems. **Applied Thermal Engineering**, 2016.

SONAGE, B. K.; MOHANAN, P. Miniaturization of automobile radiator by using zinc-water and zinc oxide-water nanofluids. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 29, n. 5, p. 2177–2185, 2015.

SRINIVAS, V. et al. Nanofluids with CNTs for automotive applications. **Heat and Mass Transfer**, 2015.

SUGANTHI, K. S.; RAJAN, K. S. Temperature induced changes in ZnO-water nanofluid: Zeta potential, size distribution and viscosity profiles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 25–26, p. 7969–7980, 2012.

SUNDAR, L. S. et al. Experimental thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based low volume concentration of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{CuO}$  nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 41, p. 41–46, 2013.

SUNDAR, L. S.; SINGH, M. K.; SOUSA, A. C. M. Thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 49, p. 17–24, 2013.

SYAM SUNDAR, L. et al. Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluids for heat transfer applications: An experimental study. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 56, p. 86–95, 2014.

SYAM SUNDAR, L.; SINGH, M. K. Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 23–35, 2013.

TAYLOR, B. N.; KUYATT, C. E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. **NIST Technical Note**, v. 1297, p. 20, 1994.

TENG, T. P. et al. Performance assessment of an air-cooled heat exchanger for multiwalled carbon nanotubes-water nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, v. 89, p. 346–355, 2015.

TENG, T. P.; YU, C. C. Heat dissipation performance of MWCNTs nano-coolant for vehicle. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 49, p. 22–30, 2013.

TIWARI, A. K.; GHOSH, P.; SARKAR, J. Particle concentration levels of various nanofluids in plate heat exchanger for best performance. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 89, p. 1110–1118, 2015.

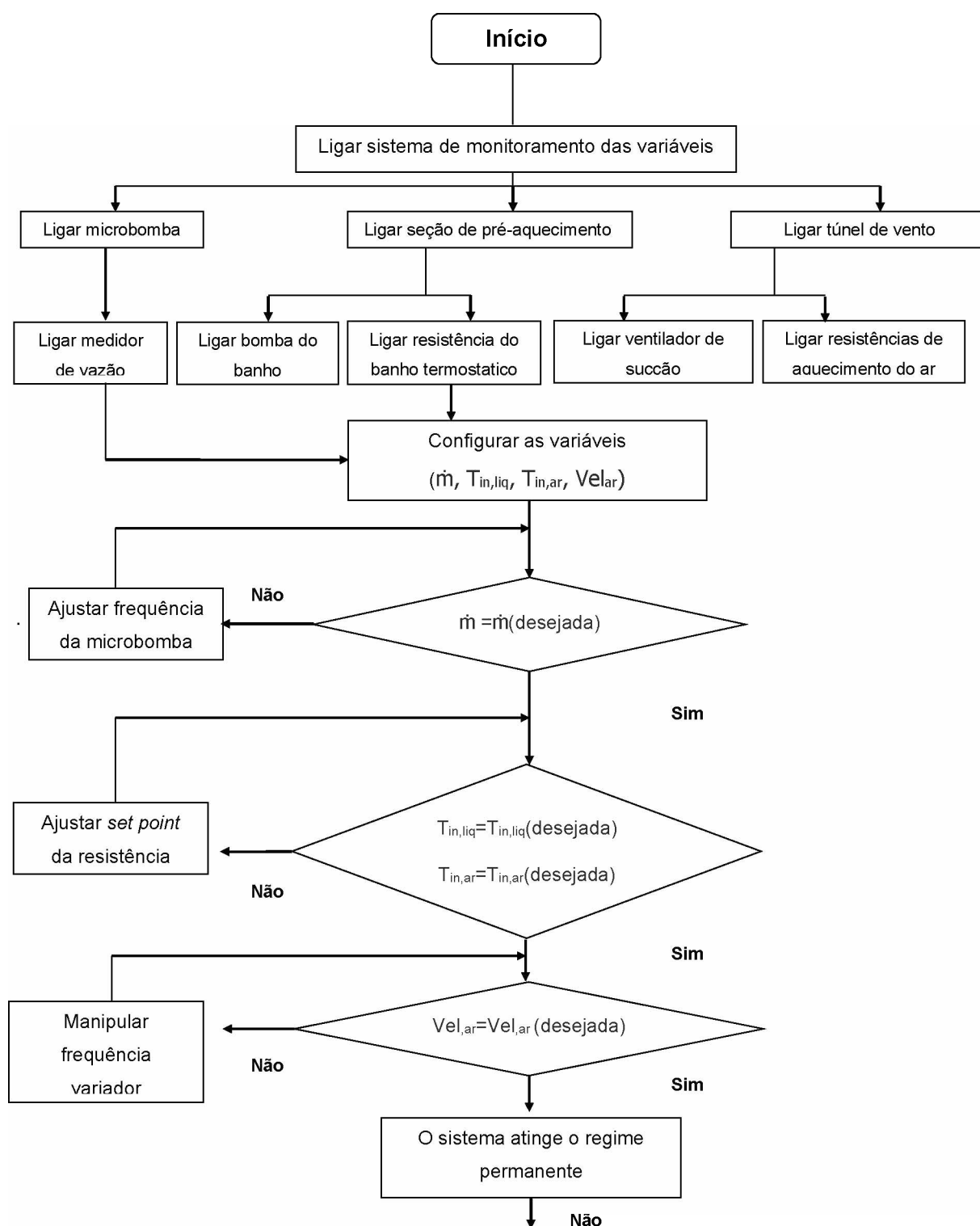
TODA, K.; FURUSE, H. Extension of Einstein's viscosity equation to that for concentrated dispersions of solutes and particles. **Journal of bioscience and bioengineering**, v. 102, n. 6, p. 524–528, 2006.

