

EDWIN MARTIN CARDENAS CONTRERAS

**DESEMPENHO TERMO-HIDRÁULICO DE UM
RADIADOR AUTOMOTIVO OPERANDO COM
NANOFLUIDOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2024

EDWIN MARTIN CARDENAS CONTRERAS

**DESEMPENHO TERMO-HIDRÁULICO DE UM RADIADOR
AUTOMOTIVO OPERANDO COM NANOFLUIDOS**

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

Área de Concentração: Transferência de calor e Mecânica dos fluidos

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

UBERLÂNDIA - MG

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C764
2024

Contreras, Edwin Martin Cardenas, 1989-
Desempenho termo-hidráulico de um radiador automotivo
operando com nanofluidos [recurso eletrônico] / Edwin
Martin Cardenas Contreras. - 2024.

Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.361>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Bandarra Filho, Enio Pedone
,1970-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, nº 379, PPGEM				
Data:	29/05/2024	Hora de início:	14:30h	Hora de encerramento:	16:40h
Matrícula do Discente:	12223EMC001				
Nome do Discente:	Edwin Martin Cardenas Contreras				
Título do Trabalho:	Desempenho termo-hidráulico de um radiador automotivo operando com nanofluidos				
Área de concentração:	Transferência de calor e Mecânica dos fluidos				
Linha de pesquisa:	Geração e Conservação de Energia				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, composta pelos professores doutores: Enio Pedone Bandarra Filho - UFU, orientador do candidato; Solidônio Rodrigues de Carvalho - UFU; João Marcelo Vedovotto - UFU; Luben Cabezas Gómez - USP e Paulo Smith Schneider - UFRGS.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

APROVADO

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Enio Pedone Bandarra Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/05/2024, às 16:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luben Cabezas Gómez, Usuário Externo**, em 29/05/2024, às 16:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Solidonio Rodrigues de Carvalho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/05/2024, às 16:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Smith Schneider, Usuário Externo**, em 29/05/2024, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Marcelo Vedovotto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/05/2024, às 09:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5438775** e o código CRC **0AB293EF**.

DEDICATÓRIA

*A Deus pela dádiva preciosa da vida e as
bênçãos recebidas a cada novo dia.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais Luís Martin e Hermínia, cujo apoio e incentivo constante foram fundamentais para minha jornada. Eles não apenas me apoiaram, mas também se tornaram um inspirador exemplo de dedicação e perseverança.

A minha companheira, Rejjane, e nosso filho Henrique Luiz. Eles foram a minha luz nos momentos difíceis e a força motriz para superar todos os desafios que surgiram neste árduo caminho.

A meu orientador o Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho pelo exemplo de trabalho árduo, demonstrando uma notável disponibilidade e paciência ao orientar minha pesquisa.

Ao Prof. Luben Cabezas Gómez, pela orientação e acompanhamento no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia da FEMEC-UFU: Abdul, Elena, David, Guilherme, Frank, Daniel por toda assistência técnica e acadêmica. Além disso, gostaria de expressar minha gratidão por compartilharmos não apenas momentos de trabalho, mas também grandes jornadas de conversa e momentos de descontração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Da mesma forma, às entidades de fomento e apoio à pesquisa, CAPES e a FAPEMIG.

À empresa Fiat Chrysler Automobiles pelo apoio financeiro e fornecer o radiador utilizado.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Coordenação e especialmente ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica.

CONTRERAS, E.M.C. **Desempenho termo-hidráulico de um radiador automotivo operando com nanofluidos**. 2024. 152p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

Resumo

A presente pesquisa trata de uma investigação experimental do desempenho termo-hidráulico de um radiador automotivo operando com nanofluidos em elevadas temperaturas, de 80 °C até 105 °C, utilizando uma mistura de água e etilenoglicol (50% em volume), como fluido base. Produziu-se os nanofluidos dispersando nanopartículas de nanotubos de carbono (concentrações volumétricas de 0,025%; 0,05% e 0,1%) e de prata (concentrações volumétricas de 0,001%; 0,002% e 0,003%) aplicando-se o método de dois passos, envolvendo ultrasonicação e homogeneização sob alta pressão. Inicialmente, avaliou-se a estabilidade dos nanofluidos pelo método de espectrofotometria UV-vis e foram mensuradas suas propriedades termofísicas (condutividade térmica, viscosidade e massa específica). Posteriormente, os nanofluidos foram ensaiados como líquido de arrefecimento em um radiador instalado em um túnel de vento, instrumentado para avaliar o desempenho termo-hidráulico. Investigaram-se os fatores que influenciam a transferência de calor e a queda de pressão, incluindo concentração de nanopartículas, vazão mássica e a temperatura. A abordagem computacional para simular o radiador foi desenvolvida no software *Engineering Equation Solver* (EES). Os resultados mostraram que a condutividade térmica dos nanofluidos tem um incremento de até 6,4%. Para a viscosidade e massa específica os incrementos máximos observados foram de 11% e 0,23%, respectivamente. Os modelos propostos para o cálculo da condutividade térmica (com desvio máximo 1,5%) e viscosidade (com desvio máximo 3%) apresentaram boa concordância em relação aos resultados experimentais. Nos ensaios de bancada, os nanofluidos exibiram taxa de transferência de calor ligeiramente aumentada, com valor máximo de 3,7%, em comparação ao fluido base. Observou-se também um incremento máximo na potência de bombeamento de 3,6%. Comparou-se então os resultados da transferência de calor com os valores obtidos a partir dos modelos de correlação para nanofluidos, obtendo-se um desvio médio de 4,1%. Em geral, os nanofluidos de prata não apresentaram potencial para substituir o líquido de arrefecimento automotivo. Por outro lado, a amostra de nanofluido MWCNT2 com nanotubos de carbono demonstrou ser promissora, exibindo um coeficiente de desempenho termo-hidráulico de 1,015.

Palavras chave: *Nanofluidos, desempenho termo-hidráulico, nanotubos de carbono, prata, radiador automotivo.*

CONTRERAS, E.M.C., **Thermohydraulic performance in a car radiator operating with nanofluids**. 2024. 152p. PhD Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2024.

Abstract

This study focuses on experimentally investigating the thermal-hydraulic performance of an automotive radiator operating with nanofluids at high temperatures, from 80 °C to 105 °C, from a binary mixture of water and ethylene glycol (50% by volume), served as the base fluid. Nanofluids were prepared by dispersing multi-walled carbon nanotubes (with volumetric concentrations of 0.025%, 0.05%, and 0.1%) and silver (with volumetric concentrations of 0.001%, 0.002%, and 0.003%) nanoparticles using a two-step method involving ultrasonication and high-pressure homogenization. As a first step, the stability of the nanofluid samples was assessed using the UV-vis spectrophotometry method, followed by an experimental measurement of their thermophysical properties, including thermal conductivity, viscosity, and specific mass. Subsequently, the nanofluids were employed as a substitute for coolant fluids in a car radiator installed in a wind tunnel instrumented to evaluate thermo-hydraulic performance. Key factors affecting heat transfer and pressure drop, such as nanoparticle concentration, mass flow rate, and temperature, were thoroughly investigated. The computational approach was developed in the Engineering Equation Solver (EES) software to simulate the radiator. The results show that the thermal conductivity of the nanofluids increased by up to 6.4%. The maximum increases observed in viscosity and specific mass were 11% and 0.23%, respectively. The models proposed for estimating thermal conductivity (maximum deviation 1.5%) and viscosity (maximum deviation 3%) were found to be suitable, exhibiting good agreement with experimental results. For the tests on the experimental bench, the nanofluids demonstrated a slightly enhanced heat transfer rate, with a maximum value of 3.7% compared to the base fluid. However, this improvement was accompanied by an increase in pumping power of 3.6%, moderately impacting the thermal-hydraulic performance coefficient. Furthermore, laminar heat transfer outcomes were compared with the values obtained from the correlation models for nanofluids, obtaining an average deviation of 4.1%. In general, silver nanofluids did not show the potential to substitute coolant for car radiators. On the other hand, the MWCNT2 nanofluid sample with carbon nanotube proved to be promising, exhibiting a thermal-hydraulic coefficient of performance of 1.015.

Keywords: *Nanofluids, thermohydraulic performance, carbon nanotubes, silver, car radiator.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estatísticas da base de dados Elsevier (2013-2023). Fonte: Autor.	8
Figura 2.2 - Método de dois passos para preparação dos nanofluidos. Fonte: Autor.	12
Figura 2.3 - Representação esquemática dos mecanismos de estabilização (a) eletrostática, (b) estérica. Fonte: (Chakraborty e Panigrahi, 2020).	14
Figura 2.4 - Representação do processo de rompimento dos aglomerados utilizando o sonicador de sonda. Fonte: Adaptado de (Choi, 2015).	17
Figura 2.5 - Imagem MET das nanopartículas de TiO ₂ . Fonte: (Chakraborty <i>et al.</i> 2017). ...	21
Figura 2.6 - Técnicas de medição de condutividade térmica para nanofluidos. Fonte: Autor.	26
Figura 2.7 - Estatísticas dos portais “ <i>Web of Science</i> ” e “ <i>Scopus</i> ” (2010-2023). Fonte: Autor.	39
Figura 2.8 - Mapa de nanopartículas utilizadas para a produção de nanofluidos aplicados em radiadores automotivos. Fonte: Autor.	45
Figura 3.1 - Processo de produção de nanofluidos. Fonte Autor.	47
Figura 3.2 - Método de homogeneização por alta pressão. Fonte: Autor.	48
Figura 3.3 - Amostras de nanofluido 1h após a preparação. (a) Ag/PVP, (b) MWCNT. Fonte: Autor.	50
Figura 3.4 - Imagens MET das nanopartículas. (a) Ag/PVP, (b) MWCNT. Fonte: Autor.	51
Figura 3.5 - Distribuição do tamanho das nanopartículas utilizadas. Fonte: Autor.	52
Figura 3.6 - a) Espectrofotômetro UV-Vis 19000. b) Desenho esquemático de medição de absorvância. Fonte: Autor.	53

Figura 3.7 - Montagem experimental para medição da condutividade térmica. Fonte: (Oliveira <i>et al.</i> , 2021).....	55
Figura 3.8 - Viscosímetro rotacional da Anton Paar SVM-3000. Fonte: Autor.	57
Figura 3.9 - Célula de medição da viscosidade. Fonte: Autor.	57
Figura 3.10 - Diagrama esquemático da bancada experimental. Fonte: Autor.	59
Figura 3.11 - Diagrama esquemático do circuito do líquido de arrefecimento. Fonte : (Cardenas Contreras, 2017).....	60
Figura 3.12 - Montagem experimental do circuito do líquido de arrefecimento.	61
Figura 3.13 - (a) Vista ventilador e seção de descarga, (b) Inversor de frequência para controle da velocidade. Fonte: Autor.....	62
Figura 3.14 - Posicionamento da malha de termopares no duto principal do túnel de vento. Fonte: Autor.....	63
Figura 3.15 - Radiador automotivo instalado no túnel de vento. Fonte: Autor.	64
Figura 3.16 - Interface homem-máquina para aquisição dos dados. Fonte: Autor.....	65
Figura 3.17 - Montagem do chassi NIcDAQ-9178XT CompactDAQ e módulos para aquisição de dados. Fonte: Autor.	65
Figura 3.18 - Montagem completa da bancada experimental. Fonte: Autor.....	66
Figura 3.19 - Volume de controle para o balanço de energia na seção de testes. Fonte: Adaptado de (Cardenas Contreras, 2017).....	68
Figura 3.20 - Resultados experimentais para o fluido base relacionando a taxa de transferência de calor do lado do líquido de arrefecimento e do lado do ar. Fonte: Autor. ...	72
Figura 3.21 - Ilustração do elemento com as temperaturas de entrada e saída. Fonte: Adaptado de (Cabezas-Gómez <i>et al.</i> 2015).	73
Figura 3.22 - Diagrama de blocos do programa principal (esquerda) e, diagrama de blocos da sub-rotina para cálculo das temperaturas de saída (direita). Fonte: Adaptado de (Cabezas-Gómez <i>et al.</i> 2015).	76

Figura 3.23 - Distribuição de temperaturas para o líquido de arrefecimento e do ar em um trocador de calor de duas fileiras. Fonte: Adaptado de (Cabezas-Gómez <i>et al.</i> 2015).....	77
Figura 4.1 - Amostras de nanofluido de 50 ml separadas para inspeção visual da estabilidade. (a) prata, (b) nanotubos de carbono. Fonte: Autor.	82
Figura 4.2 - Absorbância de UV-VIS dos nanofluidos (a) Ag/PVP (c) MWCNT. Concentração relativa vs o número de dias após a preparação (b) Ag/PVP e (d) MWCNT. Fonte: Autor. ...	84
Figura 4.3 - Validação dos resultados experimentais para a condutividade térmica do etilenoglicol puro e do fluido base (H ₂ O/EG 50:50 vol%). Fonte: Autor.....	86
Figura 4.4 - Condutividade térmica dos nanofluidos em função da temperatura. (a) Prata (Ag/PVP). (b) Nanotubos de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.	87
Figura 4.5 - Validação dos resultados experimentais para a viscosidade dinâmica do etilenoglicol puro e do fluido base (H ₂ O/EG 50:50% vol.). Fonte: Autor.....	89
Figura 4.6 - Viscosidade dinâmica dos nanofluidos em função da temperatura. (a) Prata (Ag/PVP). (b) Nanotubos de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.	90
Figura 4.7 - Viscosidade dinâmica relativa dos nanofluidos. Fonte: Autor.	91
Figura 4.8 - Massa específica dos nanofluidos. (a) Prata (Ag/PVP). (b) Nanotubos de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.....	92
Figura 4.9 - Calor específico dos nanofluidos. (a) Prata (Ag/PVP). (b) Nanotubos de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.....	93
Figura 4.10 - Taxa de transferência de calor para as amostras de nanofluido. (a) 80 °C. (b) 90 °C.(c) 100 °C. (d) 105 °C. Fonte: Autor.	96
Figura 4.11 - Coeficiente global de transferência de calor para as amostras de nanofluido. (a) 80 °C. (b) 90 °C.(c) 100 °C. (d) 105 °C. Fonte: Autor.....	99
Figura 4.12 - Resultados experimentais para a queda de pressão relativa dos nanofluidos (a) Prata (Ag/PVP). (b) nanotubo de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.	101
Figura 4.13 - Coeficiente de desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos. (a) Prata (Ag/PVP). (b) Nanotubos de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.	105

Figura 4.14 – Avaliação da estabilidade da amostra MWCNT 2, antes e após os testes experimentais. (a) Distribuição do tamanho de partícula. (b) Espectro de absorbância UV -vis. Fonte: Autor.....	106
Figura 4.15 - Comparação dos resultados experimentais com os modelos analíticos e experimentais existentes. (a) T= 50 °C. (b) T= 80 °C. Fonte: Autor.....	107
Figura 4.16 - Comparação dos resultados experimentais com os da correlação proposta para a condutividade térmica. (a) $(k \times \phi)$. (b) $(k_{exp} \times k_{mod})$. Fonte: Autor.....	108
Figura 4.17 - Comparação dos resultados experimentais com os da correlação proposta para a viscosidade dinâmica. (a) $(\mu \times \phi)$. (b) $(\mu_{exp} \times \mu_{mod})$. Fonte: Autor.....	109
Figura 4.18 - Efeito do número de elementos na transferência de calor utilizando simulação no software EES. Fonte: Autor.	111
Figura 4.19 - Comparação dos dados experimentais fornecidos pela <i>Fiat Chrysler Automobiles</i> com os obtidos por meio do procedimento iterativo. Fonte: Autor.	112
Figura 4.20 - Dados de validação em regime laminar para o fluido base. (a) correlação de Hornbeck. (b) correlação de Shah. Fonte: Autor.	113
Figura 4.21 - Dados de validação para o fluido base (a) taxa de transferência de calor. (b) a condutância térmica. Fonte: Autor.....	113
Figura 4.22 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos experimental e a correlação estabelecida,(a) (Hornbeck, 1965). (b) (Shah, 1975). Fonte: Autor.	114
Figura 4.23 - (a) Comparação do coeficiente de transferência de calor entre os resultados experimentais e as correlações encontradas na literatura para os nanofluidos, (a) (Meyer et al. 2013). (b) (Mineia e Estellé, 2018). Fonte: Autor.....	115
Figura 4.24 - Comparação entre os valores experimentais e os obtidos usando modelos de correlação para a taxa de transferência de calor. Fonte: Autor.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Condutividade térmica de sólidos e líquidos.	6
Tabela 2.2 - Estudos com nanofluidos em diversas áreas da engenharia.	9
Tabela 2.3 - Detalhes sobre as técnicas de medição da condutividade térmica dos nanofluidos.	27
Tabela 2.4 - Modelos teóricos e empíricos para estimar a condutividade térmica de nanofluidos.	29
Tabela 2.5 - Modelos teóricos e empíricos para estimar a viscosidade dinâmica de nanofluidos.	34
Tabela 2.6 - Trabalhos experimentais sobre o desempenho termo-hidráulico de radiadores automotivos operando com nanofluidos.	43
Tabela 3.1 - Propriedades termofísicas das nanopartículas e do fluido base.	47
Tabela 3.2 - Descrição das amostras de nanofluidos preparadas.	49
Tabela 3.3 - Comparação entre a concentração volumétrica estimada e medida após o preparo.	50
Tabela 3.4 - Especificações do medidor de condutividade térmica THB-1 fornecidas pelo fabricante.	56
Tabela 3.5 - Incertezas de medição para o viscosímetro SVM 3000.	58
Tabela 3.6 - Módulos utilizados no sistema de monitoramento da bancada experimental. ..	66
Tabela 3.7 - Condições para ensaios de caracterização da bancada experimental.	67
Tabela 3.8 - Incertezas dos parâmetros medidos.	79
Tabela 3.9 - Incertezas dos parâmetros calculados.	80

Tabela 4.1 - Comparação da massa específica entre os resultados experimentais e o modelo da regra da mistura para as amostras de nanofluido.	93
Tabela 4.2 - Comparação do calor específico entre os resultados calculados e o modelo de equilíbrio térmico para as amostras de nanofluido.	94
Tabela 4.3 - Parâmetros operacionais para os testes com nanofluido na bancada experimental.	95
Tabela 4.4 - Índice de performance econômica dos nanofluidos.	105
Tabela 4.5 - Dados experimentais para cálculo do coeficiente médio de transferência de calor por convecção do lado do ar.	110

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Área [m ²]
C_d	- Coeficiente de descarga
C_p	- Calor específico [kJ/kg-K]
d	- Diâmetro [m]
h	- Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² K]
k	- Condutividade térmica [W/mK]
L	- Comprimento [m]
m	- Massa [kg]
\dot{m}	- Vazão mássica [kg]
n	- Fator de forma
P	- Pressão [kPa]
pH	- Potencial hidrogeniônico
\dot{Q}	- Taxa de transferência de calor [W]
r	- Raio [m]
t	- Tempo [s]
T	- Temperatura [°C]
U	- Coeficiente global de transferência de calor [W/m ² K]
UA	- Condutância térmica [W/K]
V	- Volume [m ³]
vc	- Volume de controle
Vel	- Velocidade [m/s]
$vol.$	- Concentração em volume

\dot{W}_b	- Potência de bombeamento
$wt.$	- Concentração em massa

Letras Gregas

ϕ	- Concentração
β	- Fator geométrico
ρ	- Massa específica [kg/m ³]
μ	- Viscosidade dinâmica [mPa.s]
ΔP	- Diferencial de pressão [kPa]
ΔT	- Diferencial de Temperatura [°C]
η	- Coeficiente de desempenho termo-hidráulico

Número dimensionais

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

Subscritos

Ar	- Fluido ar
bf	- Fluido base
bu	- Bulbo úmido
eff	- Efetivo
exp	- Experimental
f	- Frio
h	- Hidráulico

<i>in</i>	- Entrada
<i>int</i>	- Interna
<i>liq</i>	- Líquido
<i>Ir</i>	- Camada interfacial
<i>m</i>	- Médio
<i>nf</i>	- Nanofluido
<i>np</i>	- Nanopartícula
<i>sai</i>	- Saída
<i>sol</i>	- Solução

Abreviações

<i>CNT</i>	- Nanotubos de carbono
<i>Ag</i>	-Prata
<i>PVP</i>	-Polivinilpirrolidona
<i>EG</i>	- Etilenoglicol
<i>EMT</i>	- Teoria médio efetivo
<i>LESTnano</i>	- Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia
<i>MWCNT</i>	-Nanotubos de carbono de parede múltipla
<i>SANSS</i>	- Arco submerso para síntese de nanopartículas
<i>UFU</i>	Universidade Federal de Uberlândia

SUMARIO

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização do texto	3
CAPÍTULO II	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Nanofluidos	5
2.2 Aplicações dos nanofluidos.....	7
2.3 Métodos de preparo do nanofluido	10
2.3.1 Método de um passo	10
2.3.2 Método de dois passos	11
2.4 Estabilidade dos nanofluidos	12
2.4.1 Mecanismos de estabilidade dos nanofluidos	12
2.4.2 Técnicas estabilização dos nanofluidos.....	14
2.4.3 Métodos para avaliar a estabilidade dos nanofluidos	18
2.5 Propriedades termofísicas dos nanofluidos	22
2.5.1 Condutividade Térmica	22
2.5.2 Viscosidade Dinâmica.....	31
2.5.3 Massa específica	35
2.5.4 Calor específico	36
2.6 Nanofluidos em transferência de calor.....	38
CAPÍTULO III	46
METODOLOGIA.....	46

3.1	Síntese e produção dos nanofluidos.....	46
3.2	Estabilidade dos nanofluidos	52
3.3	Medições das propriedades termofísicas.....	54
3.3.1	Conductividade térmica	54
3.3.2	Viscosidade Dinâmica e massa específica	56
3.3.3	Calor específico	58
3.4	Bancada Experimental.....	58
3.4.1	Circuito do líquido de arrefecimento	59
3.4.2	Circuito de ar.....	61
3.4.3	Sistema de aquisição de dados	64
3.5	Metodologia e análise dos experimentos.....	67
3.5.1	Interpretação do modelo físico.....	67
3.5.2	Fundamentos de transferência de calor	69
3.5.3	Queda de pressão e potência de bombeamento.....	72
3.5.4	Modelo de simulação do radiador.....	73
3.6	Incertezas de medição	79
	CAPÍTULO IV.....	81
	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	81
4.1	Análise de estabilidade	81
4.2	Propriedades termofísicas	85
4.2.1	Conductividade térmica	85
4.2.2	Viscosidade dinâmica	89
4.2.3	Massa específica	92
4.2.4	Calor específico	93
4.3	Desempenho termo-hidráulico do radiador automotivo	94
4.3.1	Taxa de transferência de calor	94
4.3.2	Coeficiente global de transferência de calor.....	98
4.3.3	Queda de pressão	100
4.3.4	Coeficiente de desempenho termo-hidráulico	103

4.4	Avaliação da estabilidade após os ensaios	106
4.5	Modelos matemáticos propostos e comparação com a literatura	107
4.5.1	Modelo de Condutividade térmica	107
4.5.2	Modelo de Viscosidade Dinâmica	109
4.5.3	Modelos de correlação e comparações para a transferência de calor ...	110
CAPÍTULO V	117
CONCLUSÕES E DESDOBRAMENTOS FUTUROS		117
5.1	Conclusões	117
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		121
APÊNDICE I		144
APÊNDICE II		145
APÊNDICE III		147
APÊNDICE IV		149
APÊNDICE V		151

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O transporte de energia térmica de forma eficiente desempenha um papel essencial no desenvolvimento de sistemas de engenharia nos mais diversos setores, tais como: elétrico, mecânica, química, nuclear, petróleo, entre outros. A indústria automotiva, com sua busca contínua por melhorias e inovação, tem produzido motores de maior potência e cada vez mais eficientes. Conseqüentemente, há a necessidade do aprimoramento do sistema de arrefecimento para acompanhar esse progresso.

Em um sistema de arrefecimento automotivo, o radiador atua como um trocador de calor removendo o calor absorvido pelo líquido de arrefecimento durante sua passagem pelo bloco do motor. Controlar a temperatura de operação do motor é crucial para evitar falhas mecânicas e garantir uma boa eficiência de combustão, evitando o superaquecimento. A viabilidade prática de um radiador é determinada em grande parte pela eficácia e compactação do equipamento. Para garantir essas condições e intensificar a troca de calor, técnicas como a modificação das propriedades dos fluidos de arrefecimento, forma e rugosidade da superfície ou aumento na área de transferência de calor, podem ser usadas (Bigdeli *et al.*, 2016; Mukkamala, 2017). Contudo, o uso dessas técnicas é limitado ao tamanho e peso do radiador e a baixa condutividade térmica dos fluidos de arrefecimento convencionais, como a água ou etilenoglicol.

Com o avanço na ciência dos materiais e nanotecnologia, diversas pesquisas têm focado seus esforços no aumento do desempenho térmico do radiador, propondo o uso de fluidos de arrefecimento com propriedades termofísicas potencializadas. Esta nova classe de fluidos, chamada por Choi e Eastman (1995) de “nanofluidos” são preparadas a partir de suspensões coloidais de nanopartículas (tamanho < 100 nm) em fluidos de arrefecimento convencionais. A principal vantagem dos nanofluidos é sua elevada condutividade térmica

quando comparada ao fluido base, o que pode levar ao incremento da transferência de calor (Gupta *et al.*, 2017). Autores como Sajid e Ali (2019) e Abbas *et al.* (2020) destacam que o uso de nanofluidos em sistemas de arrefecimento automotivo permite uma redução no tamanho e peso do radiador, além de garantir o aumento da eficiência do motor e menor consumo de combustível.

Diferentemente da maioria de aplicações encontradas na literatura, como por exemplo os trabalhos de Chaurasia *et al.* (2019) e Ahmed *et al.* (2018), que usam a água como fluido base em sistemas de arrefecimento automotivo, também é comum o uso de misturas de água e etilenoglicol em diferentes proporções. Essa prática não apenas beneficia na lubrificação, mas também no aumento da temperatura de evaporação, podendo atingir valores de até 110 °C. No entanto, a maior parte dos estudos experimentais que aplicam nanofluidos em radiadores automotivos está concentrada em sistemas com temperaturas de operação abaixo dos 90 °C. Como resultado, são limitadas as informações sobre a viabilidade de aplicação de nanofluidos com temperaturas de operação próximas a um sistema de arrefecimento real. Isso se deve, em parte, à preocupação com a estabilidade dos nanofluidos diante do aumento de temperatura (Chakraborty e Panigrahi, 2020).

Avaliar o funcionamento de um radiador automotivo utilizando nanofluidos sob temperaturas e concentrações de nanopartículas variadas é importante para identificar as condições ideais que promovem aprimoramentos na transferência de calor e reduzem o consumo de energia associado ao bombeamento. Nesse contexto, a presente tese tem como intuito avaliar o desempenho termo-hidráulico de um radiador automotivo, utilizando nanofluidos em escoamento laminar monofásico. Destaca-se que, neste trabalho, a temperatura de operação dos nanofluidos foi aumentada até 105 °C, a fim de avaliar a possibilidade de substituição por um líquido de arrefecimento convencional.

1.2 Objetivos

Esta tese visa avaliar, teórica e experimentalmente, o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos à base de uma mistura de água e etilenoglicol (H₂O/EG), escoando no interior de um radiador automotivo, em temperaturas de trabalho de até 105 °C. Para isso, foram testados nanofluidos contendo nanotubos de carbono (MWCNT) e prata (Ag) em diferentes concentrações. Uma bancada experimental, desenvolvida e modificada no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LESTnano), foi utilizada para realizar a avaliação da transferência de calor e a queda de pressão no sistema. Como objetivos específicos definiu-se:

- Apresentar uma revisão do estado da arte atualizada da aplicação de nanofluidos em radiadores automotivos;
- Produzir nanofluidos em diferentes concentrações de nanopartículas de prata e nanotubo de carbono, utilizando como fluido base uma mistura de água e etilenoglicol (50:50 em volume);
- Realizar a medição experimental das propriedades termofísicas dos nanofluidos, tais como: condutividade térmica, viscosidade dinâmica, massa específica e calor específico;
- Avaliar os efeitos dos principais parâmetros físicos sobre a transferência de calor e a queda de pressão, tais como: concentração de nanopartículas, vazão mássica e temperatura de entrada do nanofluido;
- Comparar os resultados experimentais com os dados obtidos das simulações a partir de correlações encontradas na literatura;
- Avaliar a estabilidade dos nanofluidos baseando-se nos métodos de espectrofotometria (UV-VIS) e espelhamento dinâmico de luz (DLS).

1.3 Organização do texto

O documento foi organizado em cinco capítulos que descrevem detalhadamente cada uma das etapas realizadas.

O capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica atualizada sobre a temática, em que são abordados, inicialmente, conceitos sobre nanofluidos, suas propriedades termofísicas e a metodologia para análise da estabilidade. Posteriormente, é apresentado o estado da arte para correlações existentes relacionadas à transferência de calor e para as propriedades termofísicas de nanofluidos. Ao final desse capítulo, é apresentada uma pesquisa detalhada sobre intensificação da transferência de calor com nanofluidos em radiadores automotivos.