- TSO, C. Y.; FU, S. C.; CHAO, C. Y. H. A semi-Analytical model for the thermal conductivity of nanofluids and determination of the nanolayer thickness. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 70, p. 202–214, 2014.
- USRI, N. A. et al. Thermal Conductivity Enhancement of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Nanofluid in Ethylene Glycol and Water Mixture. [s.l.] **Elsevier B.V.**, 2015. v. 79
- WANG, X.-J.; LI, X.-F. Influence of pH on Nanofluids' Viscosity and Thermal Conductivity. **Chinese Physics Letters**, v. 26, n. 5, p. 1–4, 2009.
- 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.
- WARRIER, P.; TEJA, A. Effect of particle size on the thermal conductivity of nanofluids containing metallic nanoparticles. **Nanoscale research letters**, v. 6, n. 1, p. 247, 2011.
- WEN, D. et al. Review of nanofluids for heat transfer applications. **Particuology**, v. 7, n. 2, p. 141–150, 2009.
- WILLIAMS, W.; BUONGIORNO, J.; HU, L.-W. Experimental Investigation of Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Loss of Alumina/Water and Zirconia/Water Nanoparticle Colloids (Nanofluids) in Horizontal Tubes. **Journal of Heat Transfer**, v. 130, n. 4, p. 42412, 2008.
- XIA, G. et al. Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /deionized water nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 84, p. 118–124, 2014.
- XIE, H.; FUJII, M.; ZHANG, X. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, n. 14, p. 2926–2932, 2005.
- XING, M.; YU, J.; WANG, R. Experimental study on the thermal conductivity enhancement of water based nanofluids using different types of carbon nanotubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 88, p. 609–616, 2015.
- XUAN, Y.; ROETZEL, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 43, n. 19, p. 3701–3707, 2000.
- YANG, L. et al. Viscosity-prediction models of ammonia water nanofluids based on various dispersion types. **Powder Technology**, v. 215–216, p. 210–218, 2012.
- YU, W.; CHOI, S. U. S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 5, p. 167–171, 2003.

ZHU, H. T.; LIN, Y. S.; YIN, Y. S. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 277, n. 1, p. 100–103, 2004.