No capítulo III são apresentados os resultados do processo de preparação dos nanofluidos e a análise da estabilidade das amostras utilizadas. Em seguida, uma descrição dos principais componentes da bancada experimental, incluindo toda a instrumentação e hardware eletrônico projetado. A última subseção deste capítulo é dedicada à análise das incertezas das variáveis medidas e calculadas nos testes realizados.

O capítulo IV apresenta os resultados experimentais e numéricos obtidos para os nanofluidos. Inicia-se com a caracterização das propriedades termofísicas (condutividade térmica, viscosidade dinâmica e massa específica) em função da temperatura e da concentração das nanopartículas e, posteriormente, são avaliados a influência de parâmetros físicos sobre a taxa de transferência de calor e queda de pressão, tais como, efeito da

temperatura, vazão do líquido de arrefecimento e concentração de nanopartículas. É feita também uma análise comparativa entre os resultados experimentais obtidos para os nanofluidos e o fluido base, a fim de identificar se houve ou não intensificação da taxa de transferência de calor e aumento na queda de pressão. Para complementar a análise, são realizadas as considerações sobre o coeficiente de desempenho termo-hidráulico e a estabilidade dos nanofluidos após a realização dos ensaios na bancada experimental. Finaliza-se esse capítulo apresentando a comparação entre os resultados experimentais com os numéricos.

O capítulo V, aborda as principais conclusões do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contempla a pesquisa bibliográfica realizada para o embasamento deste trabalho. Inicialmente, serão abordados, os aspectos teóricos relacionados aos nanofluidos e suas propriedades termofísicas. Na sequência, são descritos os métodos de produção, caracterização e avaliação da estabilidade dos nanofluidos. Na seção final, dedicada ao estado da arte dos trabalhos experimentais e numéricos com nanofluidos em radiadores automotivos, discutindo e analisando os principais resultados encontrados na literatura consultada.

2.1 Nanofluidos

Nanofluido é uma classe de fluido formado a partir de uma suspensão coloidal de partículas sólidas de tamanho nanométrico (entre 1 e 100 nm) em um fluido base (Choi e Eastman, 1995). A presença de nanopartículas no fluido base pode aumentar a condução de calor do nanofluido devido à elevada área superficial dessas partículas, permitindo uma maior transferência de energia térmica. Historicamente, Maxwell (1873) foi o primeiro a mencionar que a dispersão de partículas metálicas em um fluido base pode intensificar suas propriedades termofísicas. No entanto, esta aplicação ficou limitada pelo tamanho micrométrico das partículas que provocava uma rápida aglomeração e sedimentação.

Com o grande avanço das pesquisas em nanotecnologia durante os 90s, foi possível a obtenção de partículas em tamanho nanométrico e novas pesquisas surgiram para utilizá-las nos fluidos térmicos. Inicialmente, Masuda *et al.* (1993) conseguiram dispersar partículas da ordem nanométrica de Al_2O_3 , SiO_2 e TiO_2 em água, relatando resultados promissores ao avaliar as propriedades termofísicas como condutividade térmica e viscosidade. Nos anos seguintes, Choi e Eastman (1995) popularizaram o termo “nanofluido”, alavancando diversas

pesquisas para aplicações em sistemas térmicos visando a possibilidade de aumento da eficiência na transferência de calor.

Em comparação com suspensões sólido-líquido de tamanho milimétrico e micrométrico para intensificar a transferência de calor, os nanofluidos possuem vantagens em sua aplicação, como por exemplo, elevada condutividade térmica e uma melhor estabilidade da dispersão, evitando assim erosão e obstrução dos canais de fluxo. De acordo com Li *et al.* (2009), teoricamente todas as nanopartículas sólidas podem ser utilizadas como aditivos para nanofluidos, visto que apresentam uma condutividade térmica superior aos fluidos base. No entanto, Babar e Ali (2019) destacam que as nanopartículas mais comuns encontradas na literatura podem ser classificadas em cinco grandes grupos: metálicas, não metálicas, nitretos metálicos, carbetos metálicos e a base de carbono. Adicionalmente, fluidos térmicos como água, etilenoglicol e óleo são os mais amplamente utilizados como fluidos base no preparo dos nanofluidos. A Tabela 2.1 fornece os valores de condutividade térmica para materiais sólidos usados na produção de nanopartículas e para os fluidos base.

Tabela 2.1 - Condutividade térmica de sólidos e líquidos.

Classes	Material	Condutividade térmica (W/mK)
Metálicos	Cobre (Cu)	401
	Prata (Ag)	429
	Alumínio (Al)	21,9
	Ouro (Au)	317
Não metálicos	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	36
	Óxido de Titânio (TiO ₂)	8,4
	Óxido de Cobre (CuO)	76,5
Base de carbono	Diamante	2300
	Nanotubos de Carbono (CNT)	2000-6000
	Grafeno	4000
Carbeto metálico	Carbeto de Silício (SiC)	490
Nitreto metálico	Nitreto de Silício (Si ₃ N ₄)	16
Fluidos base	Água	0,613
	Etilenoglicol	0,252
	Óleo de motor	0,145

Fonte: Adaptada de (Babar; Ali, 2019).

Em concordância com as informações encontradas na literatura, acredita-se que, a utilização de nanofluidos em sistemas de transferência de calor tenha um impacto significativo. Os nanofluidos quando utilizados como fluido de trabalho em sistemas de aquecimento ou resfriamento, podem melhorar o desempenho térmico dos trocadores de calor. Além da elevada condutividade térmica, os nanofluidos oferecem várias outras vantagens, listadas por Kumar e Sarviya (2021) e descritas a seguir:

- O tamanho nanométrico das partículas faz com que a força gravitacional seja menos dominante. Isso ocorre por causa da maior interação entre as nanopartículas no fluido base, denominado movimento Browniano. Como resultado, o processo de sedimentação será mais lento, tornando a suspensão mais estável. De acordo com Sadeghinezhad *et al.* (2016) o tamanho das nanopartículas também diminui a erosão e entupimento nos trocadores de calor.
- Os nanofluidos também podem ser usados em trocadores de calor de microcanais, uma vez que, as probabilidades de que as nanopartículas bloqueiem os microcanais são reduzidas.
- Devido às propriedades térmicas e físicas intensificadas dos nanofluidos, é possível alcançar uma eficiência de transferência de calor similar utilizando um volume menor de nanofluido em comparação com os fluidos convencionais. Isto, por sua vez, leva à construção de trocadores de calor mais compactos e leves, seguindo a tendência de miniaturização na indústria. Como resultado, o custo global da instalação de um sistema de transferência de calor é reduzido.
- A utilização de nanofluidos em trocadores de calor pode resultar no aumento da queda de pressão em comparação com os fluidos convencionais, uma vez que contêm nanopartículas sólidas. No entanto, estas nanopartículas podem também preencher as imperfeições na superfície, reduzindo o atrito entre o nanofluido e as paredes da tubulação.

2.2 Aplicações dos nanofluidos

Experimental e teoricamente, os nanofluidos mostraram ter propriedades de transporte de calor melhoradas e eficiência energética aumentada em uma variedade de sistemas de troca térmica para diferentes aplicações industriais, tais como, transporte, resfriamento eletrônico, armazenamento de energia, aplicações mecânicas etc. A Figura 2.1 destaca os resultados estatísticos do número de trabalhos publicados nas áreas da engenharia como: automotiva, solar, eletrônica e tribologia, na base de dados Elsevier, entre os anos 2013 e

2023. A pesquisa foi realizada a partir da palavra-chave "*nanofluid*" e filtrou os resultados da palavra-chave de acordo com cada área de interesse.

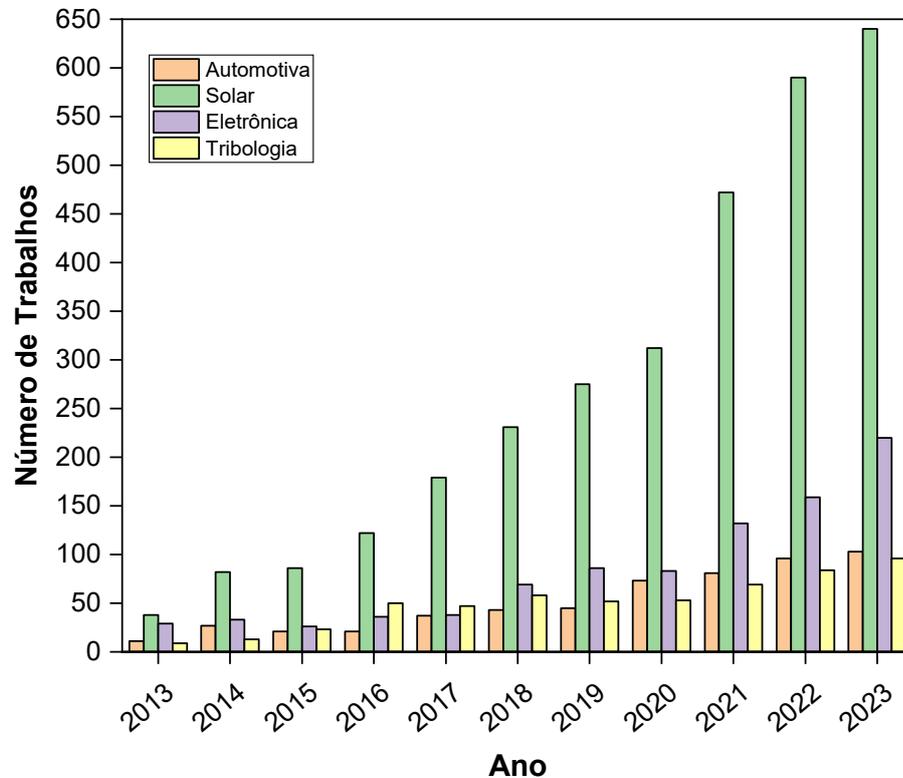


Figura 2.1 - Estatísticas da base de dados Elsevier (2013-2023). Fonte: Autor.

A aplicação dos nanofluidos na área solar vem ganhando cada vez mais atenção, uma vez que essa fonte de energia é limpa e renovável, e é promissor, pois eles podem aumentar a eficiência da transferência de calor e da absorção de luz, tornando a produção de energia solar mais rentável. Sistemas de geração e armazenamento de energia, coletores solares e painéis solares são alguns exemplos desta área onde nanofluidos foram testados experimentalmente.

Na área da eletrônica, os nanofluidos têm sido considerados uma opção promissora para a dissipação de energia dos circuitos integrados e dos componentes microeletrônicos. Isso se deve ao aumento substancial na dissipação de energia desses dispositivos, resultante da redução de tamanho dos mesmos. Para garantir um funcionamento seguro, torna-se essencial uma gestão térmica mais eficaz e o uso de fluidos de arrefecimento com melhores propriedades de transporte térmico.

Os nanofluidos também foram investigados para utilização como lubrificantes em sistemas mecânicos. A adição de partículas nanométricas pode aprimorar as propriedades tribológicas do fluido, resultando na redução do atrito e resistência ao desgaste. Isso, por sua

vez, pode levar a um melhor desempenho e aumento da vida útil dos componentes mecânicos.

No setor automotivo, os nanofluidos têm sido explorados pelo seu potencial de utilização em sistemas de arrefecimento dos motores, intensificando a transferência de calor em comparação com os fluidos de arrefecimento convencionais. Além disso, são utilizados no sistema de lubrificação dos automóveis com a finalidade de reduzir as perdas mecânicas e aumentar a dissipação de calor do trem de força, promovendo assim melhor aproveitamento da potência útil disponível. A Tabela 2.2 lista os trabalhos com mais destaque em cada área mencionada, indicando a aplicação e seus principais resultados.

Tabela 2.2 - Estudos com nanofluidos em diversas áreas da engenharia.

Autor	Nanofluido	Aplicação	Resultados
(KASAEIAN <i>et al.</i> , 2017)	MWCNT / EG SiO ₂ / EG	Coletor solar parabólico	A eficiência térmica aumentou em até 72,8% para nanofluidos de MWCNT
(SANGEETHA <i>et al.</i> , 2021)	Al ₂ O ₃ / Água TiO ₂ / Água MWCNT / Água	Sistema térmico fotovoltaico (PVT)	Eficiência exergética global aumentou em 16% para nanofluidos de MWCNT
(SUNDAR <i>et al.</i> , 2020)	AlO ₂	Coletor solar plano	Eficiência térmica aumentou em 73% para a maior concentração
(MOHAMMADI <i>et al.</i> , 2020)	SiC / Água	Dissipador de calor microcanal	Eficiência térmica aumentou em 6,8% para concentração 1 wt%.
(HASSANI <i>et al.</i> , 2018)	Al ₂ O ₃ / Água	Dissipador de calor	Coefficiente de performance aumentou 28,3%
(CUI <i>et al.</i> , 2019)	Grafeno / Óleo de palma	Lubrificante	Coefficiente de atrito diminui em até 71,2 %
(KUMAR SHARMA <i>et al.</i> , 2020)	Al ₂ O ₃ -MWCNT / Óleo vegetal	Fluido de corte	Redução na força de corte em 20,2 %
(M'HAMED <i>et al.</i> , 2016)	MWCNT / Água-EG	Fluido de arrefecimento	Coefficiente de transferência de calor aumentou 196%
(YUVARAJAN <i>et al.</i> , 2018)	TiO ₂ / Biodiesel	Aditivo para combustível	Emissão de monóxido de carbono reduzida em 13% em comparação ao óleo diesel
(QASIM <i>et al.</i> , 2020)	ZnO / Água	Fluido de arrefecimento	Taxa de transferência de calor aumento em 41%

Fonte: Autor.

As aplicações com nanofluidos não se limitam à área da engenharia. Na medicina, os nanofluidos têm sido usados para processos de terapia por radiação e detecção de doenças graves como o câncer. Na biotecnologia, para a terapia genética para células específicas, detecção de proteínas, anticorpos e outras moléculas. Na agricultura, o seu potencial uso como fertilizantes e pesticidas reduz a quantidade de resíduos tóxicos produzidos, contribuindo para um futuro sustentável. Além disso, o processamento de alimentos, cosméticos e a química também são áreas onde os nanofluidos têm sido aplicados com sucesso, oferecendo alternativas eficientes e inovadoras (Arshad *et al.*, 2019)

2.3 Métodos de preparo do nanofluido

Um ponto crucial para a utilização de um nanofluido é que após o processo de preparação ele seja estável. A escolha das nanopartículas e os fluidos base influencia diretamente nas propriedades termofísicas dos nanofluidos. Para aplicações em sistemas térmicos, o nanofluido ideal seria aquele que possa fornecer uma elevada taxa de transferência de calor com a menor quantidade de energia para bombeá-lo. Além disso, não devem ser corrosivos, com mínima formação de aglomerados e nenhuma alteração química entre as nanopartículas e o fluido de base (Khairul *et al.*, 2016).

A obtenção da estabilidade por períodos prolongados ainda é um desafio para os cientistas, devido ao risco elevado de formação de aglomerações e deposição das nanopartículas. Diante disso, é crucial realizar uma análise cuidadosa da síntese dos nanofluidos, uma vez que a estabilidade é sensível ao método de preparação utilizado.

Os dois métodos principais utilizados para a síntese de nanofluidos são o de um passo (do inglês, *One-Step Method*) e o de dois passos (do inglês, *Two-Step Method*). Estes métodos são explicados em detalhes nas seções subsequentes (2.3.1 e 2.3.2). Além disso, em ambos os métodos, pode ser necessário o uso de dispersantes (surfactantes) e o ajuste de parâmetros, como o pH da dispersão, que afetam diretamente a estabilidade dos nanofluidos produzidos.

2.3.1 Método de um passo

No método de um passo, a síntese das nanopartículas e a sua dispersão no fluido base são feitas de forma simultânea. Geralmente são utilizadas técnicas como deposição física de vapor (PVD), redução química e SANSS-vácuo (do inglês, *Submerged Arc Nanoparticles Synthesis System*). O método PVD deriva do método VEROS (do inglês, *Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate*), inicialmente proposto por Akoh *et al.* (1978) para a síntese de nanopartículas. Entretanto, era difícil separar as nanopartículas do

fluido base para produzir nanopartículas secas. Wagener *et al.* (1997) propuseram uma técnica VEROS modificada na qual a pulverização com magnetron em alta pressão foi utilizada para a preparação de nanofluidos a partir de nanopartículas metálicas. Eastman *et al.* (2001) também propuseram uma modificação na técnica VEROS, em que os vapores metálicos são diretamente condensados em nanopartículas por contato com um líquido de baixa pressão de vaporização.

O método de redução química foi inicialmente proposto por Zhu *et al.* (2004) para produção de nanofluidos de cobre estáveis. A partir da redução de sais de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ com $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ em etilenoglicol sob irradiação de micro-ondas. Os autores concluíram que pelo aumento da concentração de CuSO_4 , houve mais distribuição de nanopartículas de cobre no fluido base. Além disso, Lo *et al.* (2005) foram pioneiros em sintetizar nanofluidos de óxido de cobre (CuO) em fluidos dielétricos usando a técnica de SANSS-vácuo.

As principais vantagens do método de um passo são minimizar os efeitos de oxidação da superfície das nanopartículas e as aglomerações, o que aumenta a estabilidade dos nanofluidos. No entanto, desvantagens como baixa escala de produção, alto custo operacional, compatibilidade apenas com fluidos de baixa pressão de vapor e dificuldade no controle de parâmetros como concentração e tamanho das nanopartículas, impedem sua utilização como principal método de produção de nanofluidos em aplicações de longa escala.

2.3.2 Método de dois passos

O método de dois passos é o mais utilizado para produção de nanofluidos, devido ao menor custo de operação e à maior capacidade de produção controlando a concentração de nanopartículas (Ali e Salam, 2020). Este método envolve duas fases distintas para a produção de nanofluidos, diferentemente do método de um passo. Na primeira etapa, nanopartículas são produzidas na forma de pó seco via métodos físicos ou químicos. Na segunda etapa, essas nanopartículas são dispersas no fluido base, conforme o fluxograma mostrado na Fig. 2.2.

Neste método, o custo de transporte, armazenamento e secagem das nanopartículas não podem ser ignorados, porém, é possível produzir nanofluidos em grande escala e em diferentes concentrações, uma vez que as nanopartículas já foram previamente produzidas. Para dispersar as nanopartículas no fluido base, é necessário a aplicação de energia externa capaz de quebrar os aglomerados para obter uma dispersão homogênea. A agitação ultrassônica Sarsam *et al.* (2017), a homogeneização por alta pressão Oliveira *et al.* (2016) e a agitação com forças eletromagnéticas Chen *et al.* (2020) são algumas das técnicas mais utilizadas.

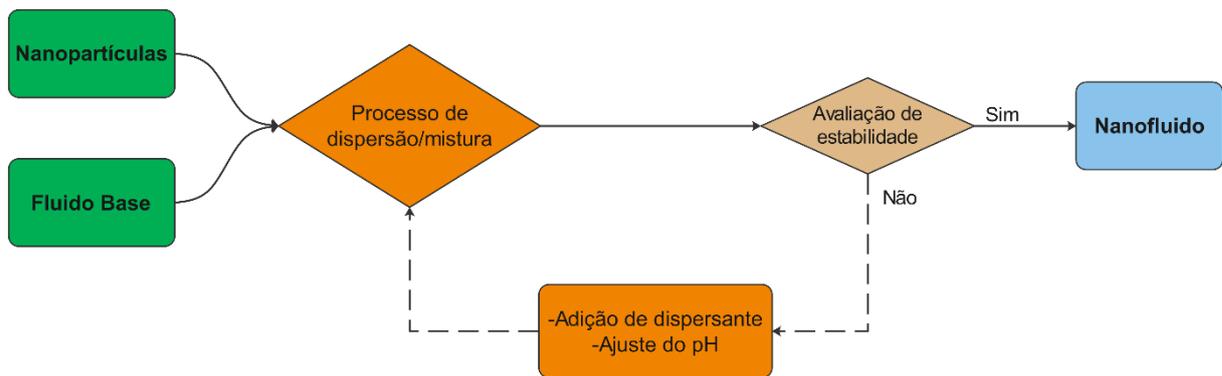


Figura 2.2 - Método de dois passos para preparação dos nanofluidos. Fonte: Autor.

Como desvantagem da aplicação deste método, encontra-se a dificuldade de alcançar uma estabilidade adequada para o nanofluido, visto que, a agregação e formação de aglomerados devido à alta energia superficial das nanopartículas é inevitável durante o processo de transporte e armazenamento. No entanto, tratamentos químicos na superfície das nanopartículas e a adição de surfactantes são amplamente utilizados para reduzir os efeitos de aglomeração prolongando a estabilidade dos nanofluidos.

2.4 Estabilidade dos nanofluidos

Conforme discutido anteriormente, a adição de nanopartículas em fluidos base como água ou etilenoglicol aumenta sua condutividade térmica. No entanto, esse processo também leva a uma tendência de aglomeração das nanopartículas, que podem sedimentar, prejudicando a sua estabilidade. Desta forma, manter as nanopartículas dispersas no fluido base tornou-se uma preocupação importante para aplicações de transferência de calor, principalmente pelo fato da estabilidade influenciar diretamente em suas propriedades termofísicas (Chakraborty e Panigrahi, 2020).

A natureza da nanopartícula, o método de preparo, o potencial hidrogeniônico (pH), o tipo de surfactante e tratamento superficial, são exemplos de fatores que podem alterar a estabilidade dos nanofluidos. No caso de dispersões coloidais, o parâmetro principal que favorece a instabilidade é a elevada energia superficial das nanopartículas. Isto associado à frequência de colisão pelo movimento browniano das nanopartículas determina a taxa de agregação.

2.4.1 Mecanismos de estabilidade dos nanofluidos

O movimento das nanopartículas dispersas no fluido base depende de várias forças exercidas sobre elas ao nível microscópico. Para uma única nanopartícula dispersa, a força da gravidade tende a causar sedimentação devido à diferença de massa específica com o

fluido base. Ao mesmo tempo, a nanopartícula está em movimento aleatório e, portanto, sujeita às forças de Van der Waals, que podem contrabalançar a sedimentação causada pela força gravitacional e ajudar a nanopartícula a permanecer dispersa no fluido base (Yu *et al.*, 2017).

De acordo com Chakraborty e Panigrahi (2020), a agregação de nanopartículas depende da distância e interação entre elas. Se as nanopartículas estiverem próximas o suficiente e as forças de Van der Waals atraentes prevalecerem sobre as forças eletrostáticas repulsivas, aglomerados serão formados. Em seu trabalho, Yu *et al.* (2017) destacam que a forma das nanopartículas também pode influenciar na agregação. Sob a forma de placa ou bastão, tendem a agregar-se mais rapidamente em comparação com as de forma esférica, em função da sua maior área de contato. Deste modo, se as forças repulsivas prevalecem sobre as forças de atração, a estabilidade dos nanofluidos poderá ser garantida. A literatura explica dois possíveis mecanismos para aumentar as forças repulsivas entre as nanopartículas, conhecidos como estabilização estérica e eletrostática.

A estabilização estérica das nanopartículas é alcançada por meio da adição de moléculas ou cadeias orgânicas (polímeros) na sua superfície, criando uma barreira que aumenta as forças de repulsão. Essa adição pode ser realizada por métodos físicos ou químicos, desde que os polímeros escolhidos sejam compatíveis com o fluido circundante (solvente). Para que a estabilização estérica seja eficaz, é importante que a maior parte da superfície da nanopartícula seja coberta por longas cadeias poliméricas (Oliveira, 2018). Algumas vantagens da estabilização estérica são a de menor sensibilidade à presença de eletrólitos, dispersão de diferentes tipos de nanopartículas em um mesmo fluido base e promover a estabilização de dispersões contendo altas e baixas concentrações.

Na estabilização eletrostática, existem forças repulsivas entre as nanopartículas com igual carga superficial sejam elas positivas ou negativas. A carga na superfície das nanopartículas pode ser introduzida por adsorção de íons, adsorção física de espécies carregadas na superfície, substituição de íons, acúmulo ou depleção de íons e dissociação de espécies carregadas na superfície (Yu e Xie, 2012). A sobreposição de dupla camada elétrica que envolve as nanopartículas leva à repulsão mútua promovendo a estabilidade dos nanofluidos (OLIVEIRA, 2018). As principais limitações do uso desse mecanismo são: não ser adequado para sistemas sensíveis a eletrólitos, isto é, sistema com íons de cálcio, sódio e magnésio; é ineficaz no ambiente salino e não aquosos; não é possível redispersão das nanopartículas já aglomeradas.

A Figura 2.3 mostra a representação esquemática dos mecanismos eletrostáticos e estéricos atuando entre duas partículas isoladas.

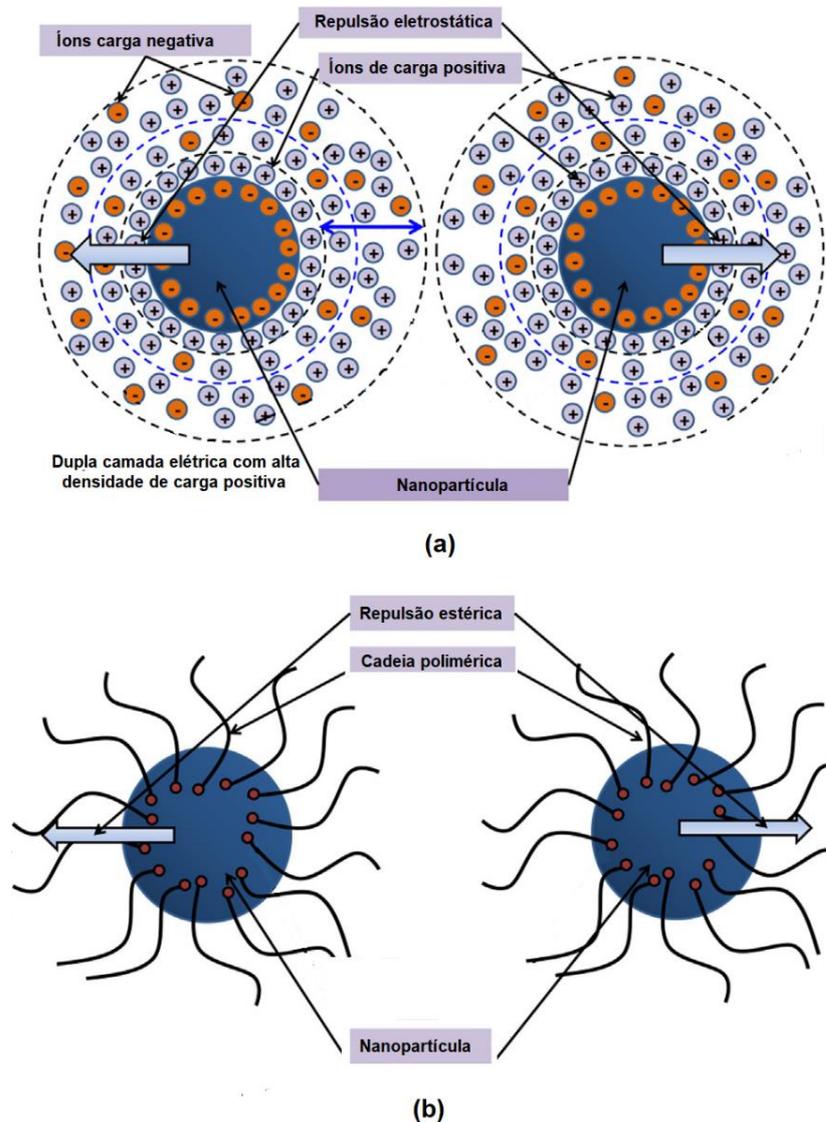


Figura 2.3 - Representação esquemática dos mecanismos de estabilização (a) eletrostática, (b) estérica. Fonte: (Chakraborty e Panigrahi, 2020).

2.4.2 Técnicas estabilização dos nanofluidos

A energia superficial das nanopartículas e sua interação com o fluido base afetam diretamente a estabilidade dos nanofluidos. Duas técnicas são utilizadas para melhorar a estabilidade dos nanofluidos: química e mecânica. A técnica química, também chamada de funcionalização, pode ser covalente (nanopartículas de tratamento com ácidos fortes ou em meio alcalino) ou não covalente (uso de surfactante e mudança de pH). Na técnica mecânica, processos de ultrasonicação e homogeneização a alta pressão são utilizados para quebrar os aglomerados de nanopartículas e assegurar a sua dispersão uniforme no fluido base. A seguir, as técnicas mais utilizadas são abordadas com profundidade.

2.4.2.1 Adição de surfactantes

Surfactantes ou dispersantes (do inglês, “*Surfactant*” ou *Surface active agent*) são definidos como compostos químicos adicionados aos nanofluidos para diminuir a tensão superficial das nanopartículas e aumentar sua molhabilidade (Oliveira, 2018). A adição do surfactante pode ser realizada durante o processo de síntese das nanopartículas pelo método de um passo ou quando as nanopartículas são dispersas no fluido base pelo método de dois passos.