## ANEXO 1

### OPERAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL



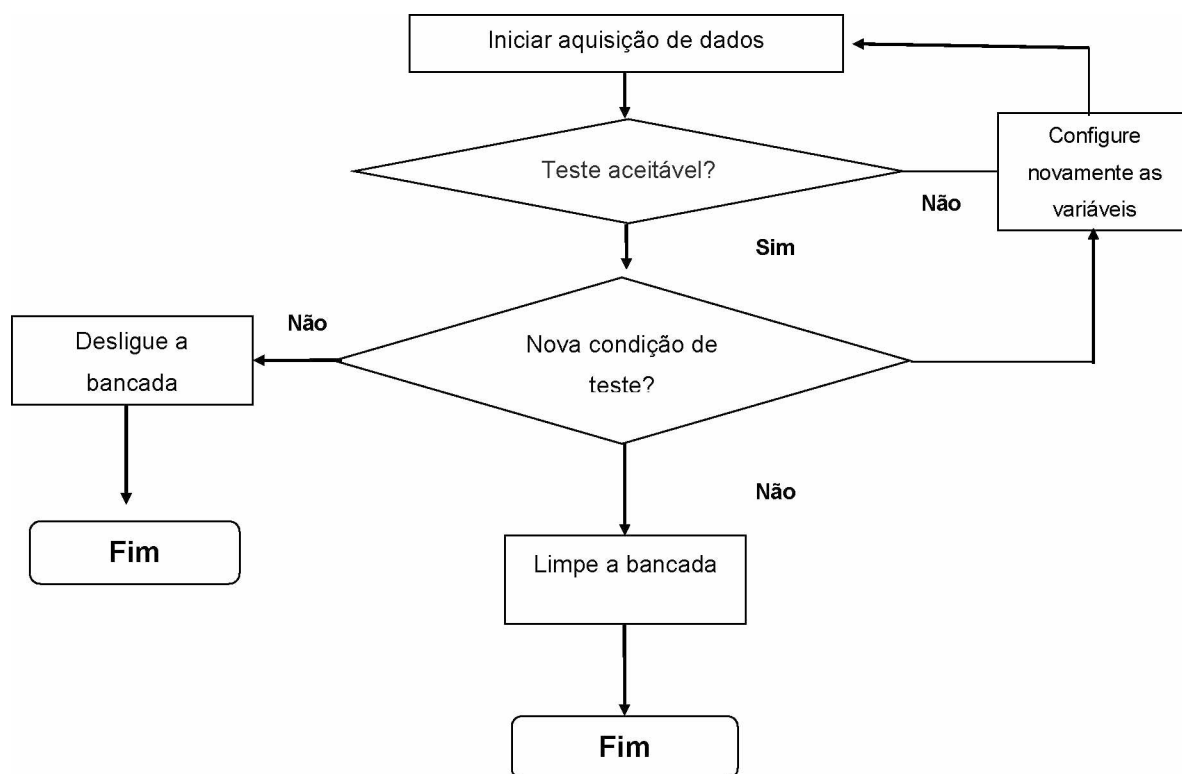


Figura A1. 1 - Diagrama operação da bancada experimental

## ANEXO II

### Calibração sensores (termopares tipo T)

O anexo mostra as curvas de calibração dos sensores 24 termopares tipo T utilizados na medição de temperatura. Através do software LABVIEW, criou-se um algoritmo com funções integradas para calcular o valor da grandeza, no caso a temperatura, em função do sinal analógico de entrada. Desta forma, a calibração consistiu em uma correção dos valores avaliados pelo programa, visto que paralelo com o sensor estava um termômetro padrão no mesmo banho térmico durante a calibração. As curvas de calibração estão apresentadas nas Figs. A1.1 a A1.12.

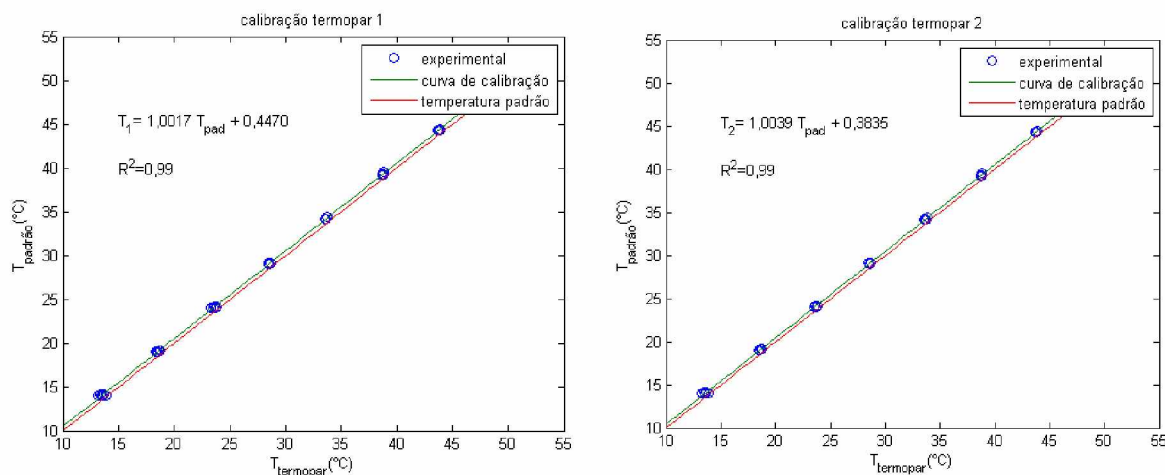


Figura A2.1 - Curva calibração termopares 1 e 2.

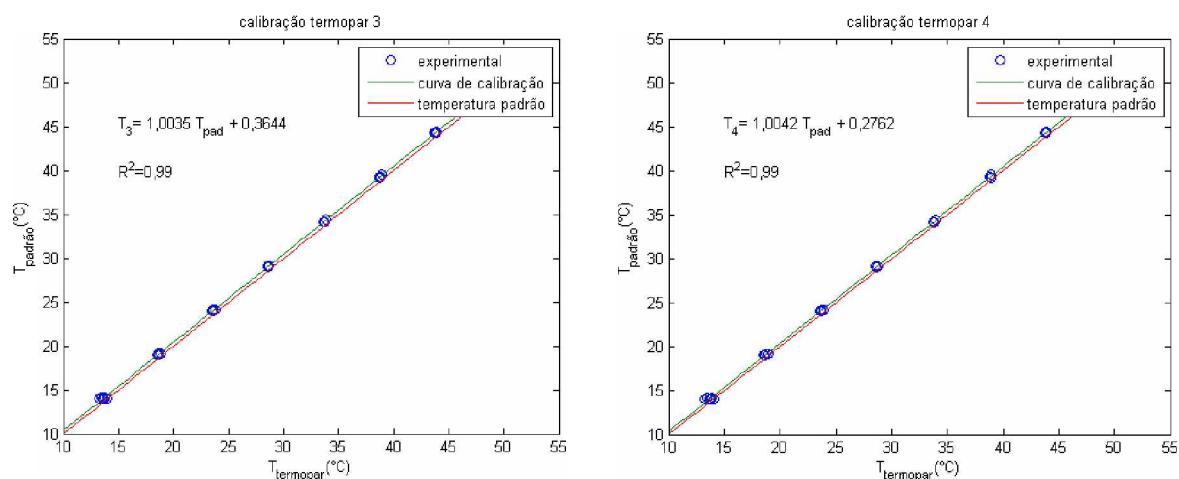


Figura A2. 2 - Curva calibração termopares 3 e 4.

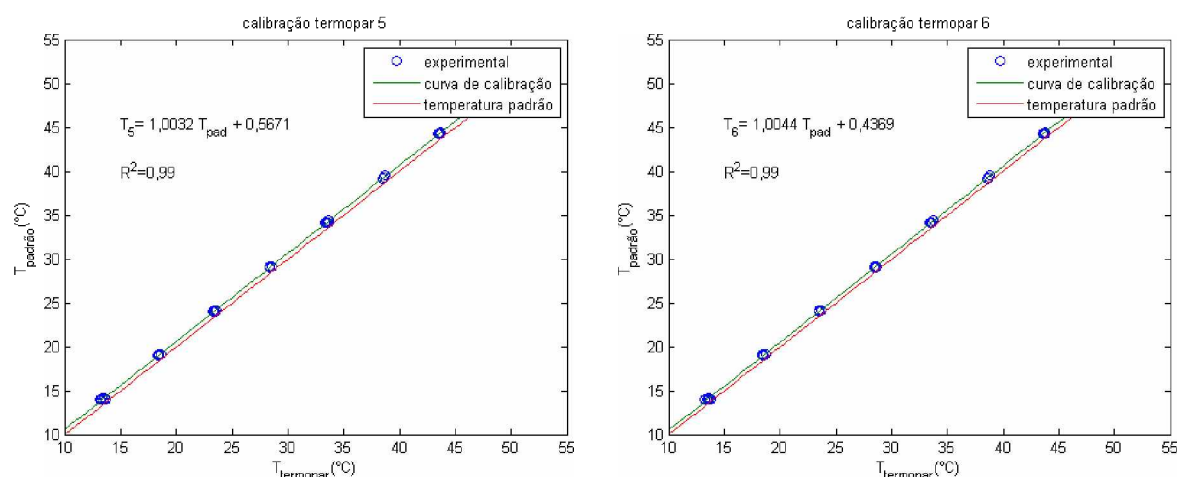


Figura A2. 3 - Curva calibração termopares 5 e 6.

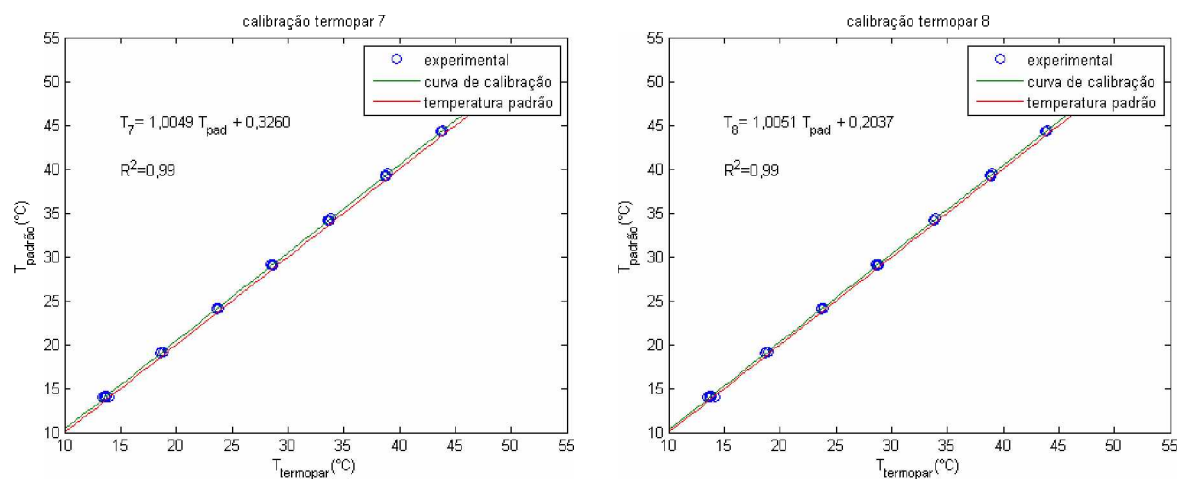


Figura A2. 4- Curva calibração termopares 7 e 8.