Devido à natureza e morfologia, as nanopartículas podem apresentar comportamento hidrofílico ou hidrofóbico. Por esse motivo, a maioria dos surfactantes consistem em estruturas de hidrocarbonetos de cadeia longa com componente hidrofóbico em uma extremidade e hidrofílico na outra. A presença desses dois componentes cria uma ligação na interface entre nanopartículas e o fluido base, ajudando a alcançar maior molhabilidade, ou seja, o aumento do contacto entre os dois (Ilyas *et al.*, 2017).

A adição de surfactante deve ser feita controladamente para garantir a estabilidade dos nanofluidos. Se a quantidade for insuficiente, as nanopartículas não serão revestidas completamente e não haverá repulsão eletrostática suficiente para equilibrar com as forças de atração. Por outro lado, se a quantidade for excessiva, as moléculas de surfactante podem acumular-se na interface aumentando o volume da nanopartícula e levando à sedimentação.

Vários tipos de surfactantes têm sido utilizados na preparação de nanofluidos estáveis, como por exemplo, o Dodecil sulfato de Sódio (SDS), Sulfonato de Dodecilbenzeno de Sódio (SDBS), Brometo de amônio (CTAB), Polivinilpirrolidona (PVP), ácido oleico e goma arábica. Contudo, seu uso pode trazer desafios, como produção de espumas, biodegradação acelerada Shanbedi *et al.* (2015) e aumento da resistência térmica, limitando o aumento da condutividade térmica (Yu e Xie, 2012). Além disso, a viscosidade dos nanofluidos aumenta com pequenas concentrações de surfactante, requerendo mais energia para o seu bombeamento. Portanto, é importante que o surfactante seja adicionado em quantidades ótimas para obter nanofluidos estáveis a longo prazo com aumento da condutividade térmica e aumento mínimo na viscosidade.

2.4.2.2 Controle do pH

A estabilidade dos nanofluidos também está diretamente relacionada com suas propriedades eletrocinéticas. A alta densidade de carga elétrica superficial e fortes forças repulsivas ajudam a estabilizar as nanopartículas que estão suspensas no fluido base (Wang *et al.*, 2009). Para aplicação desta técnica é necessário determinar o ponto isoelétrico da dispersão, que é o ponto em que a carga elétrica de uma molécula ou nanopartícula é nula.

Segundo Babita *et al.* (2016) a estabilidade pode ser alcançada ao manter o pH dos nanofluidos longe do ponto isoelétrico, enquanto a existência de cargas negativas e positivas influencia na interação entre as nanopartículas e as moléculas do fluido base. É possível medir a carga elétrica superficial das nanopartículas, utilizando um medidor de potencial Zeta. Quando o pH é baixo, a concentração de íons H^+ é elevada e há uma prevalência de partículas com carga positiva na dispersão. Por outro lado, quanto maior o pH, menor a quantidade de partículas positivamente carregadas, resultando em uma prevalência de cargas negativas.

2.4.2.3 *Tratamento superficial das nanopartículas*

Outra técnica utilizada para melhora da estabilidade dos nanofluidos é a modificação da superfície das nanopartículas. Este método inclui as técnicas de enxertia (acoplamento), adsorção química, tratamento de plasma, entre outras. De acordo com Ilyas *et al.* (2017), o uso de nanopartículas funcionalizadas (com a superfície ligada ou modificada) com componentes hidrofóbicos ou hidrofílicos, é uma técnica promissora adequada para garantir estabilidade aos nanofluidos. As vantagens deste método de estabilização é que as partículas modificadas tendem a permanecer suspensas por mais tempo. O efeito sobre as propriedades termofísicas dos nanofluidos é insignificante, no entanto, a condutividade térmica e a capacidade térmica específica podem ser elevadas dependendo das propriedades dos agentes de funcionalização. A toxicidade e a polaridade de algumas nanopartículas podem ser alteradas através deste processo de modificação da superfície.

A modificação da superfície de nanopartículas pode então melhorar significativamente o desempenho de nanofluidos, aprimorando suas propriedades térmicas e reológicas e tornando-os mais adequados para uma ampla variedade de aplicações em transferência de calor.

2.4.2.4 *Ultrasonicação*

A ultrasonicação é uma técnica que usa ondas ultrassônicas para quebrar aglomerados de nanopartículas com a finalidade de se obter uma dispersão uniforme. De acordo com Oliveira (2018), a cavitação acústica a altas frequências promove a nucleação, o crescimento e o colapso de bolhas de ar de um líquido, além de ser também utilizada na dispersão e estabilização de nanofluidos. A energia externa necessária para quebrar os aglomerados pode ser fornecida por dois métodos diferentes: método direto (sonicador de sonda) e o método indireto (banhos de ultrassom).

Os equipamentos utilizados em ambos os métodos são encontrados comercialmente, com o sonicador de sonda o mais eficaz e utilizado. Entre as vantagens do sonicador de

sonda, destacam-se o menor tempo e energia de ultrasonicação e uma maior energia de cavitação distribuída uniformemente na amostra. Por outro lado, os banhos ultrassônicos são aparelhos não invasivos e de menor custo.

A obtenção de nanofluidos estáveis usando esta técnica depende de fatores como o tempo e a frequência da ultrasonicação para dispersão das nanopartículas no fluido base. Conforme Ilyas *et al.* (2017), ambos os parâmetros são diretamente proporcionais à melhor estabilidade dos nanofluidos, no entanto, não há protocolo padrão para preparar nanofluidos usando a técnica da ultrasonicação. A título de complementação, autores como Asadi *et al.* (2019) e Mahbulbul *et al.* (2019) relataram que um tempo de ultrasonicação prolongado pode levar ao aumento do tamanho dos aglomerados e prejudicar a estabilidade dos nanofluidos. A Figura 2.4 mostra em detalhes o processo de dispersão das nanopartículas no fluido base pelo método de ultrassom.

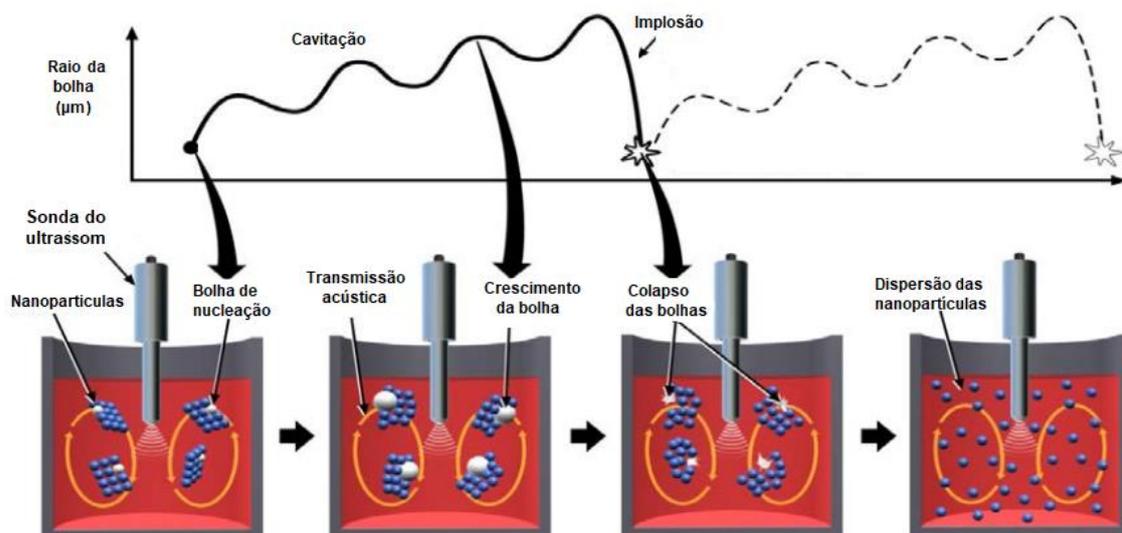


Figura 2.4 - Representação do processo de rompimento dos aglomerados utilizando o sonodador de sonda. Fonte: Adaptado de (Choi, 2015).

2.4.2.5 Homogeneização a alta pressão

Este método consiste em pressurizar a amostra, fornecendo a energia necessária para a realização da quebra dos aglomerados, dispersando as nanopartículas no fluido base. Em um homogeneizador a alta pressão, as aglomerações são desfeitas pela combinação de mecanismos como: as colisões fortes com a parede interior da câmara de interação, a energia de cavitação induzida, e as altas taxas de cisalhamento. Devido às forças de atrito resultantes durante o processo, a temperatura do nanofluido pode aumentar excessivamente.

A elevação da temperatura da amostra ocasiona a mudança na concentração final do nanofluido devido à evaporação do fluido base, como apontado por (Oliveira, 2018). Por esses motivos, a pressão e o tempo de homogeneização devem ser avaliados para evitar superaquecimentos da amostra de nanofluido. Autores como Oliveira *et al.* (2014) e Contreras *et al.* (2019) produziram nanofluidos estáveis usando um homogeneizador de alta pressão que possuía um trocador de calor em conjunto com um banho térmico para o controle da temperatura. O processo foi realizado a uma pressão de ± 400 bar por um período de uma hora.

2.4.3 Métodos para avaliar a estabilidade dos nanofluidos

Diferentes metodologias são encontradas na literatura para caracterizar os nanofluidos avaliando sua estabilidade. Essa diversidade dificulta a comparação do desempenho de diferentes tipos de nanofluidos, pois o método utilizado para avaliar a estabilidade de um pode não ser adequado para outros. Com isso, a falta de um método padronizado pode reduzir a confiabilidade da comparação dos resultados obtidos entre diferentes estudos sobre nanofluidos. A seguir, serão discutidas as técnicas de potencial Zeta, DLS, espectrofotometria UV-vis e microscopia eletrônica, as quais são as mais utilizadas para avaliar a estabilidade dos nanofluidos.

2.4.3.1 Potencial Zeta e DLS

O potencial Zeta ou potencial eletro-cinético é a medida do potencial interfacial entre a camada fina que se adere à superfície da partícula e o meio de dispersão. As nanopartículas dispersas são circundadas por uma camada de fluido que é composta de duas regiões: a camada externa, onde os íons estão livres e, a camada interna, onde os íons são fortemente ligados. O potencial interfacial aumenta quando as forças eletrostáticas repulsivas entre as nanopartículas aumentam. Um maior valor do potencial Zeta (positivo ou negativo) indica uma carga superficial mais intensa, o que confere estabilidade à suspensão (Song *et al.*, 2015). Em contrapartida, valores baixos de potencial Zeta ou próximos de zero (ponto isoelétrico) são um indicativo de baixas forças repulsivas, o que torna uma suspensão instável com alta agregação de nanopartículas.

De acordo com Chakraborty e Panigrahi (2020), partículas com potencial Zeta maiores do que ± 30 mV são consideradas estáveis. O autor também destaca que o valor do pH da suspensão e o valor potencial Zeta estão correlacionados, isto porque, o valor do pH afeta a densidade de carga elétrica na superfície da nanopartícula.

A técnica de DLS (do inglês, *Dynamic Light Scattering*), também usada para caracterização dos nanofluidos, determinando o tamanho médio das nanopartículas suspensas. Como consequência do movimento browniano das nanopartículas, a intensidade da luz é espalhada com diferentes intensidades. O uso de um fotodetector permite medir a velocidade dessas flutuações no tempo. Em DLS, essas flutuações são correlacionadas em intervalos de tempo curtos, geralmente alguns milissegundos, a fim de obter o coeficiente de difusão das nanopartículas. Se as nanopartículas começarem a se aglomerar, o coeficiente de difusão diminuirá, indicando que elas estão se tornando maiores. Isso pode ser um sinal de que a solução está perdendo a estabilidade. O diâmetro efetivo (d_{ef}) ou hidrodinâmico é então calculado usando o coeficiente de difusão (D_i) das nanopartículas através da equação de Stokes-Einstein (Eq. 2.1).

$$d_{ef} = \frac{K_B T}{3\pi\eta D_i} \quad (2.1)$$

onde K_B é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta, e η é a viscosidade do solvente.

Uma vantagem deste método é a possibilidade de prever a estabilidade dos nanofluidos avaliando o tamanho médio das nanopartículas a partir dos aglomerados. Esta medição pode ser realizada em diferentes intervalos de tempo para verificar a taxa de agregação. Segundo Reinert *et al.* (2015), o método de análise de estabilidade usando a técnica de DLS para determinar o tamanho dos aglomerados, para nanopartículas não esféricas é aproximado e impreciso, sendo necessário o uso complementar de outro método de avaliação. Isto pode ser explicado pelo princípio de medição do DLS, que caracteriza o tamanho das nanopartículas baseado no seu diâmetro hidrodinâmico.

2.4.3.2 Espectrofotometria UV-vis

A espectrofotometria UV-vis é uma técnica utilizada para quantificar a luz que é absorvida e espalhada por uma amostra. Tem como objetivo caracterizar quantitativamente a estabilidade dos nanofluidos, correlacionando a absorvância (ou transmitância) no espectro ultravioleta visível (UV-vis) e a concentração de nanopartículas, como relatado na lei de Beer-Lambert (Swinehart, 1962). No processo de medição, a amostra é colocada entre uma fonte de luz (laser) e um fotodetector, e a intensidade do feixe de luz é medida antes e depois de atravessar a amostra. Durante o intervalo de medição, os elétrons podem ser promovidos a níveis de energia superiores e gerar bandas de absorção. As nanopartículas têm propriedades ópticas sensíveis às características geométricas, concentração, estado de aglomeração e

índice de refração próximo à superfície, tornando a espectrofotometria UV-Vis uma ferramenta útil para avaliar a estabilidade.

O uso desta técnica para avaliar a estabilidade dos nanofluidos foi proposta por Jiang *et al.* (2003) em seu trabalho com nanofluidos de nanotubos de carbono em água. Os autores utilizaram um espectrofotômetro UV-vis para avaliar o grau de sedimentação das amostras preparadas. Apesar de ser muito útil na avaliação da estabilidade dos nanofluidos, a lei de Beer-Lambert em espectroscopia UV-vis é limitada pela concentração de nanopartículas, isto porque, a distância média entre as nanopartículas deve ser o suficiente para que uma porcentagem do feixe de luz emitido consiga atravessar a amostra. Para altas concentrações, e nanofluidos preparados com nanopartículas escuras (nanotubos de carbono, grafeno), é recomendado uma diluição prévia da amostra.

2.4.3.3 Microscopia eletrônica de transmissão

A microscopia eletrônica de transmissão ou MET (do inglês, *transmission electron microscopy*) pode ser usada como técnica alternativa para avaliar a estabilidade das nanopartículas por meio de imagens, verificando o tamanho, a morfologia e presença de aglomerados. Em um microscópio eletrônico de transmissão, o feixe de elétrons gerado no topo da coluna da lente interage com a amostra. Uma fonte de radiação ao invés de luz visível, permite a obtenção de imagens com resolução espacial na escala nanométrica. Esta imagem é uma projeção de todo o objeto, incluindo as estruturas de superfície externa e interna. De acordo com Oliveira (2018), uma das razões para o uso de microscopia eletrônica na nanociência é o fato de poder produzir uma série de sinais secundários a partir da interação com a amostra, muitos dos quais são utilizados para fornecer informações químicas qualitativas e quantitativas.

O método MET apresenta como vantagem ter uma excelente resolução (aproximadamente 0,1 nm), em comparação com outros métodos como a microscopia eletrônica de varredura (Inkson, 2016). Porém, pode haver incerteza nas microestruturas dos nanofluidos, devido a esta técnica analisar apenas um pequeno volume da amostra.

Em um estudo realizado por Chakraborty *et al.* (2017), a microscopia MET foi utilizada para analisar o tamanho e a forma de nanopartículas de óxido de titânio TiO_2 /água, com e sem tratamento superficial. Conforme apresentado na Fig. 2.5, os autores conseguiram visualizar que, após o tratamento superficial, o tamanho médio das nanopartículas diminuiu de 135 nm para 95 nm. Outros estudos como os de Tiwari *et al.* (2015) e Pavithra *et al.* (2020), confirmaram que as imagens de MET são úteis para avaliar a estabilidade dos nanofluidos, comprovada a partir do tamanho médio dos aglomerados de nanopartículas.

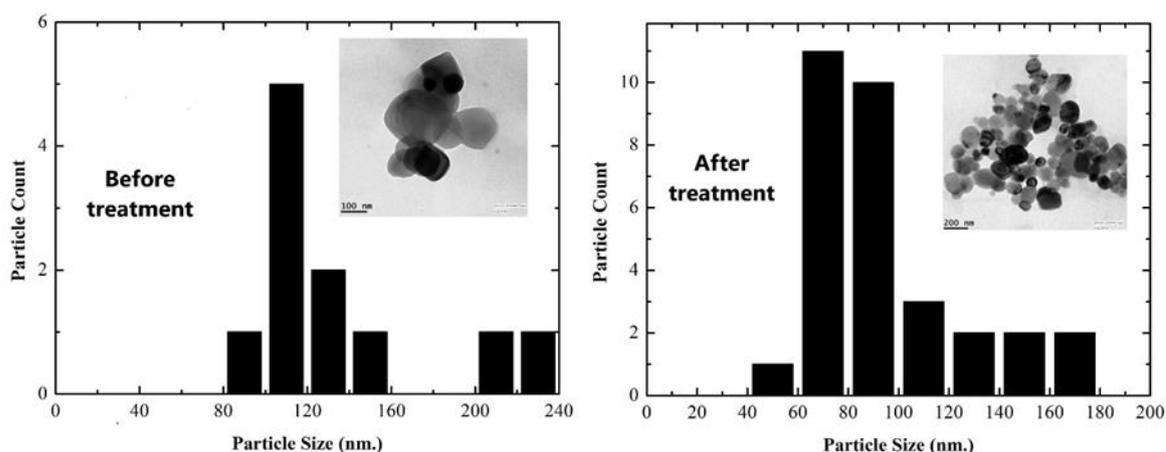


Figura 2.5 - Imagem MET das nanopartículas de TiO_2 . Fonte: (Chakraborty *et al.* 2017).

2.4.3.4 Método de sedimentação

A técnica de sedimentação é a mais simples e comumente utilizada para avaliar a estabilidade dos nanofluidos. Devido à influência da gravidade sobre as nanopartículas, é natural que elas se precipitem e formem sedimentos. Os nanofluidos são considerados estáveis se a concentração de nanopartículas suspensas permanecer uniforme com o tempo. Segundo Ilyas *et al.* (2017), as partículas com diâmetro inferior a $1 \mu\text{m}$ são pouco afetadas pelas forças da gravidade, entretanto, se houver aglomeração de nanopartículas o diâmetro médio aumentará e a sedimentação ocorrerá mais rápido, por causa das forças de gravidade dominantes.

De acordo com Ilyas *et al.* (2013), em nanofluidos a sedimentação pode ocorrer em três formas distintas: sedimentação dispersa, sedimentação floculada e sedimentação mista. Na sedimentação dispersa a altura de sedimentos aumenta de baixo para cima, o que é comum em nanofluidos de baixas concentrações. Para nanofluidos com concentrações volumétricas acima de 1%, a sedimentação acontece de cima para baixo e o fluido começa a ficar mais claro no topo. Na sedimentação mista, as partículas seguem tanto a tendência floculada como a dispersa, e pode ser visto várias camadas separadas de nanopartículas.

No estudo de aplicações com nanofluidos, o método de sedimentação é frequentemente utilizado como uma primeira medida para avaliar a estabilidade. Não obstante, esta técnica representa uma análise qualitativa com baixa precisão pois, a avaliação visual da amostra é incapaz de perceber mudanças a nível nanométrico em intervalos curtos de tempo. Em seu trabalho sobre as propriedades termofísicas dos nanofluidos Sandhu e Gangacharyulu (2017), avaliaram a estabilidade visualmente e registraram imagens usando uma câmera. O processo foi repetido até que a sedimentação de nanopartículas fosse observada no fundo de um tubo de vidro. Como resultado, os autores comprovaram que a

estabilidade não pode ser avaliada com base apenas na análise visual. Portanto, a técnica de espectroscopia UV-vis foi utilizada para quantitativamente medir a estabilidade da dispersão monitorando a absorbância dos nanofluidos. Além disso, Babita *et al.* (2016) comentam que para os casos onde a sedimentação é parcial, a estabilidade de nanofluidos com coloração escura não pode ser avaliada pelo método de sedimentação.

2.5 Propriedades termofísicas dos nanofluidos

A análise das propriedades termofísicas é crucial para compreender o comportamento dos nanofluidos em sistemas térmicos. Abordagens experimentais e numéricas têm sido utilizadas para prever essas propriedades, com foco especial para a condutividade térmica e a viscosidade dinâmica (Ali e Salam, 2020; Mehta *et al.* 2022). Diversos modelos foram desenvolvidos por meio de técnicas de regressão e ajuste de curvas utilizando dados específicos de experimentos conduzidos com nanofluidos em condições particulares. Ainda assim, é importante notar que ainda não existem modelos aceitos na literatura capazes de estimar com precisão essas propriedades para todos os tipos de nanofluidos.

Nas subseções subsequentes, serão apresentadas as propriedades termofísicas que caracterizam os nanofluidos, especificamente, condutividade térmica, viscosidade dinâmica, massa específica e o calor específico. Além disso, serão discutidos os modelos e correlações comumente utilizadas para validar essas propriedades, técnicas de medição e resultados relevantes presentes na literatura.

2.5.1 Condutividade Térmica

2.5.1.1 Fatores que influenciam na condutividade térmica

É consenso entre os cientistas que a condutividade térmica é o parâmetro mais crítico, no que se refere à análise de sistemas térmicos. Aumentar a condutividade térmica pode resultar no aumento da taxa de transferência de calor e em uma melhoria na eficiência térmica, sobretudo, no contexto de aplicações com nanofluidos. Vários estudos demonstraram que a condutividade térmica é influenciada por vários fatores, incluindo as características das nanopartículas, como: o tamanho, forma e material, a concentração, o fluido base, a temperatura, a formação de aglomerados, a presença de aditivos como surfactantes e os valores de pH dos nanofluidos.

Em relação ao fluido base, pesquisas experimentais demonstram que aumentar a condutividade térmica de um fluido base altamente condutivo (água), por meio da adição de nanopartículas é uma tarefa desafiadora, especialmente, quando comparada a um fluido base de baixa condutividade (óleo ou etilenoglicol). Ao avaliar a condutividade térmica dos

nanofluidos contendo nanopartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3), dispersas em diferentes misturas de água e etilenoglicol, Chiam *et al.* (2017) concluíram que o aumento da condutividade térmica dos nanofluidos foi mais elevado em nanofluidos com maior concentração de etilenoglicol. Esse mesmo comportamento foi observado por Sandhu e Gangacharyulu (2017), para nanofluidos de nanotubo de carbono. Os referidos autores verificaram que a proporção ótima era de 50:50 e, neste caso, a concentração de etilenoglicol foi variada de 10% até 50%.

A concentração de nanopartículas também pode afetar a condutividade térmica dos nanofluidos. Geralmente, quanto maior a concentração de nanopartículas, maior será a condutividade térmica, isto devido à elevada condutividade térmica das nanopartículas. Alguns autores sugerem que o aumento da condutividade térmica é de forma linear, na medida em que a concentração de nanopartículas é aumentada. No entanto, outros estudos relataram que essa relação pode ser não-linear, principalmente em concentrações elevadas.

Em seu trabalho com nanopartículas de ferro, Hemmat Esfe *et al.* (2014) relataram que quando a concentração volumétrica foi aumentada de 0,5% para 3% o aumento na condutividade térmica do nanofluido variou de 10% para 30%. Soltanimehr e Afrand (2016) reportaram que a adição de nanopartículas de nanotubos de carbono levou a uma intensificação da propriedade em até 34,7% à concentração volumétrica de 1%. Grandes aumentos na condutividade térmica foram relatados por vários estudos: Choi *et al.* (2001) observaram um aumento de até 160% com nanotubos de carbono em óleo; Ding *et al.* (2006), relataram um aumento de até 80% com nanotubos de carbono em água; e Yu *et al.* (2011), registraram um aumento de até 86% com grafeno em etilenoglicol. Esses resultados podem ser considerados anômalos ou tendenciosos. Em adição, uma desvantagem intrínseca que vem com o aumento da concentração acima de uma concentração ideal é o aumento exponencial da viscosidade dos nanofluidos.

Em relação ao tamanho e forma das nanopartículas, o número de trabalhos publicados envolvendo formatos cilíndricos e esféricos é superior às demais formas, por exemplo, Xie *et al.* (2002) mostraram que, com a mesma concentração volumétrica de 4% em água destilada e etilenoglicol, os nanofluidos produzidos com nanopartículas de carbetto de silício (SiC) de formato cilíndrico apresentaram um aumento na condutividade térmica de 23% e 15% para as de formato esférico. Isso sugere que a forma das nanopartículas pode ter um impacto significativo nas propriedades térmicas dos nanofluidos resultantes.

Em um estudo recente, Kanti *et al.* (2022) investigaram a influência do tamanho das nanopartículas de cinzas volantes (do inglês: *fly ash*) na condutividade térmica de nanofluidos com água como fluido base. Uma única concentração volumétrica de 0,5% foi analisada na

faixa de temperatura entre 30 e 60 °C. Os resultados indicaram que essa propriedade foi aumentada em função da temperatura, e quando o tamanho das nanopartículas foi aumentado, a condutividade térmica foi diminuída. Os autores explicaram que esse comportamento se deve à combinação de efeitos como uma maior área superficial por unidade de volume e um movimento Browniano mais intenso.

A variação da temperatura é outro fator contribuinte que pode acarretar a um aumento ou diminuição da condutividade térmica, dependendo das características específicas do material. De maneira geral, foi observado um aumento na condutividade térmica em função do aumento da temperatura, enquanto em outras, houve uma redução desta propriedade. Por exemplo, Humnic *et al.* (2015) estudaram a condutividade térmica de nanofluidos de ferro-carbono (FeC) em água, e concluíram que o maior aumento nesta propriedade foi de 24,1% para uma concentração em massa de 1% e à temperatura de 70 °C.

Estudos realizados por Soltanimehr e Afrand (2016) demonstraram que há um leve aumento na condutividade térmica para concentrações volumétricas menores que 0,1%, mesmo quando a temperatura foi aumentada. Este efeito foi também observado por Adhami Dehkordi *et al.* (2017), mas apenas para concentrações volumétricas inferiores a 0,125%. Para maiores concentrações, os referidos autores relatam que a formação de cadeias de nanopartículas no fluido base pode diminuir a relação superfície/volume, o que resulta em um aumento da condutividade térmica efetiva menos acentuado. No estudo apresentado por Oliveira *et al.* (2021), o aumento da condutividade térmica se manteve constante mesmo com o aumento da concentração, entretanto, os autores apontaram que, para concentrações volumétricas > 0,05%, o efeito das nanopartículas sobre a condutividade térmica foi mais significativo com o aumento da temperatura de 20 °C para 50 °C. Como pode ser observado, os estudos têm demonstrado que a relação entre temperatura e condutividade térmica é complexa e depende de diversos fatores, tais como as propriedades do material em questão, sua estrutura molecular e a intensidade da agitação térmica das nanopartículas. Por essa razão, não é possível estabelecer uma regra geral para o comportamento da condutividade térmica em relação à temperatura, uma vez que esse parâmetro pode afetá-la de maneiras diferentes em cada situação.

O uso de dispersantes ou surfactantes é outro fator que afeta a condutividade térmica dos nanofluidos, pois eles possuem a capacidade de alterar a interface entre as nanopartículas em suspensão para evitar sua agregação por períodos mais longos. Contudo, apesar de poderem dificultar a aglomeração das nanopartículas, a adição de surfactantes pode afetar diretamente as propriedades térmicas e físicas dos nanofluidos, além disso, o tipo de aditivo, a concentração e a aplicação podem influenciar de diversas formas.

Vários estudos têm mostrado que a utilização de surfactantes apropriados e em quantidades adequadas pode aumentar a condutividade térmica dos nanofluidos. Arzani *et al.* (2015) realizaram um estudo sobre o efeito do tipo de aditivo na condutividade térmica de nanofluidos de grafeno/água, para isso, foram utilizados dois tipos de surfactantes, dodecil benzeno sulfonato de sódio (SDBS) e ácido carboxílico (COOH) - em concentrações de 0,025%, 0,05% e 0,1% em massa. Os resultados do estudo indicaram que o tipo de aditivo utilizado tem impacto significativo na condutividade térmica do nanofluido, com o movimento browniano e a formação de nano-camadas como os principais mecanismos de transporte de energia, conforme evidenciado pelos dados obtidos em função da temperatura.

Chakraborty *et al.* (2017) investigaram o efeito de Polivinilpirrolidona e Polisorbato 20 como dispersantes em nanofluidos de óxido de titânio/água. Embora os agentes estabilizantes tenham sido utilizados, os resultados mostraram que a condutividade térmica efetiva dos nanofluidos não aumentou significativamente, com uma concentração de nanopartículas de 40 ppm e quantidades de dispersante de 30 ppm e 56 ppm. Além disso, os autores observaram que a adição do dispersante resultou em uma menor condutividade térmica em comparação à mesma concentração de nanopartículas sem dispersante.

Segundo Xia *et al.* (2014), há uma concentração ideal de surfactante que proporciona ao nanofluido uma condutividade térmica e estabilidade superiores em comparação a outras concentrações. Iyahraja e Rajadurai (2015) também afirmam que a adição excessiva de surfactante acima da concentração ideal pode promover uma diminuição na condutividade térmica das amostras preparadas.