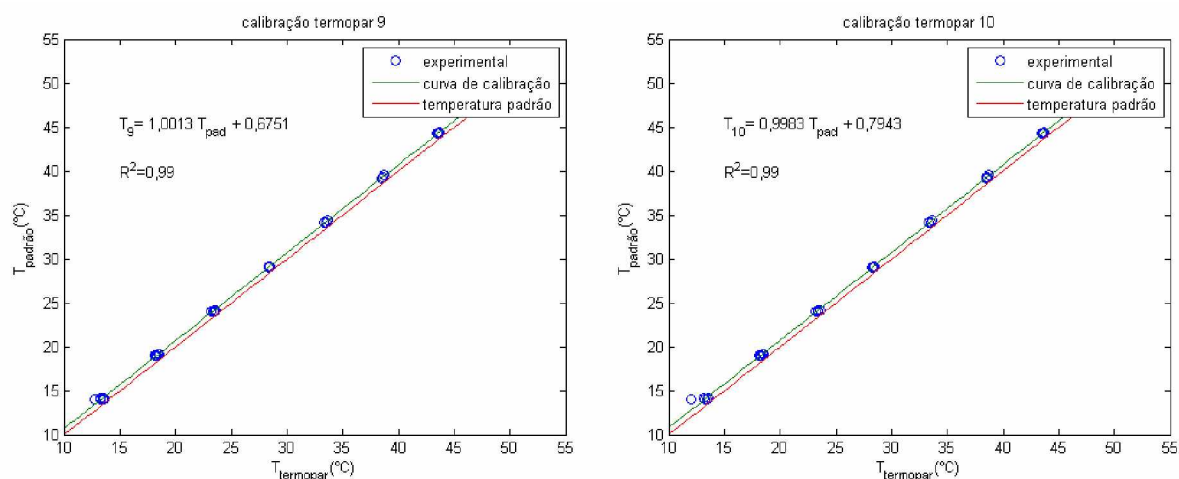


Figura A2. 5 - Curva calibração termopares 9 e 10.

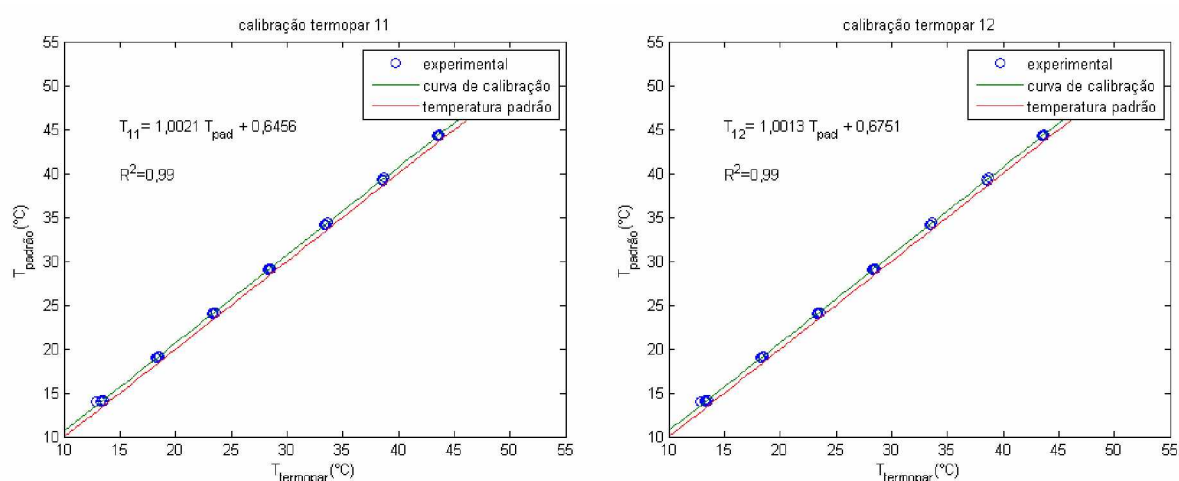


Figura A2. 6 - Curva calibração termopares 11 e 12.