2.5.1.2 Métodos de medição da condutividade térmica

Existem duas técnicas principais para medir a condutividade térmica: o método de estado estacionário e o método de estado transiente. As técnicas de estado estacionário são úteis quando a temperatura do material permanece constante ao longo do tempo, mas exigem uma configuração experimental mais complexa. As técnicas de estado transiente realizam a medição durante o processo de aquecimento, permitindo medições mais rápidas.

De acordo com Cárdenas Gómez (2019), o método mais utilizado atualmente para medir a condutividade térmica dos nanofluidos é o do fio quente. Este método é uma técnica transiente que é utilizada em pelo menos 54% das vezes em que esta propriedade foi medida experimentalmente, conforme as estatísticas da base de dados da Elsevier, no ano de 2019. A Figura 2.6 apresenta uma visão geral das técnicas empregadas na medição da condutividade térmica dos nanofluidos.

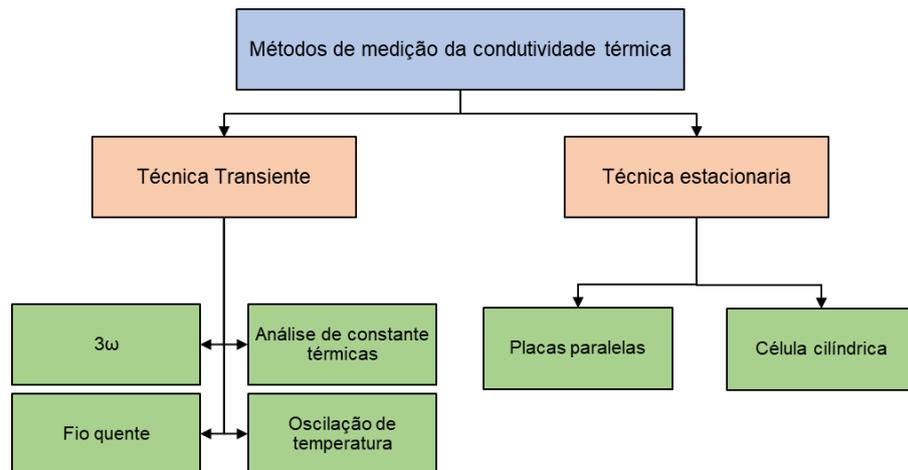


Figura 2.6 - Técnicas de medição de condutividade térmica para nanofluidos. Fonte: Autor.

Diversas vantagens são associadas ao método do fio quente transiente. A principal delas é sua capacidade de eliminar erros experimentais devido à convecção natural, tornando-o ideal para a medição em líquidos. Além disso, este método é consideravelmente mais rápido em comparação a outras técnicas, e o design do equipamento é simples em relação às configurações necessárias em outros métodos. Utilizando-o, é possível medir a condutividade térmica dos nanofluidos a partir de um dispositivo que consiste em um cilindro oco contendo um fio de platina (ou tântalo) com diâmetro de 5-80 micrômetros. Esse fio realiza tanto o aquecimento do fluido quanto a medição de sua temperatura. Quando um fluxo constante de calor é aplicado por meio de uma fonte de calor vertical, longa, fina e linear, imersa no fluido, todo o calor gerado é transferido para o fluido, permitindo a obtenção da condutividade térmica com base na lei de Fourier e na Eq. 2.2.

$$k = \frac{q}{4\pi\Delta T} \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2 C}\right) \quad (2.2)$$

A mensuração da condutividade térmica é muito explorada em estudos sobre nanofluidos, no entanto, há discrepâncias nos resultados encontrados que utilizam o mesmo tipo de nanofluido. Essa dificuldade em obter medidas precisas de condutividade térmica experimentalmente é atribuída ao método de medição utilizado, bem como na variedade de métodos de síntese de nanopartículas e variações em sua composição Buongiorno *et al.* (2009). Detalhes sobre outras técnicas utilizadas para a medição de condutividade térmica dos nanofluidos foram apresentados por Xu *et al.* (2019) e mostrados na Tab. 2.3.

Tabela 2.3 - Detalhes sobre as técnicas de medição da condutividade térmica dos nanofluidos.

Método	Princípio e características
Oscilação de temperatura	<p>O dispositivo de medição consiste em uma célula cilíndrica na qual a amostra é vertida. Um elemento Peltier é normalmente utilizado para alterar a temperatura do fluido no interior da célula. Dentro deste elemento, existem termopares que medem a temperatura no centro e nas superfícies paralelas da célula. A oscilação da temperatura ocorre na camada de referência nos dois limites do fluido de ensaio.</p> <p>Este método é meramente térmico e os mecanismos elétricos do sistema são removidos da amostra.</p>
Analisador de constantes térmicas	<p>Consiste em um sensor de disco de níquel no seu interior. Tipicamente, o sensor preparado de um material condutor de eletricidade e é colocado como uma folha fina na camada de isolamento. Esta parte é considerada como uma mola térmica plana contínua e, ao mesmo tempo, funciona como um sensor de temperatura.</p> <p>O calor é transferido simetricamente ao longo da face do sensor e a faixa de medição de condutividade térmica é ampla (0,02- 200 W/m K).</p>
3 ω	<p>Neste método é medida a frequência de oscilação da temperatura. O elemento é um fio metálico com uma corrente sinusoidal passando através dele com uma frequência ω e, como resultado, uma oscilação térmica com frequência 2ω é gerada no fluido de teste. A oscilação da temperatura pode ser medida indiretamente medindo a tensão 3ω associada.</p> <p>O efeito gravitacional sobre a condutividade térmica do nanofluido pode ser examinado alterando a orientação do dispositivo.</p>
Placas paralelas	<p>O princípio desta técnica segue a condução de calor unidimensional. Embora este método seja teoricamente simples, é difícil na prática devido à necessidade de um isolamento térmico para eliminar o fluxo de calor latente e, o sistema precisa de ser controlado eletricamente para assegurar condições estáveis durante todo o ensaio.</p> <p>Neste método, a amostra é vertida entre duas placas circulares paralelas feitas de cobre, que são separadas uma da outra. Uma fonte de calor fornece o fluxo de calor necessário. A montagem pode ser ajustada para proporcionar uma espessura uniforme da amostra e minimizar o efeito da convecção natural.</p>
Célula cilíndrica	<p>Neste método, uma fina camada de amostra de fluido é colocada entre dois cilindros infinitos. Logo é registrada a diferença de temperatura entre as paredes do cilindro, quando o fluxo passa através do fluido. Para o cálculo da condutividade térmica é utilizada a equação de Fourier em coordenadas cilíndricas. A medição é aplicada com gradientes de temperatura muito pequenos, reduzindo assim a convecção natural.</p>

Fonte: Adaptado de (Xu *et al.*, 2019).

2.5.1.3 Modelos teóricos e correlações para cálculo da condutividade térmica

Na caracterização de nanofluidos, a determinação da condutividade térmica é uma etapa crucial. Além dos métodos experimentais, muitos pesquisadores recorrem ao uso de modelos e correlações para estimar essa propriedade. Essa prática não apenas suplementa a medição experimental, mas também possibilita a revisão e aprimoramento de modelos existentes, bem como a proposição de novos modelos ou adaptações que se adequem às características específicas do nanofluido em estudo. No entanto, é importante ressaltar a necessidade de considerar as hipóteses subjacentes à formulação desses modelos antes de sua aplicação, uma vez que essas hipóteses podem não ser válidas para todos os tipos de nanofluidos.

A determinação da condutividade térmica efetiva dos nanofluidos é uma tarefa que envolve diversos modelos disponíveis na literatura, cada um com suas próprias limitações e desvios (Oliveira, 2018). Apesar da ampla gama de modelos convencionais existentes, há uma falta de resultados teóricos precisos para prever com exatidão a condutividade térmica dos nanofluidos. O modelo clássico proposto por Maxwell (1873) é frequentemente citado, mas apresenta diversas falhas e não consegue descrever de maneira precisa os dados experimentais.

No contexto da pesquisa sobre nanofluidos, diversos modelos têm sido propostos para considerar outras influências na condutividade térmica. Por exemplo, o modelo Sohrabi *et al.* (2010) leva em conta o efeito da transferência de calor convectiva causada pelo movimento browniano. O modelo Evans *et al.* (2008) considera o efeito da agregação ou aglomeração de nanopartículas. Já os modelos de Tso *et al.* (2014) e Jiang *et al.* (2015) consideraram o efeito da camada nanométrica interfacial. Além disso, fatores como temperatura (Koo e Kleinstreuer, 2005), surfactante (Yang; Du, 2012), forma das partículas (Yang e Xu, 2017), entre outros, foram considerados em algumas pesquisas teóricas, e até mesmo o método de redes neurais foi utilizado (Afrand *et al.*, 2016).

Um resumo de algumas expressões teóricas e correlações para estimar a condutividade térmica de nanofluidos é apresentado na Tab. 2.4. Os detalhes dos fatores considerados nesses modelos são introduzidos e analisados a seguir.

Tabela 2.4 - Modelos teóricos e empíricos para estimar a condutividade térmica de nanofluidos.

Autor	Modelo	Fatores considerados	Nanopartículas
(MAXWELL, 1873)	$k_{eff} = k_{fb} \frac{k_{np} + 2k_{fb} + 2\phi(k_{np} - k_{fb})}{k_{np} + 2k_{fb} - \phi(k_{np} - k_{fb})}$	Concentração	Formato esférico
(HAMILTON, 1962)	$k_{eff} = k_{fb} \frac{k_{np} + (n-1)k_{fb} + (n-1)\phi(k_{np} - k_{fb})}{k_{np} + (n-1)k_{fb} - \phi(k_{np} - k_{fb})}$	Fator de forma concentração	Formato esférico e cilíndrico
(NAN <i>et al.</i> , 2003)	$\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = \frac{3 + \phi\left(\frac{k_{np}}{k_{fb}}\right)}{3 - 2\phi}$	Concentração	Nanotubos de carbono
(YU; CHOI, 2004)	$\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = 1 + \frac{n\phi_{eff} A}{1 - \phi_{eff}} A$	Camada interfacial Fator de forma Concentração Nano-convecção	Formato esférico e cilíndrico
(MURSHED <i>et al.</i> , 2006)	$\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = \frac{\left[1 + 0,27\phi^{1,3}\left(\frac{k_{np}}{k_{fb}} - 1\right)\right] \left[1 + \left(\frac{0,52\phi}{1 - \phi^{0,3}}\left(\frac{k_{np}}{k_{fb}} - 1\right)\right)\right]}{1 - \phi^{1,3}\left(\frac{k_{np}}{k_{fb}} - 1\right) \left(\frac{0,52}{1 - \phi^{0,3}} + 0,27\phi^{0,3} + 0,27\right)}$	Concentração	Formato esférico mistura homogênea

Continua na página seguinte

(XUE, 2005)	$\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = \frac{1 - \phi + 2\phi \left(\frac{k_{np}}{k_{np} - k_{fb}} \right) \ln \left(\frac{k_{np} + k_{fb}}{2k_{fb}} \right)}{1 - \phi + 2\phi \left(\frac{k_{fb}}{k_{np} - k_{fb}} \right) \ln \left(\frac{k_{np} + k_{fb}}{2k_{fb}} \right)}$	Concentração	Nanotubos de carbono
(VAJJHA <i>et al.</i> , 2010)	$k_{nf} = \frac{k_{np} + 2k_{fb} - 2(k_{fb} - k_{np})\phi}{k_{np} + 2k_{fb}(k_{fb} - k_{np})\phi} k_{fb} + 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_{fb} C_{fb} \sqrt{\frac{kT}{\rho_p d_p}} f(T, \phi)$	Concentração Temperatura	Nanofluidos com temperatura variando de 25 a 90 ° C
(XING <i>et al.</i> , 2016)	$k_{nf} = \left(1 + \frac{\dot{\eta}\phi}{\frac{3k_{fb}}{\dot{\eta}k_{33}} + 3H(\dot{\eta}P)} \right) k_{fb} + \frac{1}{2} \rho_{CNT} \phi_{CNT} \sqrt{\frac{\kappa_B T}{3\pi\mu r_m}}$	Razão de aspecto Concentração Temperatura	Nanotubos de carbono
(GAO <i>et al.</i> , 2018)	$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = \frac{3 + 2\eta^2\phi}{k_f \left(\frac{2R_k}{L} + 13,4\sqrt{t} \right) (3 - \eta\phi)}$	Espessura, comprimento, resistência térmica interfacial, taxa de nivelamento	Grafeno
(LI <i>et al.</i> , 2019)	$k_{nf} = \frac{k_{pe} + 2k_{fb} + 2(k_{pe} - k_{fb}) \left(1 + \frac{t}{r_{np}} \right)^3 \phi}{k_{pe} + 2k_{fb} - (k_{pe} - k_{fb}) \left(1 + \frac{t}{r_{np}} \right)^3 \phi} k_{fb}$	Concentração Espessura da camada interfacial Raio	Nanopartículas esféricas

Fonte: Adaptada de (BAKTHAVATCHALAM *et al.*, 2020).

2.5.2 Viscosidade Dinâmica

2.5.2.1 Fatores que influenciam na viscosidade dinâmica

A viscosidade é definida como a resistência interna de um fluido ao escoamento. De acordo com Nguyen *et al.* (2007), ela é um parâmetro chave na determinação do fator de atrito e do coeficiente de transferência de calor convectivo dos nanofluidos. Dados confiáveis de viscosidade são necessários para o projeto adequado de equipamentos de transferência de calor em relação à análise de queda de pressão e transferência de calor. Espera-se que a adição de nanopartículas aos fluidos base aumente sua viscosidade, contudo, esse aumento pode prejudicar a potência de bombeamento do sistema.

No estudo realizado por Humenic *et al.* (2015), foi avaliada a viscosidade dinâmica de nanofluidos de FeC/água. Os resultados mostraram que, conforme foi aumentada a concentração em massa de nanopartículas a viscosidade também aumentou. Além disso, para temperaturas acima de 55 °C a influência da concentração foi menor. Khodadadi *et al.* (2019) prepararam nanofluidos de óxido de magnésio (MgO) e avaliaram o comportamento reológico, levando em consideração a influência da concentração volumétrica, a taxa de cisalhamento e a temperatura. Quando se aumentou a concentração volumétrica, a viscosidade dinâmica do nanofluido aumentou até 71% em relação ao fluido base. Os autores sugerem que isso pode ter ocorrido devido a possíveis aglomerações de nanopartículas resultantes da alta concentração utilizada.

Outro fator importante que afeta a viscosidade dos nanofluidos é a temperatura. Vários estudos indicam que, à medida que a temperatura aumenta, a viscosidade dinâmica dos nanofluidos tende a diminuir de forma não-linear. De acordo com Ijam *et al.* (2015), esse comportamento é causado pela redução das forças de adesão intermoleculares, que ocorre com o aumento de temperatura. Além desse fator, Ali e Salam (2020) sugerem que uma maior distância molecular entre as nanopartículas e o fluido base e o maior movimento Browniano, também contribui para a diminuição desta propriedade.

A influência da morfologia da nanopartícula (tanto no tamanho quanto na forma) na viscosidade dos nanofluidos tem sido objeto de poucos estudos. O tamanho determina a relação superfície/volume para uma concentração constante. Nesse sentido, a suspensão com nanopartículas menores pode chegar a apresentar uma maior área de contato sólido/líquido, o que leva a um aumento na viscosidade dinâmica do nanofluido (Gupta *et al.*, 2017). Em relação à forma das nanopartículas, Timofeeva *et al.* (2009) fizeram uma comparação com nanopartículas de alumina (Al_2O_3) de diferentes formatos. Foi usado como padrão de comparação o modelo de Hamilton (1962) de nanopartícula esférica. Os autores

destacam que para uma mesma concentração volumétrica, as amostras contendo nanopartículas em formato cilíndrico ou em folhas apresentam aumentos mais significativos na viscosidade em comparação com os formatos esférico ou esferoides. Segundo eles, a dependência da viscosidade em relação à forma da nanopartícula é devido ao aumento da taxa de cisalhamento resultante das interações entre as nanopartículas, o que sugere que o movimento do fluido é restrito de alguma forma.

A adição de surfactantes aos nanofluidos pode afetar negativamente a viscosidade, e esse efeito está intimamente ligado ao tipo e à quantidade de surfactante utilizado. Borode *et al.* (2021) investigaram como diferentes tipos de surfactantes afetam a estabilidade e as propriedades termofísicas de nanofluidos de grafeno/água. Para isso, foram utilizados quatro surfactantes: dodecilbenzeno sulfonato de sódio (SDBS), dodecil sulfato de sódio (SDS), goma arábica (GA) e polisorbato 80, em várias concentrações de grafeno-surfactante. Os resultados mostraram aumentos de 15,79% até 22,81% na viscosidade relativa, indicando que a escolha do surfactante tem um impacto significativo na viscosidade do nanofluido. Entretanto, é importante considerar que a ação do surfactante na viscosidade de um nanofluido também depende da concentração e do tamanho das nanopartículas, assim como do tipo de fluido base. Por exemplo, um nanofluido de óleo com nanopartículas de ouro pode ter um aumento na viscosidade muito diferente de um nanofluido a base de água, mesmo quando o mesmo surfactante for utilizado para estabilizar as nanopartículas.

2.5.2.2 Métodos de medição de viscosidade

A medição da viscosidade de nanofluidos, tanto dinâmica quanto cinemática, pode ser realizada por meio de dispositivos de medição conhecidos como viscosímetros e reômetros. O viscosímetro pode ser uma solução para testes em nanofluidos com comportamento newtoniano, isto é, a viscosidade é independente da taxa de cisalhamento. Por outro lado, o desempenho de um reômetro permite uma caracterização muito mais ampla da viscosidade para nanofluidos com comportamento newtoniano e não newtoniano. Dessa forma, existem vários métodos experimentais à disposição para determinar a viscosidade de um nanofluido, como o uso de cilindros concêntricos e técnicas de cone e placa, que se baseiam em parâmetros como velocidade angular, ângulo de deflexão, tensão de cisalhamento ou tempo, e empregam um modelo de mecânica clássica para determinar a viscosidade do fluido.

De acordo com Tiwari *et al.* (2022), para a medição da viscosidade e outras propriedades reológicas dos nanofluidos, existem três tipos de viscosímetro comumente utilizados. São eles: o capilar, o rotacional e oscilatório.

O viscosímetro capilar se baseia na medição da velocidade do escoamento em um tubo capilar, sob a ação de uma diferença de pressão constante (equação de Hagen-Poiseuille). Essa técnica é baseada em sistemas de medição de queda de pressão em microcanais, mas seu uso é restrito pela relação entre o tamanho das nanopartículas e o diâmetro do tubo.

Os viscosímetros rotacionais possibilitam a medição da viscosidade de nanofluidos por meio da avaliação do torque necessário para girar a parte móvel do sensor em relação à sua parte fixa, tendo o fluido em análise como um separador. Há várias versões de viscosímetros rotativos, incluindo os modelos com geometria cilíndrica concêntrica, placas paralelas e cone-placa.

Os viscosímetros oscilatórios são compostos tipicamente por uma sonda cilíndrica inserida em uma câmara contendo o nanofluido, que é capaz de oscilar ou girar sob a influência de um campo eletromagnético. A frequência e amplitude do movimento gerado pela sonda são utilizadas para determinar a viscosidade do fluido em questão.

2.5.2.3 Modelos teóricos e correlações para o cálculo da viscosidade dinâmica

Os modelos convencionais para estimar a viscosidade de suspensões contendo sólidos em escala de micrômetros ou milímetros não podem ser diretamente aplicados a nanofluidos, uma vez que os nanofluidos estáveis com nanopartículas mesoscópicas, diferenciam-se dos fluidos binários sólido-líquido e apresentam características mais próximas a um fluido monofásico (Yang *et al.*, 2017). Diante dessa limitação, têm sido feitos diversos esforços para desenvolver um modelo teórico capaz de descrever adequadamente a viscosidade dos nanofluidos.

O modelo clássico e pioneiro mais conhecido é o modelo de Einstein (1905), que também é o mais citado e modificado. No entanto, esse modelo só pode ser utilizado em concentrações baixas, abaixo de 2% em volume, uma vez que é baseado na suposição de nanopartículas esféricas e não considera as interações entre elas. Após o estudo pioneiro proposto por Einstein, diversos pesquisadores se dedicaram a modificar seu modelo por meio de diferentes abordagens. No entanto, apesar da existência de vários modelos de viscosidade para nanofluidos, a maioria deles enfrentam dificuldades em prever com precisão essa propriedade. Como resultado, muitos modelos de viscosidade semiempíricos foram propostos, cada um direcionado para um tipo específico de nanofluido.

Um resumo de algumas expressões teóricas e correlações para estimar a viscosidade dinâmica de nanofluidos é apresentado na Tab. 2.5. Os detalhes dos fatores considerados nesses modelos são introduzidos e analisados a seguir.

Tabela 2.5 - Modelos teóricos e empíricos para estimar a viscosidade dinâmica de nanofluidos.

Autor	Modelo	Fatores considerados	Nanopartículas
(EINSTEIN, 1905)	$\mu_{nf} = \mu_{fb} (1 + 2,5\phi)$	Concentração (<0,2 vol%)	Formato esférico
(BRINKMAN, 1952)	$\mu_{eff} = \mu_{fb} (1 - \phi)^{-2,5}$	Concentração (<4 vol%)	Formato esférico
(BATCHELOR, 1977)	$\mu_{eff} = (1 + 2,5\phi + 6,2\phi^2)$	Concentração Movimento Browniano	Formato esférico
(NGUYEN <i>et al.</i> , 2007)	$\mu_{nf} = \mu_{fb} (1,1250 - 0,0007T)$ $\mu_{nf} = \mu_{fb} (2,1275 - 0,0215T + 0,0002T^2)$	Temperatura (25 – 75 °C) Concentração (< 4 vol%)	Formato esférico
(CHEN <i>et al.</i> , 2007)	$\mu_{nf} = \mu_{fb} \left[1 - \frac{\phi}{0,605} \left(\frac{a_a}{a} \right)^{1,2} \right] e^{-1,5125}$ $\mu_{nf} = \mu_{fb} [1 + 10,6\phi + (10,6\phi)^2]$	Concentração (< 10 vol%) Raio dos agregados	Formato esférico mistura homogênea
(BOBBO <i>et al.</i> , 2012)	$\mu_{nf} = \mu_{fb} (1 - 0,504\phi + 1,744\phi^2)$	Concentração (<1 wt%)	Nanotubos de carbono
(AKBARI <i>et al.</i> , 2017)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} = -24,81 + 3,23T^{0,08014} \exp(1,838\phi^{0,002334}) - 0,0006779T^2 + 0,024\phi^3$	Concentração (<3 vol%) Temperatura (<50 °C)	Formato esférico
(RAZMARA <i>et al.</i> , 2019)	$\mu_{nf} = \frac{5,26 \times 10^{15} \phi^{4,95}}{T^{7,6\zeta^{0,126}}} + \frac{\phi}{10T}$	Concentração (<0,65 vol%) Temperatura	Nanotubos de carbono

Fonte: Adaptada de (BAKTHAVATCHALAM *et al.*, 2020)

2.5.3 Massa específica

A massa específica dos nanofluidos pode ser afetada por diversos fatores, tendo como principal deles a concentração de nanopartículas em suspensão. Quanto maior a concentração de nanopartículas, maior será a massa específica do nanofluido. Além disso, esta propriedade também pode ser influenciada pelas propriedades das nanopartículas em si, como o tamanho, a forma e sua natureza.

Demais fatores que podem afetar a massa específica dos nanofluidos incluem a temperatura e a pressão, que podem causar expansão ou contração dos fluidos base, bem como a presença de aditivos ou surfactantes, que podem alterar a interação entre as nanopartículas e o fluido. É importante ressaltar que a massa específica é uma propriedade física fundamental dos nanofluidos, que pode ter impacto direto em suas propriedades de transporte e transferência de calor.

Geralmente, a massa específica dos nanofluidos é calculada utilizando o modelo matemático recomendado por (Pak e Cho, 1998). Os autores validaram os seus resultados experimentais com os calculados através do uso da regra da mistura homogênea (Eq. 2.3), encontrando um desvio máximo de 0,6% como resultado. Neste caso, os nanofluidos ensaiados foram amostras de óxido de alumínio e dióxido de titânio em concentrações volumétricas variando de 1 a 3%.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{fb} + \phi \rho_{np} \quad (2.3)$$

onde ρ_{nf} é a massa específica do nanofluido; ϕ é a concentração em volume das nanopartículas; ρ_{np} é a massa específica das nanopartículas e ρ_{fb} é a massa específica do fluido base.

Embora a regra de mistura seja um modelo matemático simples, é importante notar que ela não leva em consideração as interações entre as nanopartículas dispersas e o fluido base, bem como as interações entre elas. Além disso, a regra de mistura pode subestimar a massa específica do nanofluido em altas concentrações de nanopartículas, onde as interações podem se tornar significativas.

Al-Waeli *et al.* (2019) conduziram um estudo para analisar os efeitos da mistura de vários fluidos base com a adição de nanopartículas de carbeto de silício na massa específica, e observaram uma tendência decrescente quando a temperatura foi aumentada. Além disso, verificaram também que a adição de nanopartículas aumenta a massa específica do nanofluido quando comparada ao fluido base. Entre a dispersão de 0,5% em massa de

nanopartículas em água/EG (65:35) e a mistura de água/propilenoglicol (65:35), o maior aumento na massa específica foi de até 16,71% para o nanofluido preparado com água/EG.

Medições experimentais da massa específica de diversos tipos de nanopartículas de óxido em fluidos base foram realizadas por Chavan e Pise (2019), tais medições foram feitas para concentrações em volume de 0,1 a 1%, sob uma temperatura de 30 °C. Os resultados mostraram que a massa específica relativa dos nanofluidos de TiO₂/água e Al₂O₃/água aumenta linearmente com a concentração. Além disso, esses nanofluidos apresentaram viscosidade relativa mais alta do que os nanofluidos à base de água/EG de SiO₂. A massa específica também variou de acordo com o tipo de fluido base utilizado; por exemplo, os nanofluidos de SiO₂/EG tiveram um menor incremento em comparação aos de SiO₂/água, ambos com a mesma concentração. A massa específica relativa dos nanofluidos de Al₂O₃/água não teve variação significativa com o aumento da temperatura.

Kishore *et al.* (2020) utilizaram uma equação ajustada da Eq. 2.3 para calcular a massa específica de nanofluidos híbridos, os quais são preparados a partir de nanopartículas de diferentes materiais. A Equação 2.4 foi então utilizada para estimar a massa específica de nanofluidos híbridos contendo cobre (Cu)-grafeno (GnP) em água. Os resultados indicaram que a amostra de Cu-GnP (70:30) apresentou uma massa específica maior do que aquela com proporções de nanopartículas de 30:70, o que é esperado, devido à maior massa específica do cobre em relação ao grafeno. Foi verificado um aumento de 12,5% para essa amostra com uma concentração em volume de 0,02%.

$$\rho_{nfh} = (1 - \phi)\rho_{fb} + (\phi \rho)_{np1} + (\phi \rho)_{np2} \quad (2.4)$$

onde ρ_{nfh} é a massa específica do nanofluido híbrido, ϕ é a concentração em volume das nanopartículas.

2.5.4 Calor específico

O conceito de calor específico refere-se à quantidade de energia térmica requerida para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em um grau. Essa propriedade é considerada fundamental na transferência de calor, em conjunto com a condutividade térmica e viscosidade dinâmica. Dependendo da aplicação, um elevado valor de calor específico pode trazer benefícios ou desvantagens para o sistema.

Conforme a revisão bibliográfica realizada por Angayarkanni e Philip (2015), para otimizar os processos de transferência de calor visando eficiência e sustentabilidade, é essencial aumentar significativamente a capacidade térmica dos fluidos utilizados. No entanto,

muitos resultados não revelam nenhum aumento na capacidade térmica maior do que o erro experimental após a adição das nanopartículas.

Para nanofluidos como fluidos de arrefecimento, a baixa capacidade térmica pode ser considerada uma desvantagem nesse contexto. A água, apesar de possuir uma capacidade térmica consideravelmente alta, a dispersão de nanopartículas nesse fluido pode resultar em uma redução de sua capacidade térmica efetiva. Isso ocorre porque a capacidade térmica das nanopartículas é menor do que a do fluido base. Em um estudo realizado por Sadri *et al.* (2018), diferentes concentrações de nanopartículas grafeno em água foram testadas variando a temperatura. Os autores observaram que o calor específico dos nanofluidos foi menor em comparação ao do fluido base quando a concentração de nanopartículas aumentou de 0,025% para 0,1%, resultando em uma diminuição média do calor específico dos nanofluidos de 1,52%. Curiosamente, a diminuição do calor específico com o aumento da concentração de nanopartículas não foi significativa. Além disso, foi observado um leve incremento do calor específico dos nanofluidos com o aumento da temperatura.

Em contraste com a pesquisa mencionada anteriormente, Kumaresan e Velraj (2012) descobriram que o calor específico dos nanofluidos MWCNT/água-EG aumentou em relação ao fluido base para todas as concentrações testadas. Esse comportamento inesperado foi atribuído à elevada área superficial das nanopartículas dos nanotubos de carbono, resultando em uma energia de superfície maior. Além disso, o valor máximo foi observado para a concentração mais baixa (0,15%), e diminuiu à medida que a concentração foi aumentada.

Por falta de dados experimentais precisos sobre o calor específico de nanofluidos, muitos pesquisadores utilizam modelos existentes para a realização de previsões. A correlação utilizada por Pak e Cho (1998) é um exemplo de modelo que utiliza a concentração volumétrica (ϕ) para estimar o calor específico de nanofluidos, conforme expresso na Eq. 2.5.

$$Cp_{nf} = (1 - \phi) Cp_{fb} + \phi Cp_{np} \quad (2.5)$$

onde Cp_{fb} representa o calor específico do fluido base e Cp_{nf} o calor específico da nanopartícula.

Outro modelo comumente utilizado é o proposto por Xuan e Roetzel (2000), detalhado na Eq. 2.6. Este modelo é válido sob a premissa de que o fluido base e as nanopartículas encontram-se em equilíbrio térmico, podendo ser aplicado mesmo quando há uma grande disparidade entre a massa específica do fluido base e a nanopartícula.

$$Cp_{nf} = \frac{(1-\phi)(\rho Cp)_{fb} + \phi(\rho Cp)_{np}}{(1-\phi)\rho_{fb} + \phi\rho_{np}} \quad (2.6)$$

As Eqs. 2.5 , 2.4 e 2.6 também podem ser adaptadas para estimar o calor específico de nanofluidos híbridos. É necessário adicionar os termos da massa específica, o calor específico e a concentração das nanopartículas usadas no preparo. Uma revisão atualizada sobre essa propriedade foi apresentada por Adun *et al.* (2021), que listou correlações para estimar o calor específicos de nanofluidos preparados com um tipo de nanopartícula, bem como modelos adaptados para casos em que mais de uma nanopartícula foi utilizada.

2.6 Nanofluidos em transferência de calor

A utilização de nanofluidos em transferência de calor apresenta diversas vantagens, tais como: a melhoria da condutividade térmica, o aumento da taxa de transferência de calor, possível redução do tamanho do equipamento e resistência à oxidação, como apresentado na seção 2.2. Essas vantagens têm levado a uma crescente adoção de nanofluidos em trocadores de calor, contudo, ainda apresenta desafios relacionados ao elevado custo de produção e a estabilidade a longo prazo.

Embora existam esses desafios, as vantagens dessa tecnologia são promissoras, especialmente em situações em que a eficiência energética é essencial. Ao serem aplicados em trocadores de calor, os nanofluidos podem oferecer uma melhoria significativa na eficiência do sistema, conquanto que as características do processo sejam consideradas e que sejam implementadas medidas para evitar potenciais problemas associados ao uso desses fluidos.

Em um automóvel, o radiador é um trocador de calor que remove o calor absorvido por um líquido de arrefecimento durante sua passagem pelo bloco do motor. A temperatura de operação do motor deve ser controlada, de modo a evitar falhas mecânicas nos materiais decorrentes das elevadas temperaturas de operação, e permitir uma boa eficiência de combustão, evitando um excesso de resfriamento. Para garantir essas condições, nos últimos anos diversos pesquisadores têm se dedicado a melhorar o desempenho termo-hidráulico do radiador propondo o uso de nanofluidos. Diversos trabalhos como os de Wei *et al.* (2018), Sajid e Ali (2019) e Abbas *et al.* (2020) destacam que o uso de nanofluidos em sistemas de arrefecimento automotivo pode permitir uma redução no tamanho e peso do radiador, além de garantir uma melhor eficiência e menor consumo de combustível. A Figura 2.7 representa os resultados estatísticos sobre o número de publicações envolvendo o uso de nanofluidos

em radiadores automotivos, nos portais *Web of Science* e *Scopus*, no período entre 2010 e 2023, a partir das palavras-chave “*nanofluid*” e “*radiator*”.

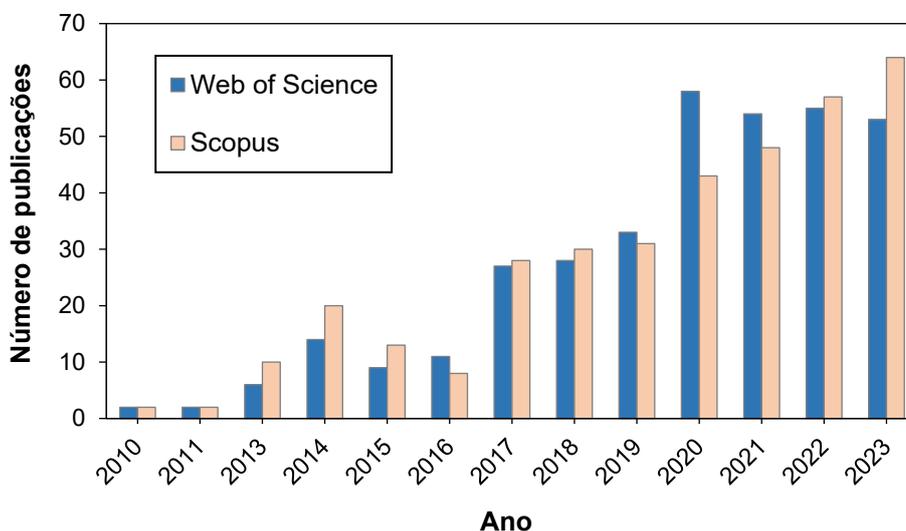


Figura 2.7 - Estatísticas dos portais “*Web of Science*” e “*Scopus*” (2010-2023). Fonte: Autor.

Para realizar a avaliação do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos em aplicações de transferência de calor, algumas propriedades termofísicas, tais como: condutividade térmica, viscosidade, massa específica e calor específico, devem ser consideradas e analisadas. Essas propriedades são afetadas por diversos parâmetros como natureza, forma, tamanho e concentração das nanopartículas, uso de surfactantes, temperatura entre outros. É importante ressaltar que essas propriedades têm um impacto direto no coeficiente de transferência de calor convectivo e a potência de bombeamento ao utilizar nanofluidos em escoamento.

Segundo as publicações de Vajjha e Das (2012) e Timofeeva *et al.* (2014), é possível obter um aumento considerável no coeficiente de transferência de calor sem haver um aumento significativo na potência de bombeamento ou na ocorrência de perda de carga. Por outro lado, Williams *et al.* (2008) e Maré *et al.* (2011) observaram que o aumento do coeficiente de transferência de calor pode ser limitado e que pode estar acompanhado de um aumento na potência de bombeamento, o que inviabilizaria a utilização dos nanofluidos em alguns casos.

Diferentemente da maioria das aplicações encontradas na literatura, em que água é utilizada como fluido base no preparo de nanofluidos, nos sistemas de arrefecimento automotivo também são utilizadas misturas de água e etilenoglicol, em diferentes proporções. Isso se deve ao fato de que a água possui limitações em relação à temperatura de trabalho,

uma vez que no bloco do motor pode atingir valores entre 90 °C e 110 °C, além de oferecer baixa resistência à corrosão (Subudhi; Kumar, 2020).

Em relação à temperatura de operação do nanofluido, diversos pesquisadores se dedicaram a investigar o impacto da temperatura de entrada do nanofluido na taxa de transferência de calor, também na estabilidade e na queda de pressão. De acordo com Abbas *et al.* (2020), ao aumentar a temperatura de entrada do nanofluido, a energia cinética das moléculas aumenta, acarretando na elevação do movimento do fluido, conseqüentemente, na interação com as nanopartículas e, na taxa de transferência de calor. Entretanto, Chakraborty e Panigrahi (2020) indicou que durante o processo de aquecimento, as nanopartículas suspensas no fluido base apresentam um movimento browniano mais intenso, ocasionando um aumento do coeficiente de difusão térmica. Com uma maior probabilidade de colisão entre as nanopartículas, aumenta também a tendência de agregação. Portanto, é necessário adotar precauções adicionais ao utilizar nanofluidos em aplicações de alta temperatura, a fim de evitar instabilidades. A seguir foi realizada uma discussão da aplicação de nanofluidos em radiadores automotivos focando na influência da temperatura de entrada do nanofluido.

Srinivas *et al.* (2016) estudaram as propriedades termofísicas e a transferência de calor de nanofluidos com concentrações em massa de 0,025%, 0,05% e 0,1%, de nanopartículas de nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT'S) em água deionizada com ácido sebácico. Ensaio de desempenho térmico foram realizados em um radiador automotivo, com número de Reynolds entre 2500 e 6000 para o líquido de arrefecimento e temperaturas de entrada entre 80 °C e 95 °C. O coeficiente global de transferência de calor teve um aumento médio de 87,3% para a maior concentração ensaiada em regime laminar.

Selvam *et al.* (2017a) estudaram o desempenho termo-hidráulico com nanofluidos de grafeno/água-EG (70:30) com concentrações volumétricas variando de 0,1% a 0,5%. Para temperaturas de entrada de 35 e 45 °C, os resultados mostraram aumento de até ~104% no coeficiente global de transferência de calor e, de 39% na potência de bombeamento para a maior concentração ensaiada. Em outro estudo realizado pelos mesmo autores, Selvam *et al.* (2017b) foi constatado que o coeficiente de transferência de calor convectivo apresentou um aumento de até 51% em relação ao fluido base. Jadar *et al.* (2017) estudaram a transferência de calor de nanofluidos de f-MWCNT/água em um radiador automotivo. Os experimentos foram conduzidos com vazões de fluido entre 0,5 l/min e 2,5 l/min, com uma temperatura de entrada constante de 45 °C. Foi observado um aumento de 45% na taxa de transferência de calor se comparado ao fluido base.

Ahmed *et al.* (2018) conduziram uma pesquisa sobre o desempenho térmico de um radiador operando com nanofluido de TiO₂/água em concentrações em volume variando de

0,1% a 0,3% e número de Reynolds entre 560 e 1650. Um aumento de até 47% no coeficiente de transferência de calor foi obtido para amostra com 0,2%. Além disso, destacaram a forte influência do número de Reynolds e da concentração de nanopartículas nos resultados obtidos.

Subhedar *et al.* (2018) relataram uma redução de no mínimo 41,15% na área frontal do radiador quando nanofluidos à base de água-EG (50:50) são usados como líquido de arrefecimento. Os testes realizados com temperaturas de entrada do nanofluido de 65 °C a 85 °C e vazões volumétricas de até 9 l/m, concluíram que o número de Nusselt aumentou de 3,89% para 28,47% à medida que a concentração de nanopartículas de Al_2O_3 passa de 0,2% para 0,8%.

Ponangi *et al.* (2018) realizaram um estudo com nanofluidos de óxido de grafeno/água-EG em um radiador automotivo, com temperaturas de entrada de 40 e 50 °C. Foram usadas concentrações volumétricas variando de 0,02% a 0,04% e a vazão variada de 3 a 6 LPM. Foi observado um aumento na efetividade de até 56,45% para a amostra com concentração de 0,03% a uma temperatura de 40 °C. Para a temperatura de 50 °C, os resultados sugerem uma diminuição na efetividade do radiador, indicando uma possível modificação na estabilidade das amostras por causa do aumento da temperatura.

Contreras *et al.* (2019) avaliaram experimentalmente o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de grafeno e prata utilizando como fluido base água/EG. Os ensaios foram conduzidos em temperaturas de entrada do nanofluido de 55 °C a 85 °C e vazões mássicas de 0,08 kg/s a 0,11 kg/s. Para a maior temperatura e maior concentração de grafeno testada foi observada uma tendência de aumento de até 3,3% em relação ao fluido base, contudo, as menores concentrações sofreram uma penalização de até 11%. Para temperaturas de entrada do nanofluido de até 68 °C, Khan *et al.* (2019) avaliaram a influência de nanopartículas de óxido de zinco em água-EG na taxa de transferência de calor. Quando a temperatura da entrada aumentou de 60 °C para 68 °C, a taxa de transferência de calor foi aumentada em 4,4% devido à maior diferença de temperatura. Descobriu-se ainda que é necessário um acréscimo de 2,5% na potência de bombeamento.

Qasim *et al.* (2020) também realizaram ensaios com nanopartículas de ZnO, tendo água como fluido base. Neste caso, os ensaios foram realizados em condições de regime laminar e temperatura de entrada de 70 °C. O aprimoramento máximo na taxa de transferência de calor foi de 41% para o nanofluido com concentração volumétrica de nanopartículas de 0,2%. Além disso, o aumento médio na queda de pressão foi de 47%. Para a amostra com concentração volumétrica de 0,3% o aumento na viscosidade e massa específica limitaram o desempenho térmico quando comparada a concentrações menores.

Abbas *et al.* (2021) produziram nanofluidos híbridos a partir de nanopartículas de óxido de ferro e óxido de titânio ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$) em água. Concentrações volumétricas entre 0,005% e 0,009% foram testadas para vazões de 11 LPM a 15 LPM e temperaturas de entrada do nanofluido de 48 °C e 56 °C. Para a maior temperatura e vazão, o aumento no número de Nusselt foi próximo dos 21%. Os autores destacam que a temperatura de entrada influencia no aumento da taxa de transferência de calor, mas o seu efeito é pouco em comparação com o efeito da concentração e vazão volumétrica. Em outro estudo, Li *et al.* (2021) trabalharam com nanofluidos híbridos de carbeto de silício e nanotubos de carbono (SiC-MWCNT) em concentrações volumétricas de 0,04% a 0,4%, temperatura de entrada do nanofluido de 30 °C a 50 °C e regime de escoamento laminar ($300 \leq \text{Re} \leq 600$). Para a amostra com concentração de 0,4% foi evidenciado um aumento de ~26%, destacando um efeito intensificador da temperatura.

Shankara *et al.* (2022) avaliaram experimentalmente o uso de nanopartículas de óxido de grafeno (0,1 wt%), dispersas em EG/água com proporções (60:40, 30:70 e 20:80). A temperatura de entrada do líquido de arrefecimento foi mantida constante em 90 °C. O nanofluido com fluido base na proporção de 60:40 foi o que apresentou o melhor desempenho térmico, tendo um incremento máximo de 42,77% na taxa de transferência de calor quando a vazão foi de 300 LPH. Os autores destacam ainda que poucos estudos são encontrados sobre o comportamento do nanofluido a temperaturas mais altas, portanto, são necessárias mais investigações experimentais avaliando o comportamento e a estabilidade dos nanofluidos.

Maghrabie e Mousa (2022) analisaram o desempenho térmico de nanofluidos de óxido de silício (SiO_2) e óxido de zinco (ZnO), ambos com uma concentração de 5% em massa, em uma faixa de vazão de 3,5 a 6,5 LPM e temperatura de entrada do líquido de arrefecimento variando entre 45 °C e 80 °C. Foi verificado o aumento na taxa de transferência de calor em até 20% para as amostras de ZnO. Além disso, foi observado que a temperatura de entrada do fluido teve uma forte influência no desempenho térmico, em comparação com a vazão volumétrica. Isto foi verificado pela diminuição do coeficiente global de transferência de calor em 31,37% quando a temperatura foi aumentada de 45 °C para 80 °C.

A título de complementação, na Tab. 2.6 é mostrado o resumo do estado da arte dos trabalhos experimentais, além dos já abordados, com aplicação em radiadores automotivos. Pode-se perceber que a maior parte dos trabalhos foram concentrados em sistemas com temperatura de operação para o líquido de arrefecimento abaixo dos 90 °C. Desta forma, são limitadas as informações sobre a possível aplicação dos nanofluidos com temperaturas de operação próximas a um sistema de arrefecimento automotivo real.

Tabela 2.6 - Trabalhos experimentais sobre o desempenho termo-hidráulico de radiadores automotivos operando com nanofluidos.

Autor	Nanopartícula	Fluido Base	Concentração	Temperatura entrada nanofluido	Resultados
(SELVAM <i>et al.</i> , 2017a)	Grafeno espessura: 5-10 nm	água/EG 70:30	0,1-0,5 vol%	35-45 °C	$h \uparrow 29\%$
(ISLAM <i>et al.</i> , 2017)	ZnO - 40 nm	água/EG 50:50	0,05-0,5 vol%	31,7-48,2 °C	$h \uparrow 74\%$ para 0,5 vol%
(SALAMON <i>et al.</i> , 2017)	TiO ₂	água/PG 70:30	0,1-0,3 vol%	50-80 °C	$\dot{Q} \uparrow 8,0\%$ para 0,3 vol%
(ALOSIOUS <i>et al.</i> , 2017)	Al ₂ O ₃ - 50 nm CuO- 50 nm	água	0,05 vol%	90 °C	$U \uparrow 0,5\%$
(AHMED <i>et al.</i> , 2018)	TiO ₂ -60 nm	água	0,1-0,3 vol%	20-80 °C	$h \uparrow \sim 80\%$ para 0,3 vol%
(SUBHEDAR <i>et al.</i> , 2018)	Al ₂ O ₃ – 20 nm	água/EG 50:50	0,2-0,8 vol%	65-85 °C	$Nu \uparrow 28,47\%$ para 0,8 vol%
(SUMANTH <i>et al.</i> , 2018)	Carboxyl- grafeno Espessura: 4-8 nm	água/EG 50:50	0,02-0,04 vol%	40-50 °C	$Nu \uparrow 32,7\%$ para 0,02 vol%
(SHARMA, 2018)	Al- 135 nm	água	0,2-0,3 vol%	45-55 °C	$h \uparrow 23,56\%$ para 0,3 vol%
(SOKHAL <i>et al.</i> , 2018)	Al ₂ O ₃	água	0- 1 vol%	40-90 °C	$h \uparrow 31\%$ para 1 vol%
(KUMAR <i>et al.</i> , 2018)	Al ₂ O ₃	água	0,2-1 vol%	50-80 °C	$\dot{Q} \uparrow 51\%$ para 0,8 vol%
(CHAURASIA <i>et al.</i> , 2019)	Al ₂ O ₃ -200 nm	água	0,1-0,2 vol%	45-70 °C	$\dot{Q} \uparrow 44,29\%$ para 0,2 vol%
(SAID <i>et al.</i> , 2019)	Al ₂ O ₃ -10 nm TiO ₂ -5 nm	água/EG 50:50	0,05 vol% e 0,3 vol%	80 °C	$Nu \uparrow 24,21\%$ $Nu \uparrow 14,99\%$
(KHAN <i>et al.</i> , 2019)	ZnO-40 nm	água/EG 50:50	0,01-0,04 vol%	60 – 70 °C	$\dot{Q} \uparrow 36\%$ para 0,04 vol%
(ELSAID, 2019)	Co ₃ O ₄ - 21 nm Al ₂ O ₃ - 25 nm	água água/EG 90:10 água/EG 80:20	0,02-0,1 vol% 0,05-0,2 vol%	50-90 °C	$Nu \uparrow 31,7\%$ para Co ₃ O ₄ /água a 90 °C
(JADAR <i>et al.</i> , 2019)	Al-MWCNT-L= 20 μ m, d=20 nm	água	0,1 wt/vol%	80 °C	$Nu \uparrow 45\%$ MWCNT

(ZHOU <i>et al.</i> , 2019)	γ -Al ₂ O ₃ -10 nm α -Al ₂ O ₃ - 30 nm ZnO- 30 nm	Propileno glicol	0,1-0,4 vol%	40-60 °C	h ↑ 50,6% para α -Al ₂ O ₃ 0,2 vol%
(MAISURIA <i>et al.</i> , 2019)	CuO	água/EG 50:50 60:40 70:30	0,2-1 vol%	60-70 °C	\dot{Q} ↑ 19,38% para 1 vol% água:EG (60:40)
(RAMALINGAM <i>et al.</i> , 2020)	Al ₂ O ₃ -SiC _m Al ₂ O ₃ -SiC _m	água/EG 60:40 água/EG 50:50	0,4 vol% 0,8 vol%	80 °C	Nu ↑ 23,46% para Al ₂ O ₃ /SiC _m 0,8 vol%
(QASIM <i>et al.</i> , 2020)	ZnO-20 nm	água	0,1-0,3 vol%	70 °C	\dot{Q} ↑ 41% para 0,2 vol%
(ABBAS <i>et al.</i> , 2021)	Fe ₂ O ₃ -TiO ₂ 40 nm-15 nm	água	0,005-0,009 vol%	48-56 °C	h ↑ 26% para 0,009 vol%
(LI <i>et al.</i> , 2021)	SiC-MWCNT 40 nm SiC- L= 30 μ m, d=20 nm	EG	0,04-0,4 vol%	30-50 °C	h ↑ 26% para 0,4 vol%
(BARGAL <i>et al.</i> , 2021)	ZnO AlN	água/EG 50:50	0,2-0,5 wt%	50-80 °C	U ↑ 10% para 0,5 wt%
(SHANKARA <i>et al.</i> , 2022)	Óxido de grafeno 8-25 nm	EG/água 60:40 20:80 30:70	0,1 wt%	90 °C	\dot{Q} ↑ 42,77% para 60:40
(SIVALINGAM <i>et al.</i> , 2022)	MWCNT L= 30 μ m, d=40 nm	Solar Glycol	0,2 – 0,6 vol%	50 – 70 °C	Nu ↑ 18,39% para 0,6 vol%
(MAGHRABIE; MOUSA, 2022)	SiO ₂ ZnO	Água	5 wt%	45 – 80 °C	\dot{Q} ↑ 20% em 45 °C e 3,5 L/min
(KUMAR <i>et al.</i> , 2023)	MWCNT-SiO ₂	água/EG 50:50	0,1 vol%	65 °C	\dot{Q} ↑ 40%
(TETIK <i>et al.</i> , 2023)	MWCNT-SiO ₂	água	0,1 -0,4 wt%	40 °C	U ↑ 28% para 0,4 wt%
(ELIBOL <i>et al.</i> , 2023)	TiO ₂	água	0,025 – 0,2 vol%	40 – 80 °C	\dot{Q} ↑ 22% para 0,05 vol%
(ASHOK KUMAR <i>et al.</i> , 2023)	Grafeno-MWCNT	Óleo térmico	0,05 – 0,5 vol%	30 – 70 °C	U ↑ 124% para 0,5 vol%
Presente Trabalho	Ag MWCNT	água/EG 50:50	0,001-0,003 vol% e 0,025-0,1 vol%	80- 105 °C	\dot{Q} ↑ 3,7 % para 0,1 vol% de MWCNT

Fonte: Autor.

Para analisar a ocorrência da utilização de nanopartículas de diferente natureza para produção de nanofluidos testados em radiadores automotivos, foi elaborado um mapa de tendências, empregando o método de contagem fraccionada com base nos dados bibliográficos sobre a co-ocorrência das palavras-chave utilizadas pelos autores na base de dados Scopus, conforme ilustrado na Fig. 2.8. O período de tempo avaliado foi entre os anos de 2018 e 2024.

Observou-se que o grupo dos óxidos metálicos é o mais amplamente utilizado, com o óxido de alumínio (Al_2O_3) o mais recorrente. Dentro do grupo dos alótropos de carbono, o grafeno supera os nanotubos de carbono em termos de ocorrências. Essa preferência dos pesquisadores pode ser atribuída principalmente ao custo mais baixo do óxido de alumínio, enquanto a opção pelo uso de nanopartículas de grafeno pode ser influenciada pela premissa de sua elevada condutividade térmica se comparada com as nanopartículas de outros materiais, conforme descrito na Tab. 2.1.

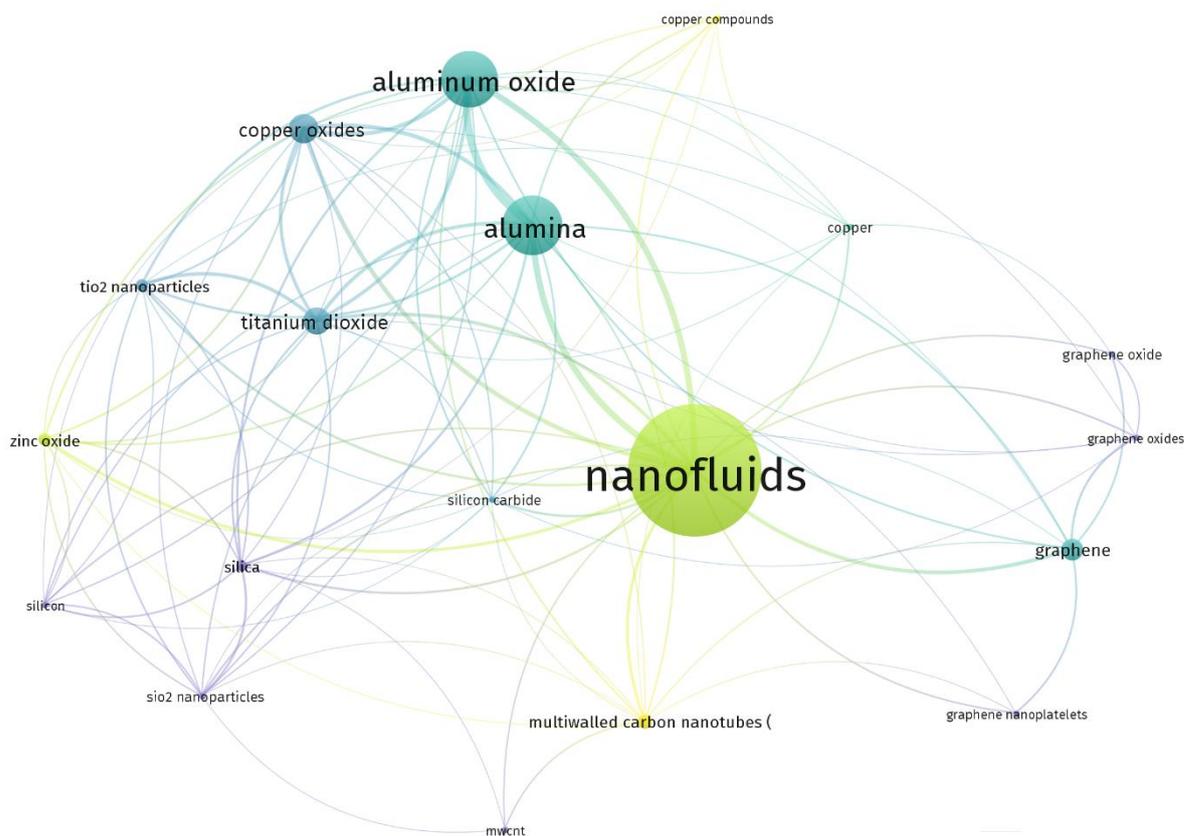


Figura 2.8 - Mapa de nanopartículas utilizadas para a produção de nanofluidos aplicados em radiadores automotivos. Fonte: Autor.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

O objetivo proposto consiste em avaliar teórica e experimentalmente o desempenho termo-hidráulico de um radiador automotivo operando com nanofluidos à base de uma mistura de água e etilenoglicol (H₂O/EG 50:50 vol%). Para alcançar esse objetivo, uma série de etapas foram realizadas previamente e são apresentadas neste capítulo. A primeira etapa descreve o método utilizado para a produção dos nanofluidos, bem como a análise de sua estabilidade. Na segunda etapa, foram realizadas medições das propriedades termofísicas dos nanofluidos produzidos, tais como condutividade térmica, viscosidade dinâmica e massa específica. A terceira etapa consiste na descrição das alterações realizadas na bancada experimental e sua validação, além da análise das incertezas das variáveis medidas e calculadas.

3.1 Síntese e produção dos nanofluidos

No processo de síntese dos nanofluidos, utilizou-se o método de dois passos, descrito no capítulo 2, seção 3. Para dispersar as nanopartículas no fluido base, foram empregados equipamentos como um homogeneizador de alta pressão, um agitador magnético e um banho ultrassônico. O funcionamento desses equipamentos é baseado na aplicação de energia à amostra, com o objetivo de quebrar as aglomerações e dispersar as nanopartículas no fluido base. Conforme apresentado na Fig. 3.1, a preparação dos nanofluidos foi realizada utilizando como fluido base uma mistura de água destilada e etilenoglicol, com uma concentração de 50% em volume.

Para a produção dos nanofluidos, foram utilizadas nanopartículas de prata funcionalizadas com surfactante polivinilpirrolidona (PVP) e uma solução padrão funcionalizada de alta concentração de nanotubos de carbono (MWCNT), ambas adquiridas da empresa *Nanostructured & Amorphous Materials*.