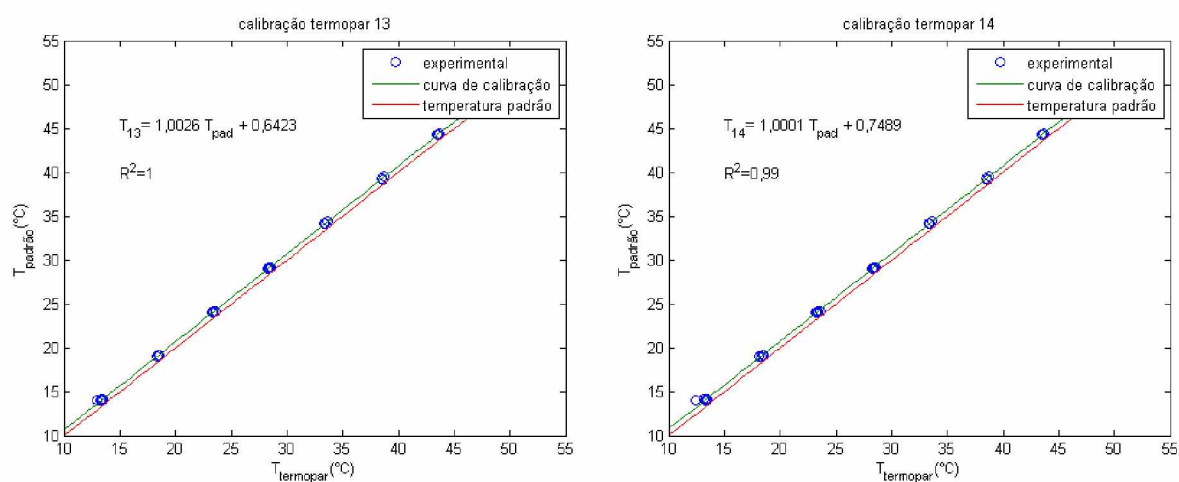


Figura A2. 7 - Curva calibração termopares 13 e 14.

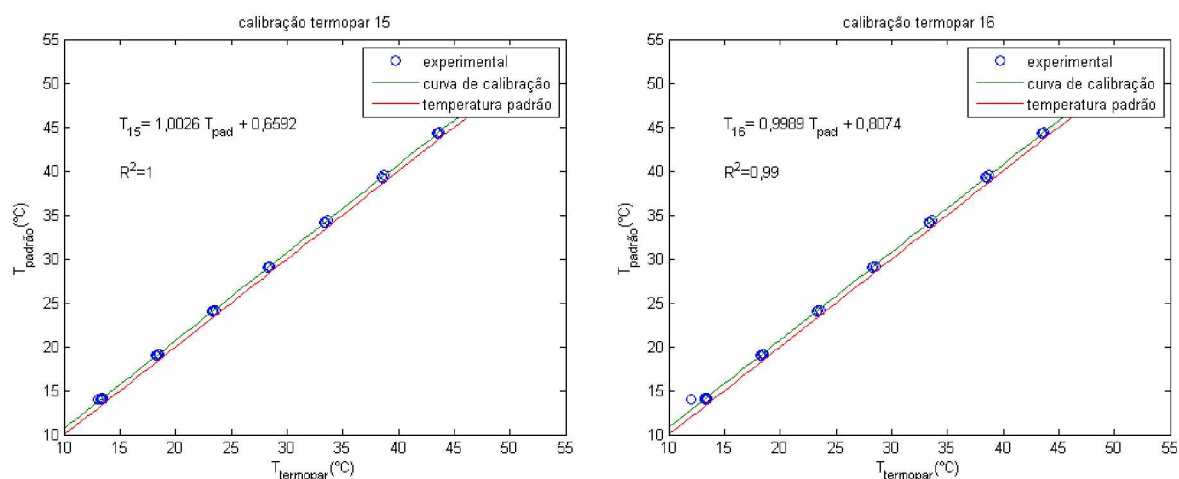


Figura A2. 8 - Curva calibração termopares 15 e 16.

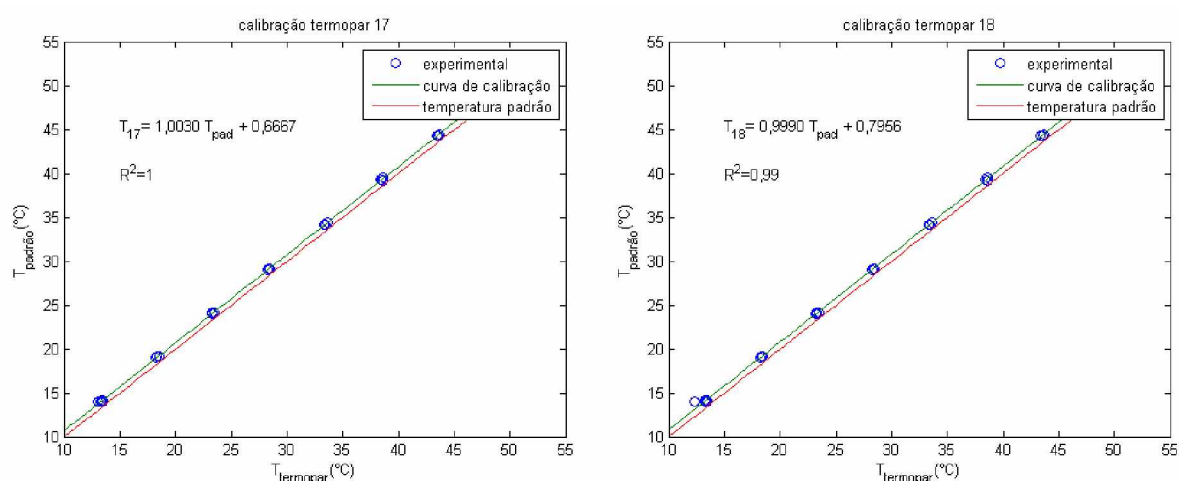


Figura A2. 9 - Curva calibração termopares 17 e 18.