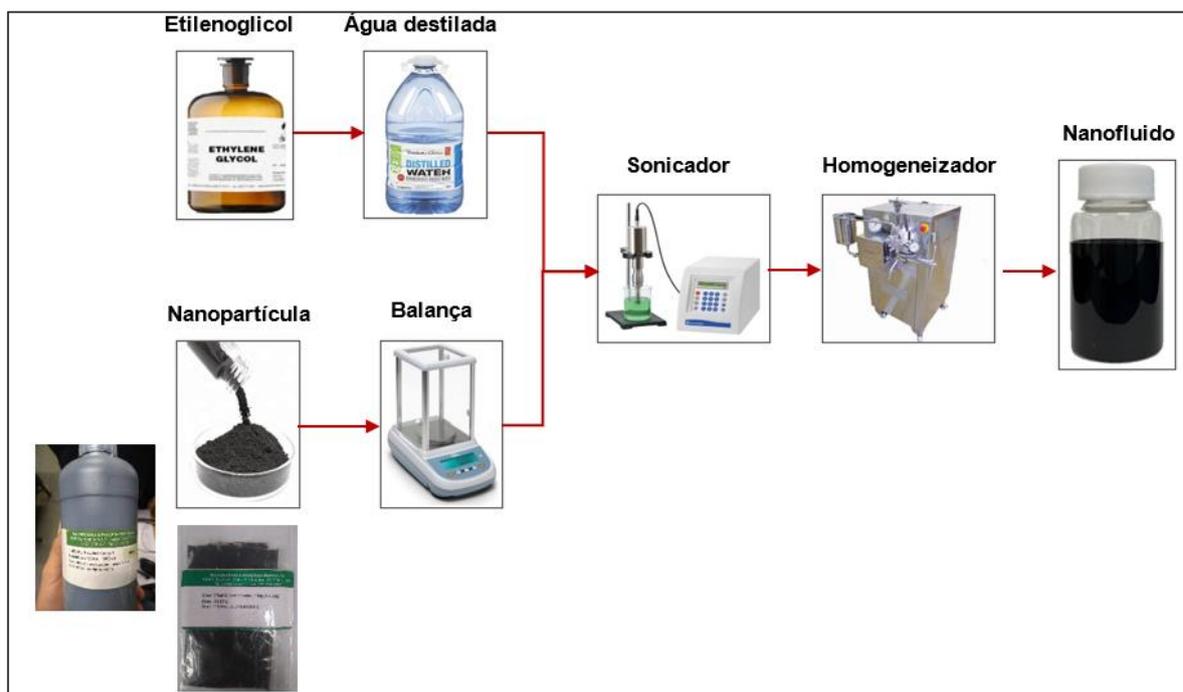


Figura 3.1 - Processo de produção de nanofluidos. Fonte Autor.

A utilização de nanopartículas funcionalizadas visa otimizar a dispersão, uma vez que as moléculas orgânicas ancoradas à superfície das nanopartículas fornecem-lhes propriedades físico-químicas similares às dos respectivos grupos funcionais. As propriedades termofísicas e as características geométricas das nanopartículas são apresentadas na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades termofísicas das nanopartículas e do fluido base.

Material	Morfologia	Tamanho	Massa específica [kg/m ³]	Condutividade	Calor
				Térmica [W/mK]	Específico [J/kgK]
Prata-PVP	Esférica	20 nm	10400	429	238,8
Nanotubos de carbono (MWCNT)	Cilíndrico	D: 20-50 nm L: 10-20 µm	2100	3000	710
Água/ EG (50:50 em volume)	[-]	[-]	1071,11	0,370	3300

*Os dados para o fluido base estão de acordo com (ASHRAE STANDARD, 2001).

O processo de preparo começa com a mistura de água e etilenoglicol em concentração volumétrica iguais como fluido base. A partir disso, por meio da Eq. 3.1, foram calculadas as massas das nanopartículas e do fluido base que obedecem às concentrações volumétricas das amostras de nanofluidos a serem preparadas. A rotina desenvolvida no software

Engineering Equation Solver (EES) para o cálculo das massas de nanopartícula e do fluido base em simultâneo, estão dispostas no APÊNDICE I.

$$\phi(\%) = \frac{\frac{m_{np}}{\rho_{np}}}{\frac{m_{np}}{\rho_{np}} + \frac{m_{fb}}{\rho_{fb}}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

onde m representa a massa, ρ refere-se a massa específica, e os subíndices np e fb correspondem as nanopartículas e ao fluido base, respectivamente.

Considerando que o volume de líquido requerido para a realização dos ensaios na bancada experimental foi de 4 L, o volume final de produção foi de 4,8 L para cada amostra preparada. Desta forma, os 800 ml adicionais permitem realizar as medições das propriedades termofísicas e da estabilidade coloidal.

Para pré-dispersar as nanopartículas no fluido base foi utilizado o banho ultrassônico com potência de trabalho de 250 W a uma frequência de 20 kHz. Este processo foi realizado por um tempo controlado em ciclos on/off de 60 minutos, a uma temperatura menor que 40 °C. Em seguida, as amostras foram submetidas ao processo de homogeneização à alta pressão, cujo esquema de funcionamento pode ser visualizado na Fig. 3.2.

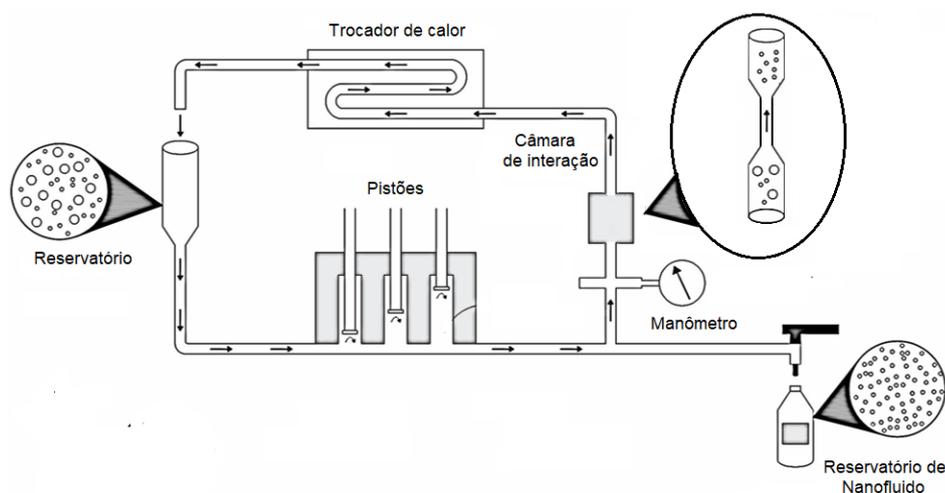


Figura 3.2 - Método de homogeneização por alta pressão. Fonte: Autor.

A amostra foi colocada no homogeneizador de alta pressão da empresa “Artepeças” e submetida a recirculação durante 60 minutos, sob pressão de 500 bar. Esse equipamento é composto por três pistões acionados por um mecanismo motor-polia e um manômetro para monitorar a pressão interna do sistema, onde a pressão é controlada pelo acionamento

manual de uma válvula. Um banho térmico opera conjuntamente com o homogeneizador, evitando um aumento excessivo da temperatura da amostra devido às altas taxas de cisalhamento na câmara de interação.

Foram produzidos 8 nanofluidos distintos compostos por duas nanopartículas diferentes, sendo eles: 3 concentrações para o nanofluido composto por nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) e 5 concentrações de prata (Ag) com PVP como surfactante. A Tabela 3.2 apresenta as amostras de nanofluido produzidas e testadas na bancada experimental, assim como suas abreviações que serão utilizadas no decorrer do texto.

Tabela 3.2 - Descrição das amostras de nanofluidos preparadas.

Fluido	Concentração surfactante [wt. %]	Concentração nanopartículas [vol. %]	Nome da amostra
H ₂ O/EG (50:50) vol.%		-	Fluido Base
Prata/ (H ₂ O/EG) (50:50) vol%	0,29% PVP	0,001 %	Ag/PVP1
	0,59% PVP	0,002 %	Ag /PVP2
	0,88% PVP	0,003 %	Ag /PVP3
	2,9 % PVP	0,01 %	Ag /PVP4
	8,8% PVP	0,032 %	Ag /PVP5
Nanotubos de Carbono/ (H ₂ O/EG) (50:50) vol%	Solução funcionalizada (SDS)	0,025 %	MWCNT1
		0,05 %	MWCNT2
		0,1 %	MWCNT3

Fonte: Autor.

É importante destacar que, foi observado experimentalmente a necessidade de aumentar a concentração da solução em 10%. Isso ocorreu porque, apesar de todas as precauções tomadas, algumas nanopartículas ficaram presas nos equipamentos e nos utensílios de manuseio. Como se trata de uma quantidade pequena de nanopartículas, qualquer discrepância na massa pode levar a uma variação significativa na concentração volumétrica do nanofluido, diferente do pretendido.

Com o propósito de avaliar a concentração final dos nanofluidos preparados, foram conduzidos testes de gravimetria através da evaporação de amostras de baixo volume (50 ml). Para o processo de secagem, as amostras foram colocadas em uma estufa a uma temperatura de 150 °C por um período de 72 horas. A Tabela 3.3 apresenta os resultados desses testes, incluindo a percentagem da variação média da concentração volumétrica para as amostras produzidas.

Tabela 3.3 - Comparação entre a concentração volumétrica estimada e medida após o preparo.

Amostra	Concentração volumétrica estimada [vol.%]	Concentração volumétrica após preparação [vol.%]	Diferença relativa [%]
Ag/PVP1	0,001	0,0012	20,1
Ag /PVP2	0,002	0,0023	15,2
Ag /PVP3	0,003	0,0034	13,33
Ag/PVP4	0,01	0,0095	-5,1
Ag/PVP5	0,032	0,03	-6,25
MWCNT1	0,025	0,022	-12,13
MWCNT2	0,050	0,046	-8,76
MWCNT3	0,100	0,093	-7,33

Fonte: Autor.

A Figura 3.3 apresenta o registro fotográfico dos nanofluidos uma hora após o processo de preparo. Nas imagens, foi observado que todas as amostras apresentam aparência visualmente estável, com boa dispersão, o que foi posteriormente confirmado por meio da análise de estabilidade abordada na seção 3.2.

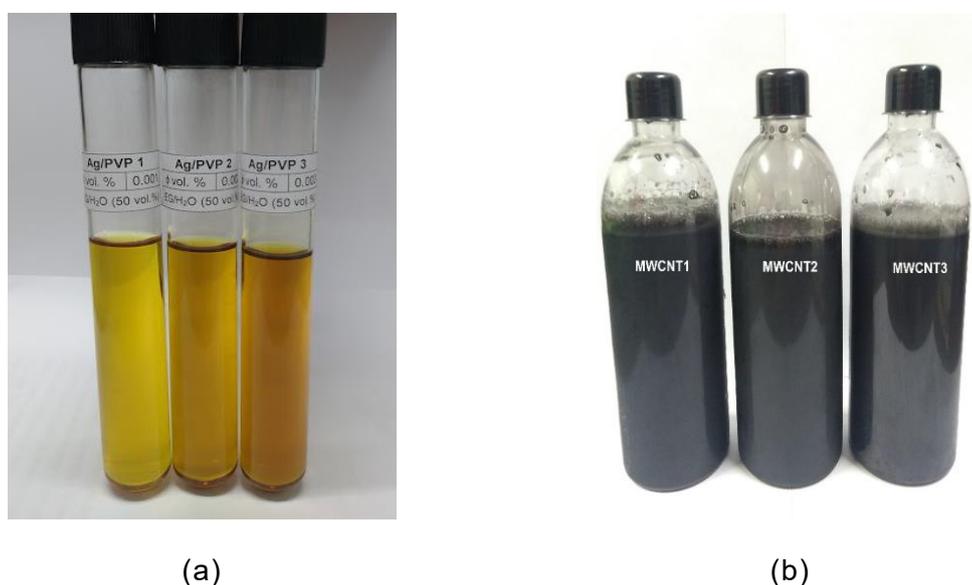


Figura 3.3 - Amostras de nanofluido 1h após a preparação. (a) Ag/PVP, (b) MWCNT. Fonte: Autor.

A morfologia das nanopartículas foi conferida utilizando um microscópio de transmissão eletrônica (MET) da marca *HITACHI*, modelo HT-7700. A preparação das amostras sucedeu por dispersão em banho ultrassônico em meio alcóolico, sendo uma gota

da amostra depositada na superfície da grade de cobre e levada ao fluxo para secagem antes de iniciar a obtenção das imagens. Na Figura 3.4a pode ser observado o formato esférico das nanopartículas de prata, assim como seu tamanho médio. Já na Figura 3.4b a microscopia de transmissão permitiu visualizar as paredes múltiplas dos nanotubos de carbono. O software *ImageJ* possibilitou o processamento das imagens para a obtenção dos diâmetros das nanopartículas.

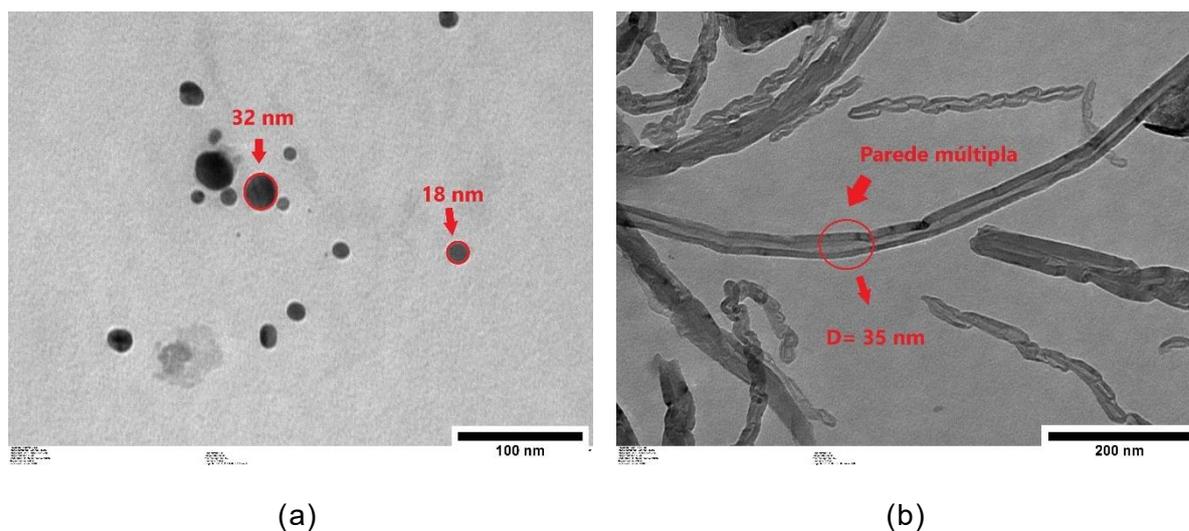


Figura 3.4 - Imagens MET das nanopartículas. (a) Ag/PVP, (b) MWCNT. Fonte: Autor.

A análise da distribuição do tamanho das nanopartículas foi realizada por meio da técnica de espalhamento dinâmico de luz (DLS) utilizando do equipamento Malver-Zetasizer, modelo ZS90. Nesse método, o coeficiente de difusão é determinado a partir da flutuação de intensidade, seguindo os princípios da teoria da dispersão da luz, conforme discutido por (Bhattacharjee, 2016). Esse pressuposto é básico para calcular o tamanho da partícula, por meio da equação de Stokes- Einstein:

$$R_H = \frac{k_B T}{6\pi \mu D_F} \quad (3.2)$$

onde R_H , D_F , k_B , T , e μ representam o raio hidrodinâmico, coeficiente de difusão translacional, constante de Boltzmann, temperatura absoluta e viscosidade, respectivamente.

Na Figura 3.5 pode-se observar que o diâmetro equivalente para a amostra de prata foi de 80 nm e, aproximadamente 300 nm para as amostras com nanotubos de carbono. A diferença entre os valores registrados pelo equipamento em comparação aos dados fornecidos pelo fabricante pode ser explicada pelo fato de a amostra utilizada ser estatisticamente pequena no caso da prata. No caso dos nanotubos de carbono, deve-se ao

fato de que a medição do diâmetro equivalente para uma nanopartícula em forma de tubo pode apresentar erros.

Como apontado por Reinert *et al.* (2015), o método de análise que avalia a dimensão das nanopartículas de nanotubos de carbono é impreciso e aproximado. A elevada relação de aspecto (comprimento/diâmetro) para um único nanotubo limita a hipótese de uma forma esférica. No entanto, aglomerados de MWCNTs podem ser aproximados para ter uma forma esférica global.

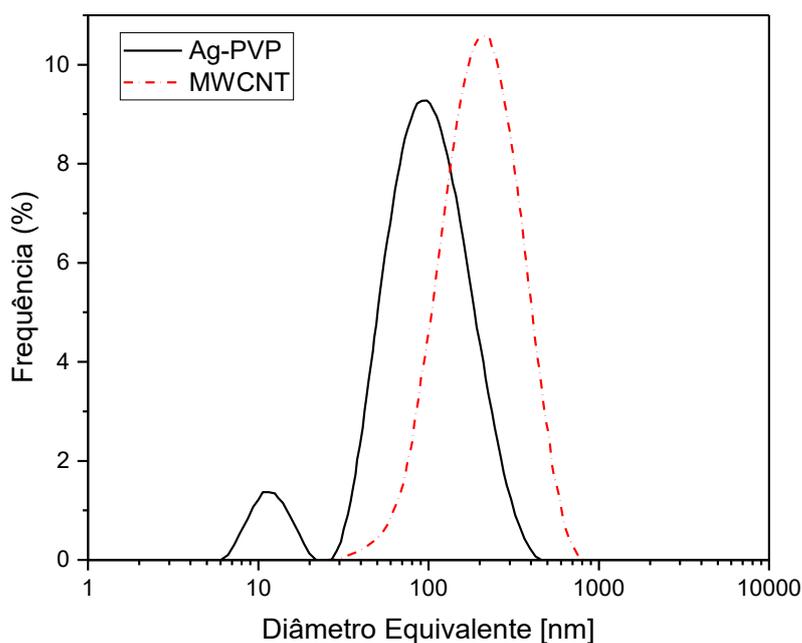


Figura 3.5 - Distribuição do tamanho das nanopartículas utilizadas. Fonte: Autor.

3.2 Estabilidade dos nanofluidos

Para avaliar a estabilidade dos nanofluidos foi utilizado o método da espectrofotometria ultravioleta visível (UV-Vis), que consiste em incidir na amostra diferentes comprimentos de onda de luz visível, nos quais ela pode ser espalhada ou absorvida por outros materiais. Esta metodologia foi utilizada pela primeira vez em nanofluidos por Jiang *et al.* (2003), e permite avaliar quantitativamente o grau de sedimentação da amostra ao longo do tempo, uma vez que for conhecida a relação inicial entre absorvância e concentração volumétrica de nanopartículas. Esta relação pode ser explicada pela lei de Beer-Lambert (Swinehart, 1962) representada na Eq. 3.3.

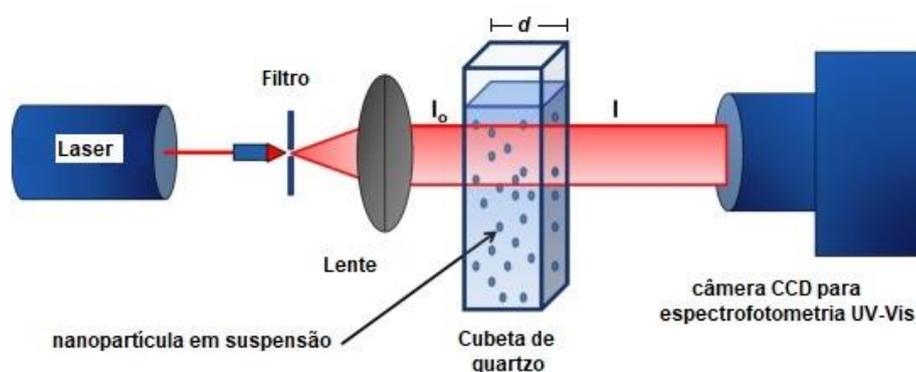
$$A = \log \frac{I_o}{I} = \epsilon c d \quad (3.3)$$

onde I_0 e I são a intensidade do feixe de medição antes e após passar pela amostra, respectivamente. O coeficiente de absorção molar é representado por “ ϵ ”, “ c ” a concentração de nanopartículas e “ d ” trajeto do feixe de medição na amostra.

O equipamento utilizado para realizar as medições de absorbância das amostras foi o espectrofotômetro UV-Vis 1900 da empresa SHIMADZU que possui uma faixa de medição de absorbância de -4 a 4 para comprimentos de onda de 190 nm até 1100 nm. Na Fig. 3.6 é apresentada uma fotografia do equipamento utilizado (a) e um desenho esquemático de como é realizado o procedimento para medição de absorbância (b).



(a)



(b)

Figura 3.6 - a) Espectrofotômetro UV-Vis 19000. b) Desenho esquemático de medição de absorbância. Fonte: Autor.

O espectro obtido no ensaio UV-Vis se caracteriza como uma banda larga de máximos centrais parecido com funções gaussianas, conhecidas como bandas de absorção. A posição da banda de absorção corresponde ao comprimento de onda da radiação, cuja energia necessária é igual àquela necessária para ocorrer uma transição eletrônica conforme as propriedades ópticas da nanopartícula.

As amostras de nanofluido preparadas foram caracterizadas com base em seu espectro de absorção óptica para comprimentos de onda na faixa de 190- 1000 nm, em uma cubeta de quartzo com 10 mm de caminho óptico. A relação absorvância-concentração inicial após a preparação foi determinada com base no coeficiente de ajuste linear obtido a partir do ponto de máxima absorção do espectro em função da concentração volumétrica como relatado na lei de Beer-Lambert. A estabilidade coloidal de cada amostra foi analisada por um período de um mês a fim determinar o grau de sedimentação máximo a longo do tempo. Além disso, o método de espectroscopia UV-vis também foi utilizado para avaliar a estabilidade dos nanofluidos após a realização dos testes na bancada experimental.

3.3 Medições das propriedades termofísicas

Após realizar os procedimentos de preparação e avaliação da estabilidade, foram determinadas as propriedades termofísicas das amostras de nanofluido. Para isso, utilizou-se um condutivímetro e um viscosímetro disponíveis no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LESTnano), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), os quais permitiram a obtenção dos valores experimentais das propriedades mencionadas, como será detalhado a seguir.

3.3.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica de nanofluidos foi medida experimentalmente utilizando um analisador de propriedades térmicas marca *Linseis*, modelo THB-1 mostrado na Fig. 3.7. O equipamento baseia-se no método da ponte quente (*THB-Transient Hot Bridge*), patenteado e fornecido pela empresa *Linseis Thermal Analysis* e é considerada uma evolução do método de fio quente transiente (*THW- Transient Hot Wire*), por apresentar um resultado mais preciso e de forma rápida, sem depender da interpretação do operador. O controle de software que o equipamento contém otimiza o processo de medição com uma incerteza mínima.

O sensor THB-1 utilizado elimina em parte as desvantagens do método do fio quente, entre elas: a perda de calor entre os condutores elétricos, a baixa sensibilidade entre a temperatura e a tensão de saída do sensor e a alta sensibilidade à tensão mecânica.

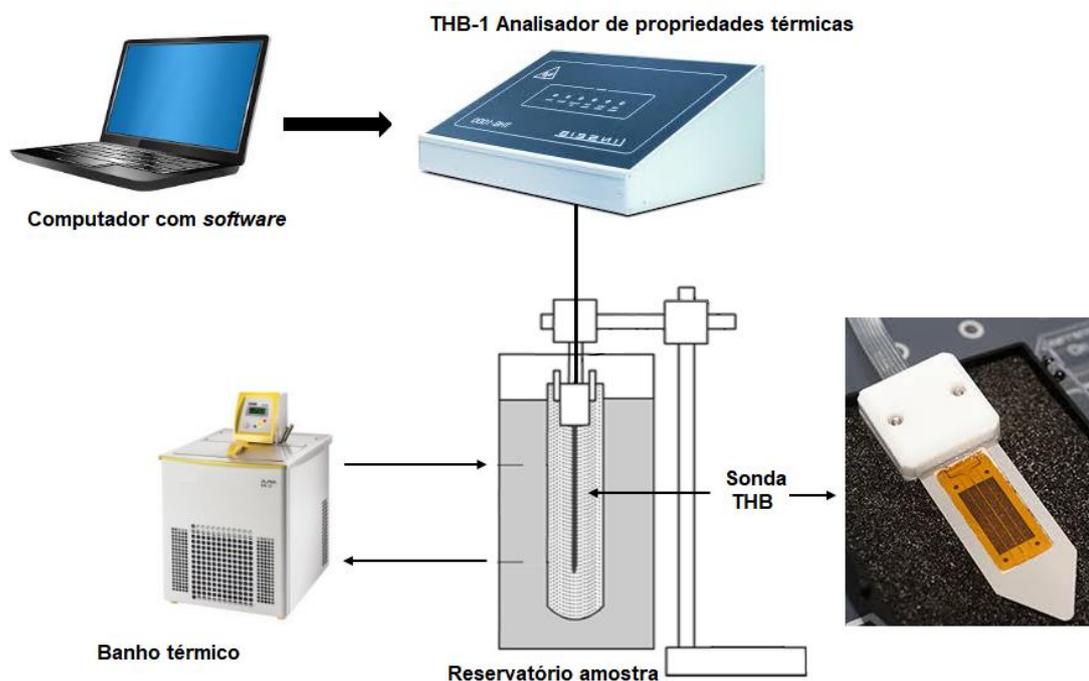


Figura 3.7 - Montagem experimental para medição da condutividade térmica. Fonte: (Oliveira *et al.*, 2021).

A sonda de medição emite um fluxo de calor constante durante um intervalo de tempo, adquirindo os valores de temperatura da amostra circundante. Por tanto, considerando um meio homogêneo e isotrópico, a condutividade térmica é estabelecida em função da relação de temperatura-tempo e das características geométricas da sonda, como mostrado na Eq. 3.4.

$$k_m \sim \frac{P_o}{L \Delta T(t)} F(t) \quad (3.4)$$

em que P_o a quantidade constante de calor por unidade de tempo e unidade de área, L é o comprimento de cada resistor da ponte, t é o tempo considerado a partir da liberação da corrente, ΔT a temperatura média, $F(t)$ é uma propriedade que depende da geometria do sensor, k_m é a condutividade térmica do material cuja condutividade pretende-se determinar.

Durante o processo de medição de condutividade térmica, descrito na Fig. 3.7, o sensor é introduzido na cavidade do reservatório onde é colocada a amostra de aproximadamente 20 ml. O reservatório, fabricado em aço inox, possui dupla parede permitindo que ocorra a troca calor com o fluido vindo do banho térmico até atingir a temperatura de referência desejada. O banho térmico utilizado é do modelo MQBMP – 01, produzido pela empresa *MicroQuímica Ltda.*

O medidor de condutividade térmica THB-1 é diretamente conectado ao computador, o qual contém um software próprio para controle dos parâmetros de testes e visualização dos resultados. A medição é realizada de modo automático assim que as condições de teste são alcançadas. As faixas de incerteza de medição, fornecidas pelo fabricante, para o equipamento utilizado são apresentadas na Tab. 3.4.

Tabela 3.4 - Especificações do medidor de condutividade térmica THB-1 fornecidas pelo fabricante.

Parâmetro	Faixa de medição	Incerteza de medição
Condutividade térmica	0,01 a 1 W/mK	< 2%
Difusividade térmica	0,05 a 10 mm ² /s	< 5%
Calor específico	100 a 5000 kJ/m ³ K	< 5%

A condutividade térmica dos nanofluidos foi determinada em uma faixa de temperatura entre 30°C e 80°C, com intervalos de 10°C. Para cada valor de temperatura avaliado, foram realizadas 20 medições. Os valores apresentados da condutividade térmica foram obtidos pela média aritmética das medições realizadas, após o tratamento estatístico. Infelizmente, devido às limitações do equipamento experimental utilizado, não foi possível obter valores de condutividade térmica para temperaturas superiores a 80°C. É importante destacar que o estudo foi realizado com o máximo de precisão possível para as temperaturas avaliadas e as conclusões são válidas para o intervalo de temperatura pesquisado.

3.3.2 Viscosidade Dinâmica e massa específica

Para a medição da viscosidade dinâmica das amostras foi utilizado um viscosímetro rotacional com cilindros concêntricos da empresa *Anton Paar*, modelo Stabinger SVM™ 3000, ilustrado na Fig. 3.8. O princípio de medição do equipamento é uma modificação do sistema Couette, baseado na medição de torque e velocidade com alta resolução. Uma célula Peltier permite amplos intervalos de viscosidade (0,2 a 20000 mPa·s) e temperatura (-56 a 105 °C) em um único sistema.

O equipamento, que precisa de uma pequena quantidade de amostra, aproximadamente 2,5 ml, também possui uma célula de medição da massa específica que opera conforme o princípio de oscilação do tubo em "U". As células de viscosidade e da massa específica são preenchidas durante o mesmo procedimento, otimizando o processo de medição e permitindo medições simultâneas.

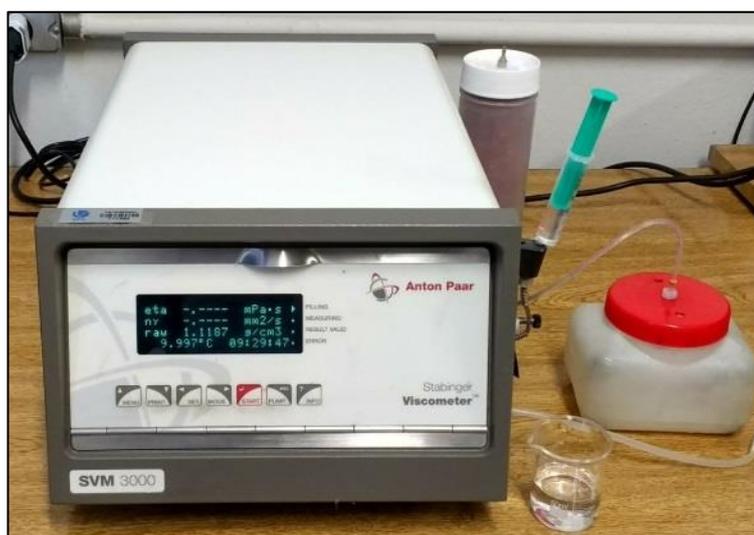


Figura 3.8 - Viscosímetro rotacional da Anton Paar SVM-3000. Fonte: Autor.

Conforme apresentado na Figura 3.9, o SVM 3000 contém um ímã em rotação, o qual cria um campo de corrente induzida com um momento de freado exato dependente das revoluções. A célula de medição da viscosidade dinâmica é preenchida com a amostra e o processo de medição é iniciado automaticamente, logo após do rotor ter atingido a velocidade constante. O design do rotor, que flutua livremente sem a necessidade de rolamentos, permite que o instrumento seja insensível a vibrações. Finalmente, a viscosidade dinâmica é determinada pelo equilíbrio entre o efeito de frenagem da corrente induzida e as forças de cisalhamento da amostra.

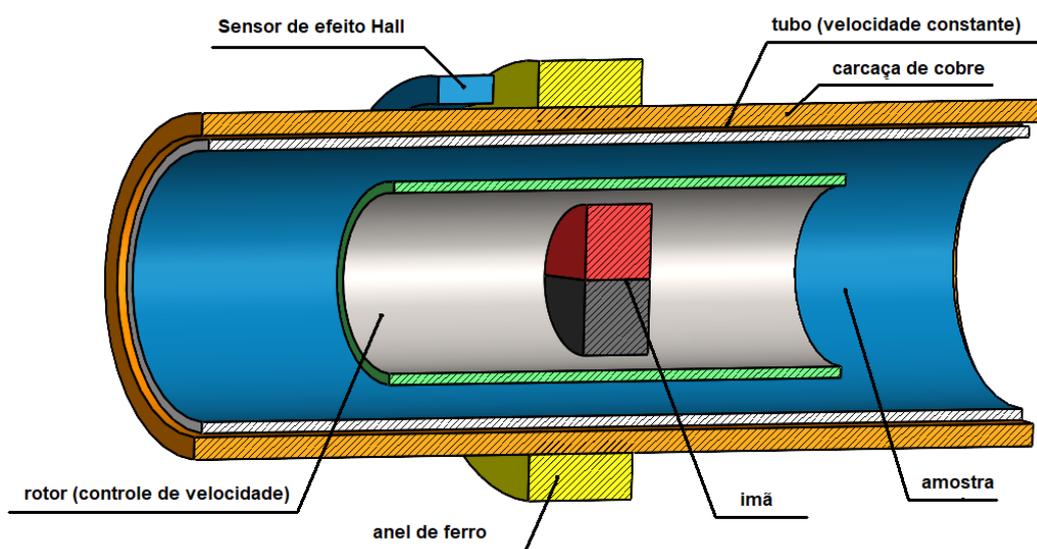


Figura 3.9 - Célula de medição da viscosidade. Fonte: Autor.

A medição da viscosidade dinâmica dos nanofluidos foi realizada em uma faixa de temperatura compreendida entre 30 – 100 °C com incrementos de 10 °C. Para cada valor de temperatura testado, foram realizadas 8 medições, de modo que, o valor da viscosidade apresentado é o resultado da média aritmética das medições. Na Tabela 3.5, é apresentada a incerteza de medição para a viscosidade dinâmica, a massa específica e a temperatura segundo o fabricante.

Tabela 3.5 - Incertezas de medição para o viscosímetro SVM 3000.

Parâmetro	Faixa de medição	Incerteza medição
Viscosidade Dinâmica	0,2 – 20.000 [mPa-s]	±0,35%
Massa específica	0,65 – 3 [g/cm ³]	±0,0005 g/cm ³
Temperatura	-56 – 105 °C	±0,02 °C

Fonte: Autor.

3.3.3 Calor específico

O calor específico das amostras de nanofluido foi determinado empregando um modelo baseado no equilíbrio térmico entre as nanopartículas e o fluido circundante dado pela Eq. 3.5.

$$Cp_{nf} = \frac{(1-\phi)(\rho Cp)_{fb} + \phi(\rho Cp)_{np}}{(1-\phi)\rho_{fb} + \phi\rho_{np}} \quad (3.5)$$

onde, ϕ é a concentração volumétrica de nanopartículas, Cp_{fb} foi o calor específico obtido da norma (ASHRAE STANDARD, 2001) para misturas de água e etilenoglicol (50:50 vol.%), ρ_{fb} é a massa específica do fluido base medida experimentalmente, Cp_{np} e ρ_{np} são o calor específico e a massa específica da nanopartícula fornecidos pelo fabricante, respectivamente.

3.4 Bancada Experimental

A bancada experimental utilizada por Oliveira (2016), disponível no laboratório LESTnano, foi adaptada para atender condições específicas de ensaio, de forma a alcançar o objetivo deste trabalho. Tal modificação consistiu em aprimorar o sistema de controle e monitoramento das variáveis de interesse, além disso, foram realizadas alterações nas tubulações e no banho térmico do circuito de arrefecimento para alcançar maiores temperaturas de trabalho do nanofluido. A Figura 3.10 mostra um diagrama esquemático da bancada experimental, constituída de dois circuitos térmicos principais: o circuito do líquido

de arrefecimento e o circuito de ar. O equipamento experimental permite avaliar o desempenho termo-hidráulico de trocadores de calor com dimensões máximas 0,75 x 0,40 m (área frontal), e que operem em temperaturas de até 105 °C.

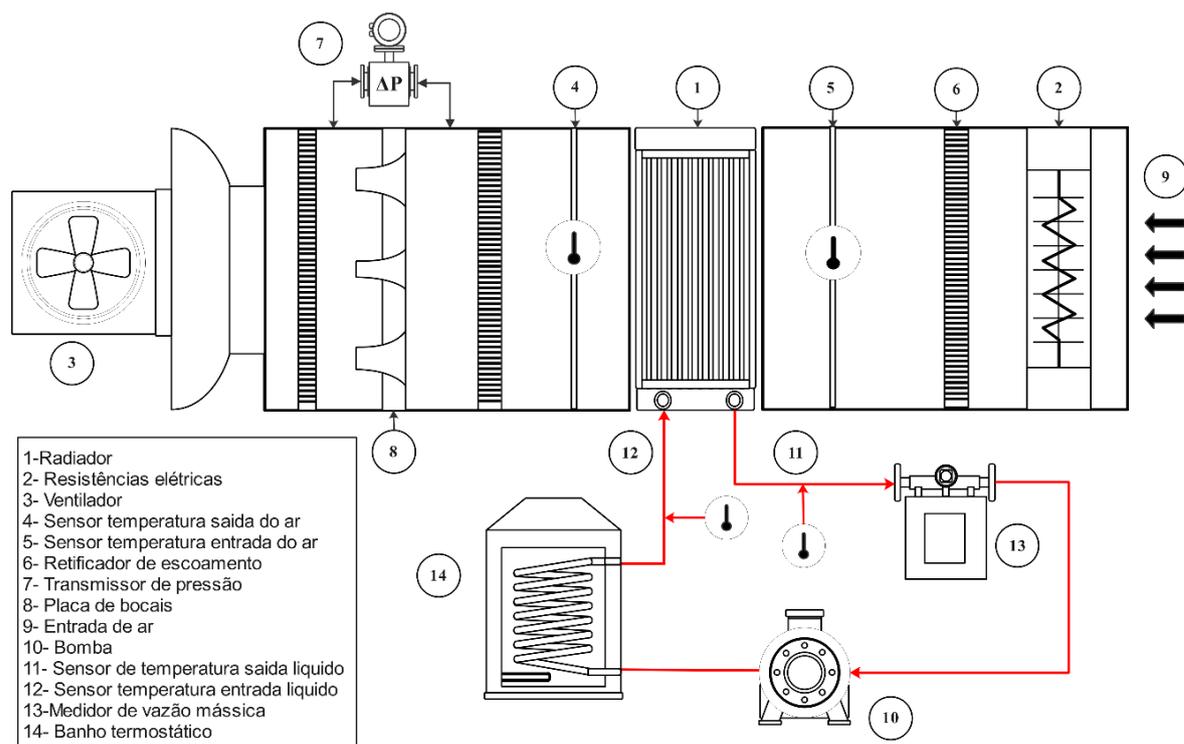


Figura 3.10 - Diagrama esquemático da bancada experimental. Fonte: Autor.

3.4.1 Circuito do líquido de arrefecimento

O circuito do líquido de arrefecimento mostrado na Fig. 3.11 é equipado com um banho termostático que possui uma serpentina interna pela qual o fluido circula, sendo aquecido até atingir a temperatura desejada na entrada do radiador. A temperatura do banho termostático foi controlada e mantida homogênea através de um termostato e uma bomba centrífuga em recirculação. O termostato digital, com controle PID (proporcional-integral-derivativo), está ligado a uma resistência de 12 kW e permite manter a temperatura do banho no valor de referência (set point) estabelecido.

O circuito também conta com uma bomba de engrenagens da série GC-M35, fornecida pela *MICROPUMP*, que possui a capacidade de fornecer vazões de até 10 L/min e suportar líquidos em elevadas temperaturas. O motor que aciona a bomba está ligado a um inversor de frequência (modelo VLT 2800 fornecido por *Danfoss*), que possibilita a variação da vazão do líquido de arrefecimento.

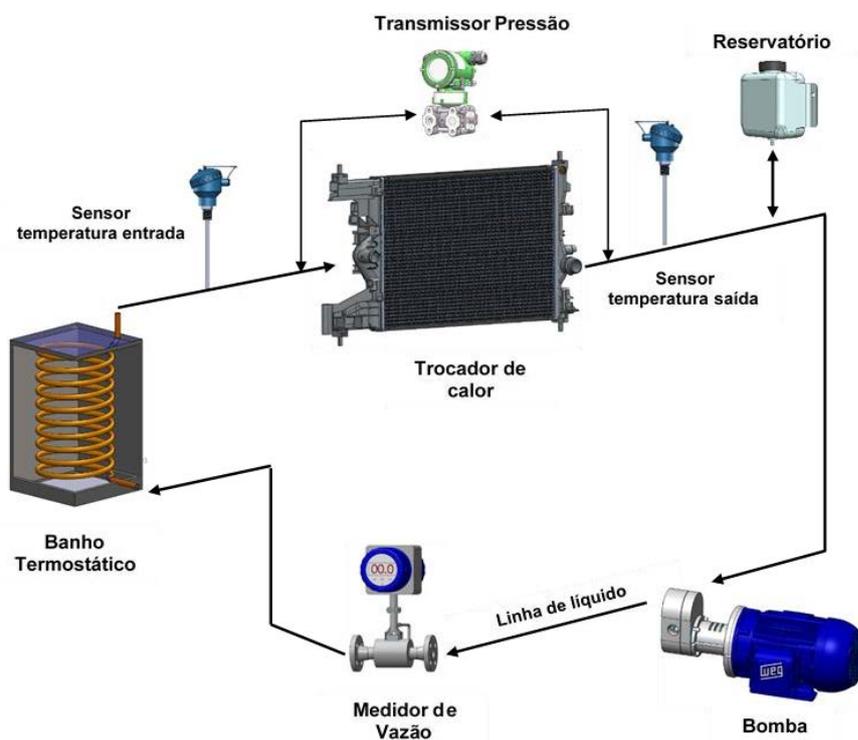


Figura 3.11 - Diagrama esquemático do circuito do líquido de arrefecimento. Fonte : (Cardenas Contreras, 2017).

A temperatura do líquido de arrefecimento foi medida diretamente com termorresistências RTD (do inglês, *Resistance Temperature Detector*) tipo PT-100, instalados na entrada e saída do radiador. Para obter uma medição direta da queda de pressão, foi instalado um transmissor de pressão diferencial, série 540 fornecido pela *ENGINSTREL ENGEMATIC*. A vazão do líquido de arrefecimento é medida por um medidor de vazão tipo Coriolis. O sensor utilizado, modelo RHM 06 da empresa *METROVAL*, é capaz de operar com alta precisão em toda a faixa de vazões analisada.

Para garantir uma leitura precisa da vazão mássica e evitar a presença de bolhas de ar no escoamento, foi instalada uma válvula eliminadora de ar no ponto mais alto do circuito hidráulico. Além disso, um reservatório de líquido é utilizado para manter a bomba afogada, controlar a pressão do sistema e monitorar o volume de fluido necessário para preencher todo o circuito. A Figura 3.12 mostra a montagem experimental onde é destacada a disposição de cada um dos componentes no circuito.

Na seção de teste e como elemento principal do circuito encontra-se o radiador. Para este estudo, utilizou-se um radiador tipicamente utilizado na linha de automóveis Fiat, mas especificamente nos modelos Palio e Uno. As características geométricas do radiador são mostradas no APÊNDICE V.

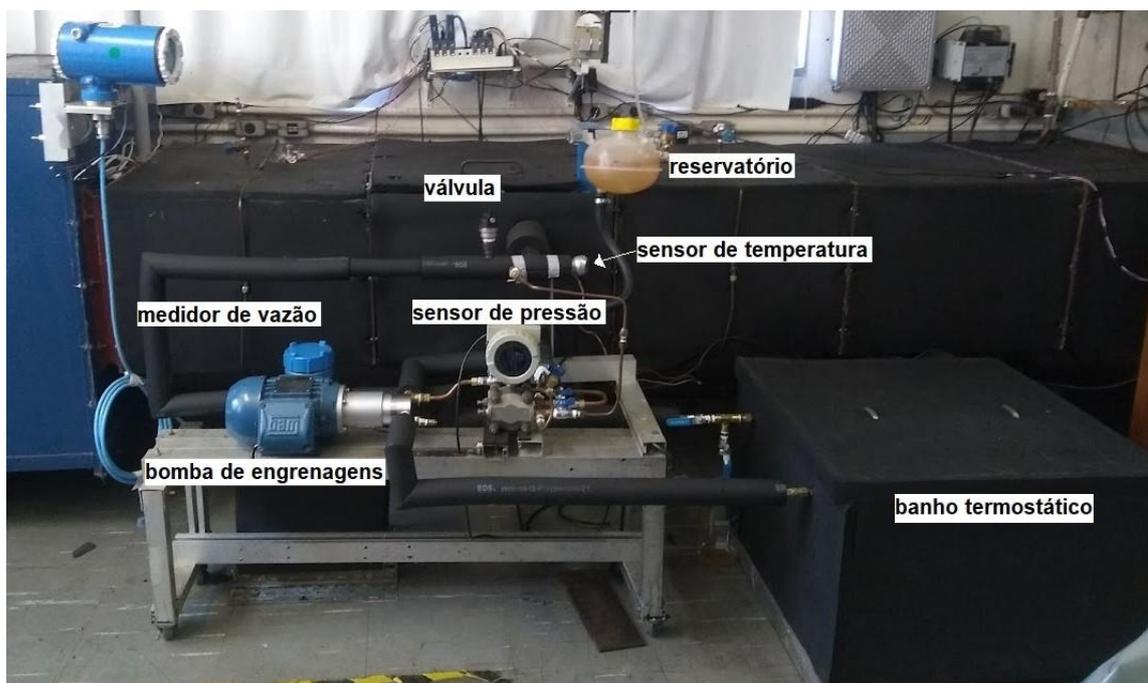


Figura 3.12 - Montagem experimental do circuito do líquido de arrefecimento.

3.4.2 Circuito de ar

O circuito do lado do ar mostrado na Fig. 3.10 é composto por um túnel de vento onde o ar, em escoamento cruzado, atravessa o radiador localizado na seção de testes. Para isso, o túnel está equipado com um ventilador centrífugo para sucção e, a velocidade do ar é controlada por meio de um inversor de frequência (VLT AQUA Drive, fornecido pela *Danfoss*) ligado ao motor de 11 kW que aciona o ventilador. Na Figura 3.13 é mostrada uma vista externa do ventilador, assim como o inversor de frequência usado para o controle da velocidade do ar. Três válvulas tipo *dampers* instaladas nas seções de admissão e descarga, permitem alternar a utilização do túnel de vento entre aberto (sem retorno de ar) e fechado (recirculação de ar). Foi utilizado apenas o sistema aberto, isso porque, a configuração experimental permite um melhor controle da temperatura de incidência do ar.

A vazão de ar foi determinada conforme a norma ANSI/ASHRAE STANDARD 41.2 (1987) utilizando bocais convergentes. Neste método o escoamento sofre uma queda de pressão ao passar pelo bocal, que pode ser correlacionada com a vazão de ar em circulação por meio da Eq. 3.6. A queda de pressão do ar na placa de bocais foi medida através de um transdutor de pressão diferencial modelo LD301, fornecido pela *SMAR*. A placa de bocais pode operar com um máximo de cinco bocais, sendo dois de 90 mm, dois de 75 mm e um de 80 mm de diâmetro de descarga. Durante a realização dos testes, um ou mais bocais são fechados para operar com vazões próximas à requerida.

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

onde $C d_i$ é o coeficiente de descarga para cada bocal calculado pela Eq. 3.8 e \dot{m}_i representa a vazão mássica para cada bocal obtida pela Eq. 3.7:

$$\dot{m}_i = \frac{A_i \sqrt{2 \rho_{air} \Delta P}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_i}{A_t} \right)^2}} \quad (3.7)$$

em que A_i representa a área do bocal medida na descarga do mesmo, A_t a área total do pleno onde a placa de bocais está instalada, ρ_{air} densidade do ar e ΔP o gradiente de pressão medido nos bocais.

$$C d_i = 0,9975 - 0,00653 \left(\frac{10^6}{Re_{d,i}} \right)^{0,5} \quad (3.8)$$

onde $Re_{d,i}$ é o número de Reynolds na descarga de cada bocal.



(a)



(b)

Figura 3.13 - (a) Vista ventilador e seção de descarga, (b) Inversor de frequência para controle da velocidade. Fonte: Autor.

No duto principal o túnel possui resistências elétricas, um misturador de ar, um retificador de escoamento, e a seção de teste onde está localizado o radiador. As resistências ligadas a um conversor de potência de 6 kW (modelo TH 8021A/50-12, fornecido pela *Therma Automação e Projetos*) permitem o controle da temperatura do ar incidente. Um controlador PID (proporcional-integral-derivativo) retroalimentado foi projetado de modo a controlar a potência dissipada pelas resistências entre zero e um valor de referência. O sinal recebido pelo conversor foi gerado por um módulo de saída de corrente analógico de 4-20 mA ligado ao software *LabVIEW®*, onde foi implementada a lógica de controle.

Na sequência, o ar passa através de misturador de escoamento que evita efeitos de estratificação da temperatura do ar, devido ao processo de aquecimento na etapa anterior. Por último, o ar passa por um retificador de escoamento tipo “colmeia” antes de chegar no radiador. A medição da temperatura do ar foi realizada utilizando duas malhas de 16 termopares cada (conforme a Figura 3.14), uma a montante e outra a jusante do radiador. Os termopares utilizados para a medição são do tipo T, modelo TT-T30SLE (fornecidos pela *OMEGA ENGINEERING, INC*). O posicionamento dos termopares está em conformidade com a norma ANSI/ASHRAE STANDARD 33 (2000). O processo de calibração dos termopares e das termorresistências (PT-100) é descrito no APÊNDICE IV. Para a medição de temperatura de bulbo úmido, utiliza-se um termo-higrômetro OMEGA RHXL3SD, capaz de fornecer também a umidade relativa do ar.

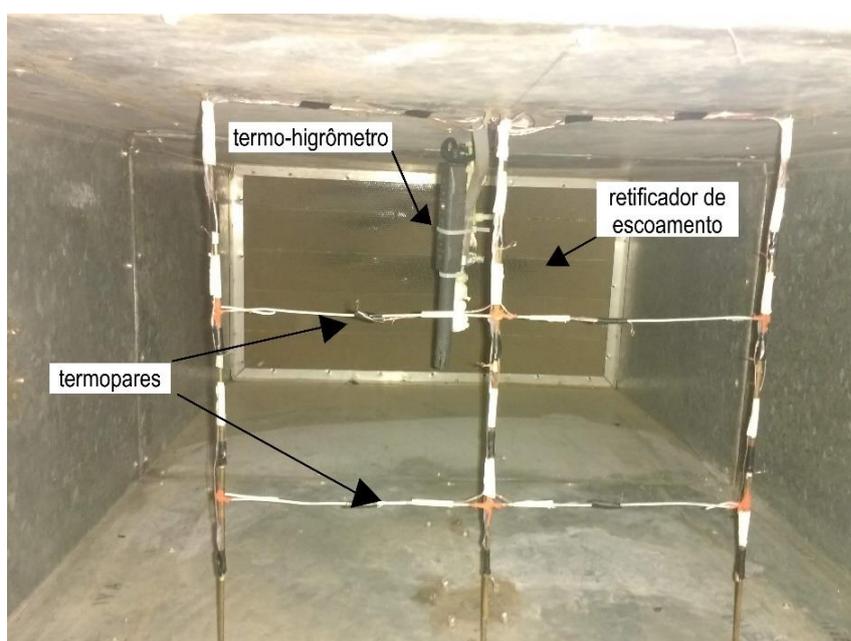


Figura 3.14 - Posicionamento da malha de termopares no duto principal do túnel de vento.
Fonte: Autor.

Por fim, a seção de testes possui dimensões de 0,40 m de altura por 0,75 m de largura e as paredes são fabricadas de chapas de aço galvanizado. Nessa região situada entre as duas grades de termopares foi adicionada uma camada externa de 32 mm de espuma elastomérica para minimizar as perdas de calor para o ambiente externo. Os dutos do túnel de vento (principal e retorno) vêm em módulos, para facilitar eventuais operações de montagem e desmontagem. Uma porta permite o acesso ao interior do duto principal onde fica a seção de testes, sem a necessidade de remoção de um módulo inteiro. As juntas das portas, assim como os flanges dos módulos, foram vedadas com borracha de silicone para evitar vazamento de ar. Na Figura 3.15 é possível observar o radiador instalado dentro do túnel de vento.



Figura 3.15 - Radiador automotivo instalado no túnel de vento. Fonte: Autor.

3.4.3 Sistema de aquisição de dados

Para o monitoramento e aquisição dos dados necessários na avaliação do desempenho termo-hidráulico do radiador, foi utilizado o software *LabView®*, promovendo uma interface homem-máquina (ilustrada na Figura 3.16), que permite a comunicação entre os equipamentos e o operador que está monitorando o processo. A partir dessa dinâmica, as informações recebidas da instrumentação instalada na bancada experimental podem ser manipuladas, monitoradas e controladas adequadamente para as variáveis de interesse.

O sistema de aquisição de dados é composto por um computador com software de programação *LabView®* e um chassi *NiDAQ-9178XT CompactDAQ* (mostrado na Figura 3.17), que permite trabalhar simultaneamente com até 8 módulos de entradas ou saídas tanto analógicas quanto digitais. O programa desenvolvido na plataforma de programação conta

com a opção de salvar dados conforme o comando do operador. Desta maneira, quando a bancada experimental atinge a condição de regime permanente, inicia-se a coleta de dados.

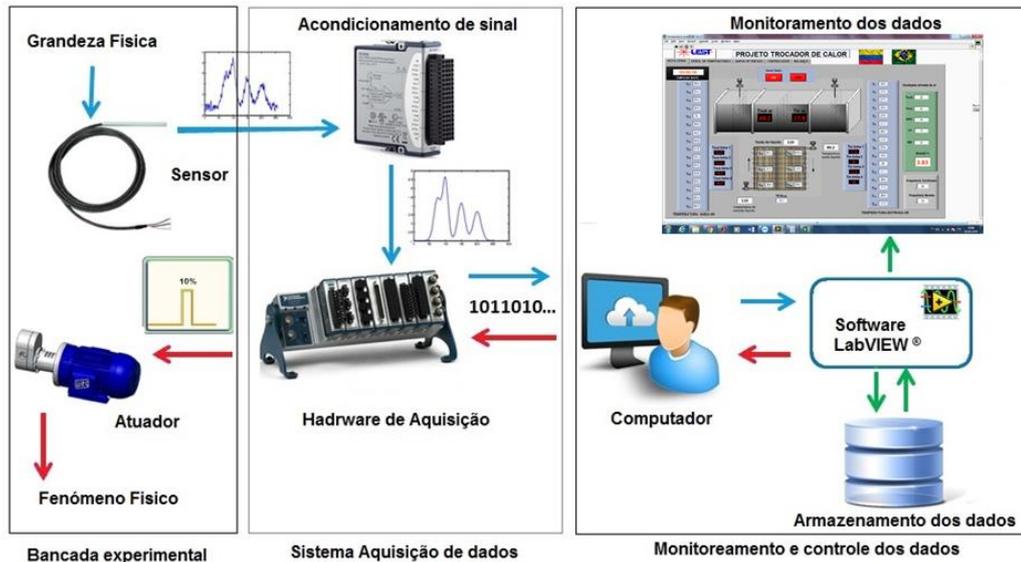


Figura 3.16 - Interface homem-máquina para aquisição dos dados. Fonte: Autor.

A placa de aquisição NI cDAQ-9178 transfere ao computador os sinais elétricos condicionados pelos módulos, permitindo que o sistema registre uma leitura de dados a cada 5 segundos. Esses dados são armazenados em uma tabela de texto no formato “.txt” para seu pós-processamento. A lista dos instrumentos e módulos utilizados são descritos na Tab. 3.6.



Figura 3.17 - Montagem do chassi NIcDAQ-9178XT CompactDAQ e módulos para aquisição de dados. Fonte: Autor.

Para o sistema de monitoramento foi possível identificar todos os 32 valores de temperaturas de entrada e saída do ar, a queda de pressão nos bocais e no radiador, temperaturas de entrada e saída do líquido de arrefecimento e a vazão mássica.

Tabela 3.6 - Módulos utilizados no sistema de monitoramento da bancada experimental.

Módulo	Instrumento	Grandeza	Circuito
NI 9214	Termopar	Temperatura	ar
NI 9203	Transmissor pressão diferencial	Pressão diferencial	Fluido arrefecimento ar
NI 9216	PT-100	Temperatura	Fluido arrefecimento
NI 9205	Medidor de vazão Coriolis	Vazão mássica	Fluido arrefecimento
NI 9265	Resistência elétrica	Potência elétrica	ar
	Inversor de Frequência	Potência elétrica	Fluido arrefecimento

Fonte: Autor.

A bancada experimental na sua forma final é apresentada na Fig. 3.18 e seu fluxograma de operação está descrito no APÊNDICE II.



Figura 3.18 - Montagem completa da bancada experimental. Fonte: Autor.

3.5 Metodologia e análise dos experimentos

Após realizadas as modificações e aprimoramento da bancada experimental, foram efetuados os ensaios iniciais com água destilada, testando possíveis vazamentos e, posteriormente analisando as condições de operação.

Com o objetivo de avaliar a transferência de calor e a potência de bombeamento do sistema, a bancada experimental foi inicialmente validada utilizando água destilada e uma mistura de água/etilenoglicol (50:50 vol.%) adotando os procedimentos experimentais similares aos observados na literatura, sugeridos pela norma (ANSI/ASHRAE STANDARD 33, 2000).

Nos ensaios realizados, foi adicionado um volume de 4500 ml à bancada, quantidade considerada adequada para preencher completamente o circuito do líquido de arrefecimento. Durante o teste, todos os parâmetros foram variados para determinar a faixa de operação de cada um. Tal protocolo pretende determinar um procedimento operacional para alcançar as condições específicas de regime permanente em cada ensaio, visando replicar essa rotina nos testes subsequentes com nanofluidos. Na Tabela 3.7 são apresentadas as condições de operação estabelecidas para a caracterização e validação da bancada experimental com os fluidos de referência.

Tabela 3.7 - Condições para ensaios de caracterização da bancada experimental.

Fluido	Temperatura entrada do radiador [°C]	Vazão mássica [kg/s]	Temperatura entrada do ar [°C]
Água	50	0,05 0,1	25
	70		28
	90		
Água/Etilenoglicol (50:50 vol.%)	50	0,05 0,1	25
	70		28
	90		

Fonte: Autor.

Durante os ensaios de validação, a velocidade do ar foi mantida constante em 3 m/s. O APÊNDICE II mostra a metodologia utilizada para inicialização e critério de estabilização da bancada experimental.

3.5.1 Interpretação do modelo físico

A análise de desempenho termo-hidráulico foi feita em um radiador automotivo, utilizando como funções objetivo as taxas de transferência de calor, o coeficiente de transferência de calor do lado do líquido de arrefecimento (h_{liq}) e a potência de bombeamento.

Na Figura 3.19 é mostrado o volume de controle para a análise do radiador posicionado na seção de testes.