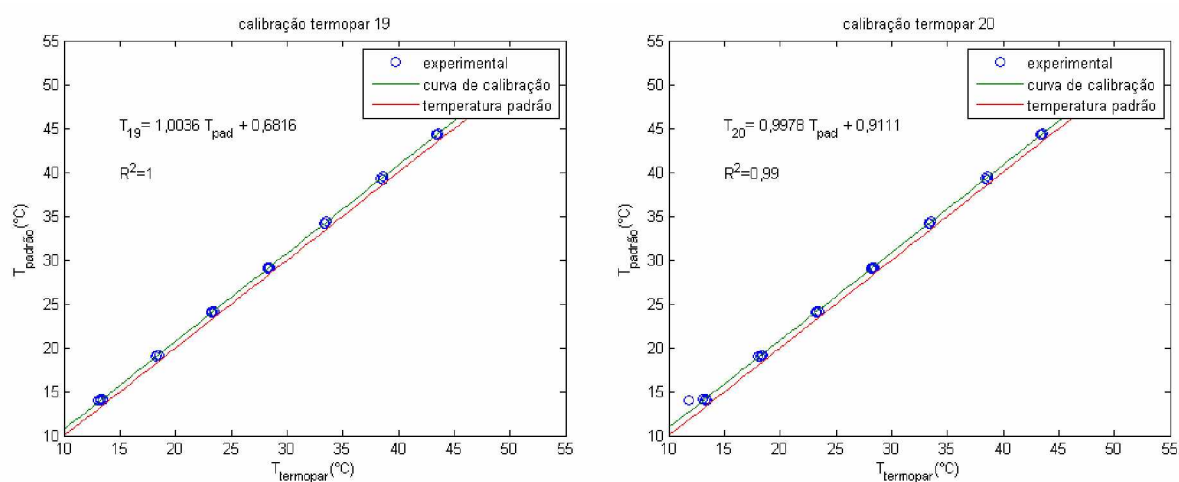


Figura A2. 10 - Curva calibração termopares 19 e 20.

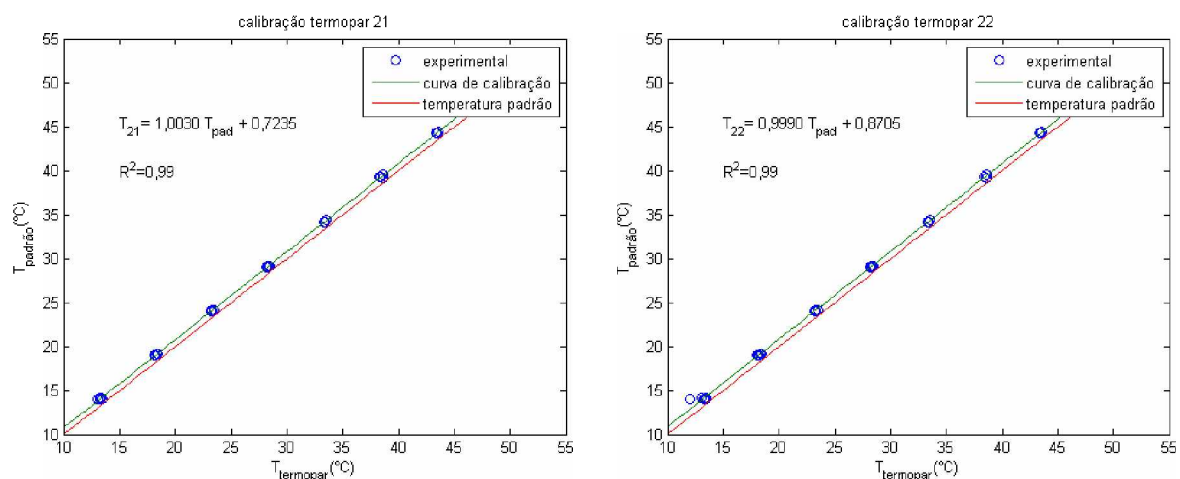


Figura A2. 11 - Curva calibração termopares 21 e 22.

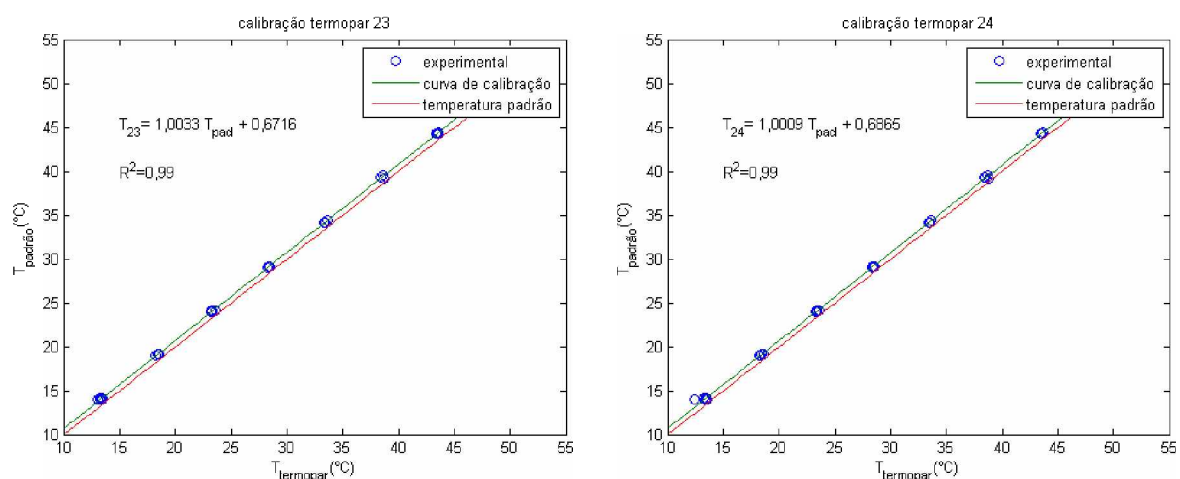


Figura A2. 12 - Curva calibração termopares 23 e 24.

ANEXO III

Interface De Monitoramento E Controle Da Bancada Experimental

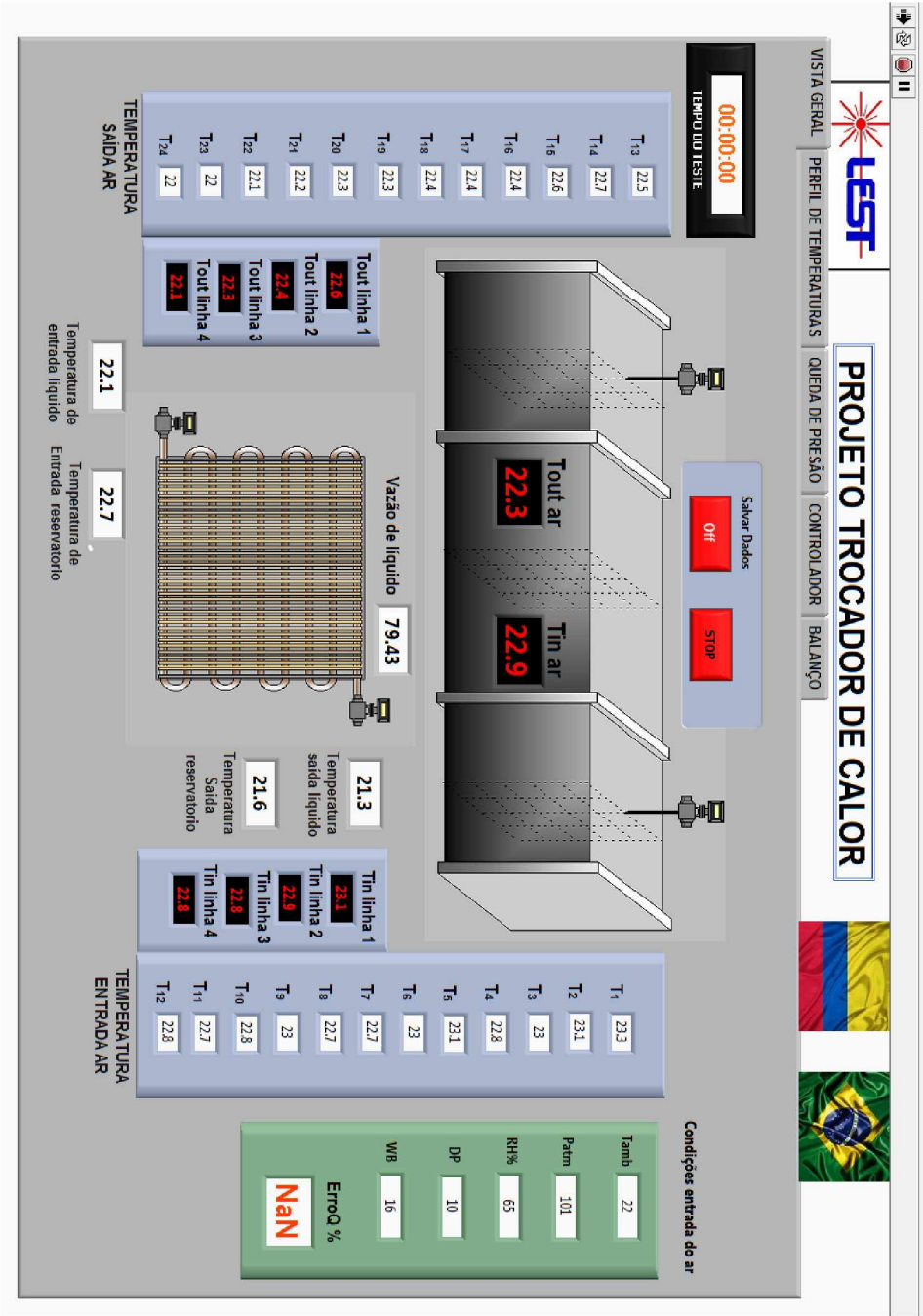


Figura A3. 1 - Interface gráfica Software LabVIEW para monitoramento e controle de dados.