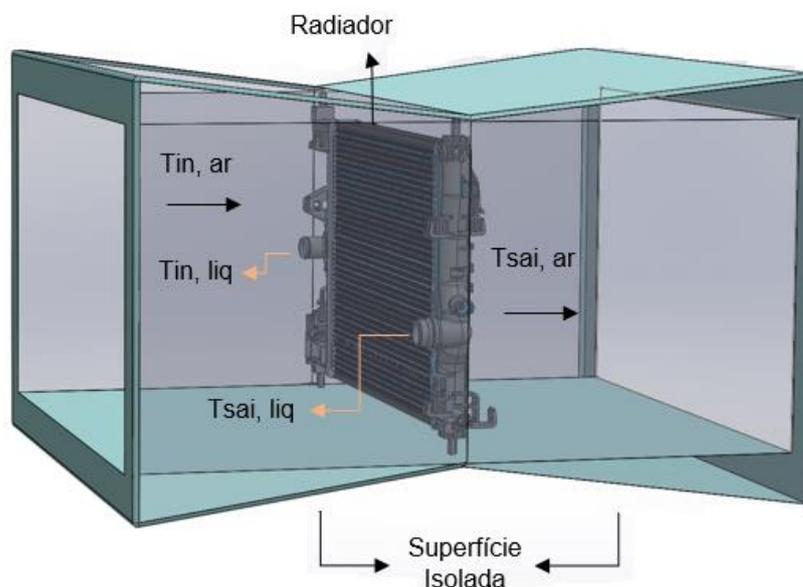


Figura 3.19 - Volume de controle para o balanço de energia na seção de testes. Fonte: Adaptado de (Cardenas Contreras, 2017).

Para uma melhor interpretação do modelo físico atual e considerando que o sistema trabalha em regime permanente e algumas hipóteses foram consideradas:

- O sistema é adiabático e as perdas de calor com o ambiente são desprezíveis;
- As velocidades e as temperaturas do líquido de arrefecimento e do ar são constantes na entrada e na saída do radiador;
- As mudanças das energias cinéticas e potencial são desprezíveis;
- A resistência térmica da parede é distribuída uniformemente em todo o trocador de calor;
- Não há mudança de fase nas correntes de fluido;
- O calor específico de cada fluido é calculado baseado na temperatura média entre a entrada e saída;
- A eficiência das aletas é considerada constante e uniforme;
- Não há reação química no sistema.

3.5.2 Fundamentos de transferência de calor

3.5.2.1 Coeficiente global de transferência de calor

Na análise de um radiador automotivo, diversas resistências térmicas estão envolvidas, contribuindo na transferência de calor entre ambos os fluidos: o ar e o líquido de arrefecimento.

Analogamente a um circuito elétrico, essas resistências estão conectadas em série, contribuindo para a resistência térmica total do sistema. Portanto, a resistência térmica total (Eq. 3.9), denotada por R_{tot} , inversa da condutância térmica total, UA , é obtida pela soma de todas as resistências térmicas individuais presentes no processo.

$$R_{tot} = \frac{1}{UA} = \frac{1}{(\eta Ah)_{liq}} + R_p + \frac{1}{(\eta Ah)_{ar}} \quad (3.9)$$

onde R_p é a resistência à condução através da parede do tubo, tipicamente caracterizada por uma elevada condutividade térmica, o que implica numa resistência térmica reduzida. O termo η é denominado de “eficiência global da superfície aletada”, associada a possível presença de aletas nas superfícies interna ou externa. As variáveis “ A ” e “ h ” são a área superficial e o coeficiente de transferência de calor por convecção de cada um dos fluidos.

3.5.2.2 O método ε -NUT

O método (ε -NUT) também foi utilizado para avaliar o desempenho térmico do radiador automotivo. A ideia de efetividade de um trocador de calor está intrinsecamente ligada à conservação de energia. É definida de acordo com a Eq. 3.10, como a relação entre a taxa real de transferência de calor, e a máxima taxa de transferência de calor que poderia ser alcançada em um trocador de calor com área infinita. A efetividade é, portanto, determinada como:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{max}} \quad (3.10)$$

As taxas de transferência de calor de ambos os fluidos, representadas por \dot{Q}_{ar} e \dot{Q}_{liq} , respectivamente, são calculadas com base na aplicação das equações de conservação de energia ao trocador de calor. Sob a premissa de capacidades térmicas constantes e ausência de mudança de fase, a taxa de transferência de calor pode ser expressa em termos da

capacitância térmica (C) dos fluidos e das temperaturas de entrada (T_e) e saída (T_s) do radiador por meio das Eqs. 3.11 e 3.12.

$$\dot{Q}_{liq} = [\dot{m} C_p (T_e - T_s)]_{liq} = C_{liq} (T_e - T_s)_{liq} \quad (3.11)$$

$$\dot{Q}_{ar} = [\dot{m} C_p (T_s - T_e)]_{ar} = C_{ar} (T_s - T_e)_{ar} \quad (3.12)$$

onde os subscritos (*liq*) e (*ar*) representam o lado do líquido de arrefecimento e ar do radiador e \dot{m} a vazão mássica.

A máxima taxa de transferência de calor, ocorre em um trocador em contracorrente com área infinita, condição em que o fluido de menor capacidade térmica (C_{min}) sofre uma variação de temperatura equivalente à diferença de temperatura máxima no trocador (ΔT_{max}). Assim, a taxa de transferência de calor real pode ser descrita pela Eq. 3.13.

$$\dot{Q}_{real} = \varepsilon \dot{Q}_{max} = \varepsilon C_{min} (T_{liq,e} - T_{ar,e}) \quad (3.13)$$

A efetividade de um trocador de calor é influenciada pela geometria do escoamento. É possível demonstrar que, para uma geometria de escoamento específica, a efetividade é determinada por dois parâmetros adimensionais: a razão entre as capacitâncias térmicas (C^*) definida pela Eq. 3.14, e o número de unidades de transferência de calor (NUT), que é um indicativo do tamanho físico de um trocador de calor definido pela Eq. 3.15.

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (3.14)$$

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}} \quad (3.15)$$

Onde UA é a condutância térmica global também comentada na Eq. 3.9.

As equações para obter a efetividade (ε) em função de NUT e C^* para diferentes configurações podem ser encontradas em (Incropera *et al.*, 2007). Neste caso o radiador automotivo foi definido em uma configuração de escoamento cruzado com ambos os fluidos não misturados, através da Eq. 3.16:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left[\left(\frac{1}{C^*}\right)(NTU)^{0.22} \left\{\exp\left[-C^*(NTU)^{0.78}\right] - 1\right\}\right] \quad (3.16)$$

Quando a relação entre as capacidades térmicas dos fluidos em trocadores de calor se aproxima de zero, a Eq. 3.16 converge para a seguinte expressão:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (3.17)$$

3.5.2.3 Balanço de energia

Para a análise da transferência calor e do balanço de energia, desprezaram-se as perdas de calor para o ambiente externo. Dessa forma, foi possível comparar as taxas de transferência de calor obtidas para o lado do ar e do líquido de arrefecimento e realizar o balanço de energia. Os resultados para o fluido base, que possui propriedades térmicas conhecidas, foram validados a partir do erro experimental do balanço de energia, determinado pela Eq. 3.18. Os valores para as taxas de transferência de calor do líquido de arrefecimento e do ar são calculados por meio das Eq. 3.11 e 3.12, respectivamente.

$$\dot{Q}_{ee} = \left| 100 \cdot \frac{\dot{Q}_{liq} - \dot{Q}_{ar}}{\dot{Q}_m} \right| \leq 10\% \quad (3.18)$$

onde \dot{Q}_m é taxa de transferência de calor média entre o ar e o líquido de arrefecimento.

Para determinar as propriedades termofísicas do fluido base, foram utilizados os bancos de dados do software *EES* e do *CoolProp*. Nos testes com nanofluidos, foi aplicado um modelo clássico baseado no equilíbrio térmico entre as nanopartículas e o fluido circundante, para determinar o calor específico das amostras, descrito na Eq. 3.5. Esse modelo considera a concentração volumétrica de nanopartículas e a capacidade térmica dos elementos presentes na suspensão. As propriedades termofísicas neste caso foram definidas à temperatura de referência, $T_{ref} = (T_{in} + T_{out})/2$.

A Figura 3.20, apresenta o desvio médio do balanço de energia dos testes realizados na bancada experimental para o fluido base.

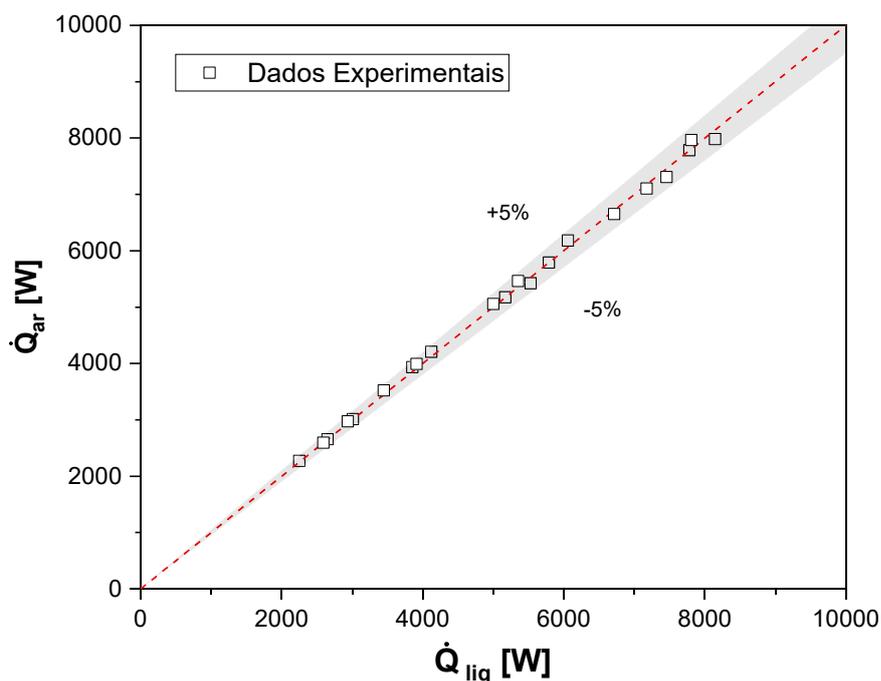


Figura 3.20 - Resultados experimentais para o fluido base relacionando a taxa de transferência de calor do lado do líquido de arrefecimento e do lado do ar. Fonte: Autor.

Conforme pode ser verificado na Fig. 3.20, o desvio médio no balanço de energia na seção de testes foi de 2,2%. Esse resultado foi considerado satisfatório, uma vez que o erro experimental foi menor que o percentual de $\pm 5\%$. É importante destacar que um isolamento térmico foi adicionado tanto na parte interna quanto externa do duto para minimizar essas perdas.

3.5.3 Queda de pressão e potência de bombeamento

A queda de pressão também é um fator essencial para a escolha dos fluidos de transferência de calor em sistemas térmicos. Como discutido no capítulo da revisão bibliográfica, a taxa de transferência de calor tem tendência de aumento à medida que aumenta a concentração de nanopartículas. No entanto, esse aumento na concentração também pode resultar em um aumento da viscosidade dos nanofluidos, o que, por sua vez, pode promover uma maior queda de pressão no sistema. Portanto, além de analisar o aprimoramento da transferência de calor, também foi examinado o efeito na queda de pressão e na potência de bombeamento. Nos testes experimentais, um sensor de pressão diferencial foi posicionado em paralelo ao radiador para medir diretamente a queda de pressão. Dessa forma, por meio da Eq. 3.19 foi calculada de maneira indireta a potência de bombeamento do sistema.

$$\dot{W}_b = \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho_{liq}} \quad (3.19)$$

onde ΔP é a queda de pressão no radiador, ρ é a massa específica o líquido de arrefecimento e \dot{m} a vazão mássica.

3.5.4 Modelo de simulação do radiador

3.5.4.1 Procedimento numérico

Para realizar a análise numérica do radiador automotivo, foi utilizado o método proposto por Navarro e Cabezas-Gómez (2005), e explicado com maiores detalhes no livro de Cabezas-Gómez et al. (2015) sobre análise térmica de trocadores de calor. O código, denominado HETE (*Heat Exchanger Thermal Efficiency*) pelos autores, é baseado na discretização do radiador em pequenos elementos de volume finito. Cada um desses elementos representa um trocador de calor de escoamento cruzado não misturado e de passagem única, como mostrado na Fig. 3.21.

As hipóteses adotadas na aplicação do modelo foram:

- O processo de transferência de calor ocorre em regime permanente;
- As perdas de calor com a vizinhança são desprezíveis;
- Não há geração de calor nem mudança de fase ambos os fluidos;
- O fluxo externo é não misturado;
- Resistências térmicas da parede e do lado do ar constantes.

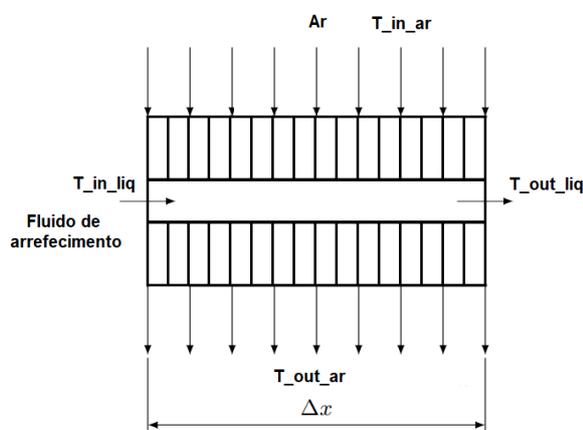


Figura 3.21 - Ilustração do elemento com as temperaturas de entrada e saída. Fonte: Adaptado de (Cabezas-Gómez *et al.* 2015).

O desenvolvimento do modelo foi baseado na divisão do trocador de calor em elementos tridimensionais finitos, cada um contendo um trocador de calor de escoamento cruzado, e o fluido de fora do tubo sendo não misturado. As equações governantes são fundamentadas na equação de conservação de energia e no uso da efetividade- número de unidades de transferência (ϵ -NTU), conforme descrito em (Kays e London, 1998). A variação de temperatura do líquido de arrefecimento não pode ser desprezada e assume uma variação linear. Seu valor médio é calculado a partir de:

$$\bar{T}_{liq}^e = \frac{T_{in}^e + T_{out}^e}{2} \quad (3.20)$$

em que, o sobrescrito “e” foi introduzido para designar um elemento cuja identificação, caracterizada pela sua localização espacial, se designa pelos subscritos (i, j ou k), da seguinte maneira:

- i representa a posição do elemento em relação ao comprimento do tubo variando de 1 até N_e .
- j representa a altura do tubo em que se encontra o elemento em relação a uma dada fileira, variando de 1 até N_f .
- k representa a fileira de tubos em que o tubo que contém o elemento se encontra variando de 1 até N_c .

É importante observar que, embora a temperatura do líquido de arrefecimento varie linearmente com o tamanho do elemento, o próprio elemento ainda deve ser pequeno em comparação com o trocador de calor simulado. Ao integrar a equação de conservação de energia para o fluido frio (ar) e quente (líquido de arrefecimento) ao longo do elemento finito, a expressão de cálculo da taxa de transferência de calor do elemento (\dot{Q}^e) e definida pela Eq. 3.21.

$$\dot{Q}^e = C_{ar}^e (\Delta T_{ar}^e) = C_{liq}^e (\Delta T_{liq}^e) \quad (3.21)$$

Dado que a vazão mássica do lado do ar no elemento diferencial é baixa, conclui-se que a razão das capacitâncias térmicas para o trocador de calor diferencial tenderia a zero e a temperatura do fluido quente permanece essencialmente constante. Dessa forma, a efetividade térmica local do trocador diferencial, Γ^e , pode ser determinada pela Eq. 3.22, que assume a seguinte expressão quando a razão das capacitâncias térmicas tende a zero:

$$\frac{\Delta T_{ar}^e}{\bar{T}_{liq}^e - T_{in,ar}^e} = 1 - e^{\left(-UA^e / C_{ar}^e\right)} = \Gamma^e \quad (3.22)$$

Observe que a temperatura do líquido de arrefecimento corresponde à temperatura média do elemento, e não a temperatura de entrada. Além disso, UA representa a condutância térmica do elemento, que incorpora os efeitos da transferência de calor por unidade de área entre o líquido de arrefecimento e o ar, combinando processo convectivos e condutivos, como descrito na Eq. 3.9.

Neste estudo, as áreas de transferência de calor do lado líquido, da parede e do lado do ar são conhecidas. Além disso, o coeficiente convectivo do lado do ar foi calculado seguindo o procedimento descrito na subseção 3.5.4.2. O coeficiente de transferência de calor do lado do líquido de arrefecimento será calculado com base nas correlações encontradas na literatura, tanto para o fluido base quanto para os nanofluidos.

O conjunto de equações governantes para cada elemento é composto pelas equações enumeradas acima (Equações 3.20 até 3.22) e pelas incógnitas $T_{out,ar}^e$, $T_{out,liq}^e$, Q^e e Γ^e . Outros parâmetros conhecidos incluem as temperaturas de entrada ($T_{in,ar}^e$ e $T_{in,liq}^e$), a área de transferência de calor, o coeficiente global de transferência de calor e as capacidades térmicas de ambos os fluidos no elemento. O procedimento alternativo apresentado por Cabezas-Gómez *et al.* (2015) para solucionar o conjunto de equações governantes baseia-se na redução do número de incógnitas e equações através do rearranjo das equações disponíveis. Esse rearranjo é realizado de modo a obter expressões explícitas para as temperaturas de saída do líquido de arrefecimento e do ar em cada elemento, como segue:

$$T_{out,ar}^e = \left[\frac{\Lambda^e + 2(1 - \Gamma^e)}{2 + \Lambda^e} T_{in,ar}^e \right] + \left(\frac{2\Gamma^e}{2 + \Lambda^e} T_{in,liq}^e \right) \quad (3.23)$$

$$T_{out,liq}^e = \left[\frac{2 - \Lambda^e}{2 + \Lambda^e} T_{in,liq}^e \right] + \left(\frac{2\Lambda^e}{2 + \Lambda^e} T_{in,ar}^e \right) \quad (3.24)$$

o parâmetro Λ^e é dado por:

$$\Lambda^e = \Gamma^e \frac{C_{ar}^e}{C_{liq}^e} \quad (3.25)$$

Para a resolução deste conjunto de equações em todo o trocador de calor, isto é, para todos os elementos interconectados, foi necessário utilizar um método iterativo desenvolvido no software EES® (*Engineering Equation Solver*). O EES é uma ferramenta eficaz na resolução de sistema de equações algébricas não lineares ou equações algébricas não lineares implícitas. No diagrama de blocos da Fig. 3.22 é apresentado o algoritmo do programa principal.

Após a leitura de todos os dados de entrada necessários, os parâmetros UA^e , C_{ar}^e e C_{liq}^e e a efetividade são calculados para um único elemento. A condutância do elemento UA^e é calculada como função dos coeficientes de transferência de calor convectivos, uma vez que se assume que a resistência térmica da parede é constante. As capacitâncias térmicas dos fluidos são calculadas considerando a vazão mássica correspondente a cada elemento. Note que para todos os casos a escolha do número de elementos deve ser suficiente para garantir que $C_{ar}^e / C_{liq}^e \leq 1$.

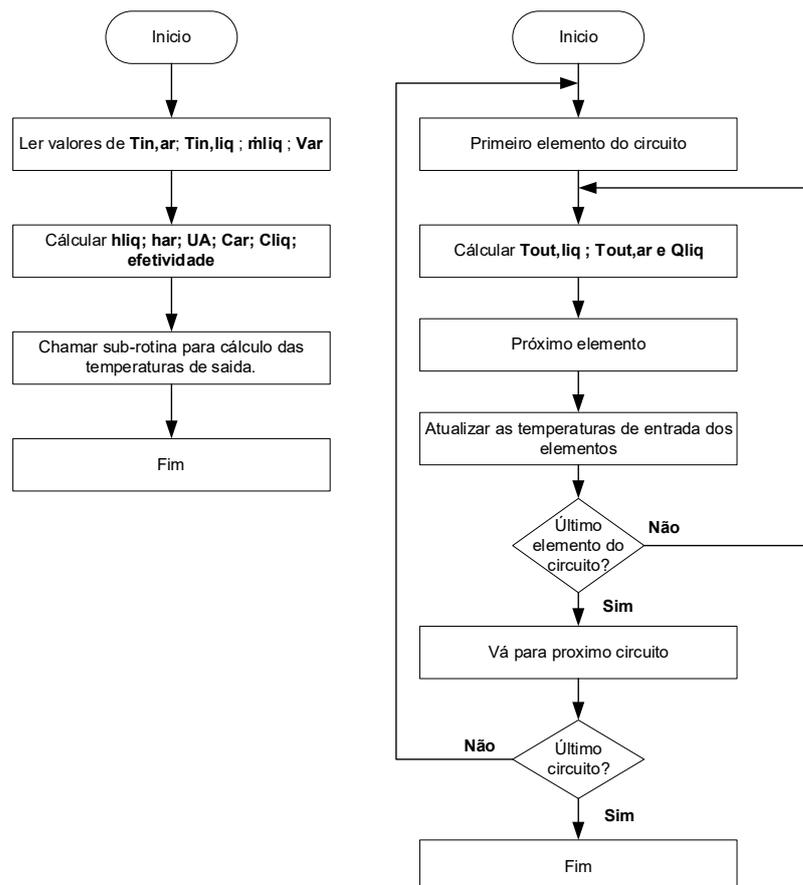


Figura 3.22 - Diagrama de blocos do programa principal (esquerda) e, diagrama de blocos da sub-rotina para cálculo das temperaturas de saída (direita). Fonte: Adaptado de (Cabezas-Gómez *et al.* 2015).

No próximo passo a distribuição de temperaturas no radiador é determinada iterativamente seguindo o sentido do escoamento do líquido de arrefecimento, aplicando as Eqs. 3.23 e 3.24. Uma vantagem desse método é que a distribuição de temperatura é determinada assumindo as propriedades termodinâmicas variáveis. Como resultado os parâmetros UA^e , C_{ar}^e , C_{liq}^e , Γ^e e \dot{Q}^e variam localmente.

Na Figura 3.23 está ilustrado o modelo discretizado para o radiador automotivo. Nele, é possível observar que, independentemente da posição do elemento tubo, a temperatura do ar ($T_{in,ar}$) será sempre a mesma para o primeiro tubo (i), enquanto a temperatura do líquido de arrefecimento ($T_{in,liq}$) corresponderá ao valor na saída do elemento anterior, com exceção do primeiro elemento, que receberá a temperatura inicial de entrada. No caso do segundo tubo (j), a temperatura de entrada do ar será o valor que corresponde a temperatura de saída do ar no elemento do tubo anterior (i).

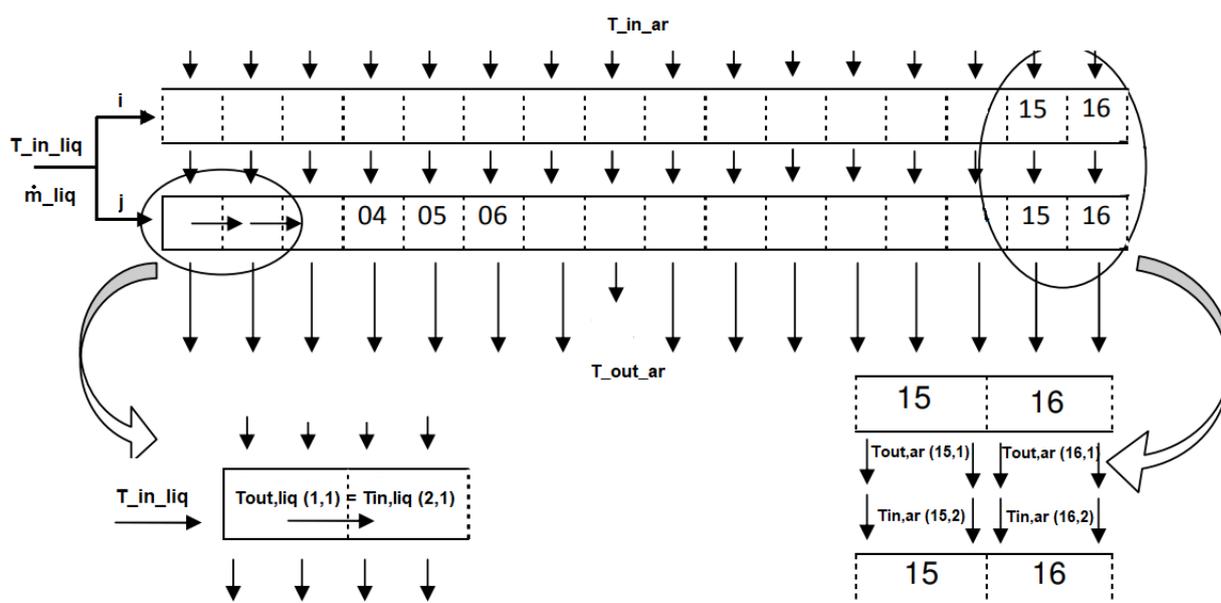


Figura 3.23 - Distribuição de temperaturas para o líquido de arrefecimento e do ar em um trocador de calor de duas fileiras. Fonte: Adaptado de (Cabezas-Gómez *et al.* 2015).

3.5.4.2 Cálculo coeficiente de transferência de calor do lado do ar

O coeficiente de transferência de calor por convecção médio do lado do ar foi determinado pelo método de Wilson modificado proposto por (Briggs e Young, 1969). Esse método é utilizado para determinar correlações para os coeficientes médios de transferência de calor (Nusselt médios) para um ou ambos os fluidos separados pela parede do tubo. A aplicação deste método é restrita às correlações de potência que definem os números Nusselt, como as propostas por (Petukhov, 1970) e (Gnielinski, 1976). O coeficiente de transferência

de calor em um lado da parede varia durante as medições devido a variações na velocidade do fluido, enquanto deve ser mantido constante do outro lado. A resistência térmica global pode ser expressa pela Eq. 3.9.

Devido ao fato de que a viscosidade do ar e outras características físicas não variam substancialmente com a temperatura, os requisitos para a constância do coeficiente de transferência de calor são totalmente atendidos no caso de um meio gasoso. Por outro lado, é difícil de manter do lado líquido, uma vez que as propriedades físicas são fortemente influenciadas pela temperatura.

O coeficiente de transferência de calor por convecção está relacionado às características do escoamento e do fluido. Tais relações podem ser expressas através dos números adimensionais como Reynolds, Prandtl e Nusselt. Assumindo que o número de Nusselt segue o mesmo formato proposto por (Dittus e Boelter, 1930), tem-se:

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} = C Re_D^m Pr^n \quad (3.26)$$

onde as constantes m , n e C são determinadas a partir dos dados experimentais. D_h é o diâmetro hidráulico e k a condutividade térmica do fluido.

Adotando as modificações feitas por Briggs e Young (1969) para escoamentos turbulentos em tubos lisos, as Eqs. 3.9 e 3.26 podem ser rearranjadas como,

$$\frac{1}{UA} - \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_p L_{tubo}} = \frac{1}{C_1 (Re^{0,8} Pr^{0,33} A \frac{k}{D_h})_{liq}} + \frac{1}{C_2 (Re^m Pr^{0,33} A \frac{k}{D_h})_{ar}} \quad (3.27)$$

onde os três fatores desconhecidos C_1 , C_2 e ' m ' podem ser determinados usando o método iterativo e análise de regressão não-linear.

Os valores médios do número de Reynolds (Re) e do número de Prandtl (Pr), tanto para o ar quanto para o líquido de arrefecimento foram calculados a partir das Eq. 3.28 e 3.29, respectivamente, encontradas em (Incropera *et al.*, 2007). As propriedades termofísicas como viscosidade (μ), a condutividade térmica (k) e o calor específico (C_p), foram determinadas a partir da temperatura média de referência, para cada caso.

$$Re = \frac{4\dot{m}}{n\pi\mu D_h} \quad (3.28)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (3.29)$$

onde n é o número de tubos do radiador.

3.6 Incertezas de medição

Na avaliação das incertezas associadas ao presente estudo, duas categorias de variáveis foram levadas em consideração: as medidas diretamente e as calculadas. Em relação às incertezas das variáveis medidas, os valores foram determinados com base nos certificados de calibração, os quais foram fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos. A Tabela 3.8 detalha tanto a faixa de medição quanto a incerteza associada a cada um dos equipamentos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3.8 - Incertezas dos parâmetros medidos.

Instrumento	Parâmetro	Faixa de medição	Incerteza
Termopar tipo T	(T_{in}, T_{out}) ar	-270 a 400 °C	±0,2 °C
RTD tipo PT 100	(T_{in}, T_{out}) liq	-200 a 500 °C	±0,2 °C
Transmissor de pressão diferencial no radiador	(ΔP) liq	0 a 17 kPa	±0,075 %
Transmissor de pressão diferencial nos bocais	(ΔP) ar	0,125 a 5 kPa	0,080 kPa
Medidor de Vazão tipo Coriolis	\dot{m}	0 a 168,6 g/s	±0,15%
Temperatura de bulbo úmido	(T_{bu})	-21,6 a 50 °C	±0,8 °C
Balança analítica (BK-500)	m	0,01 a 510 g	±0,0001 g

Fonte: Autor.

Quanto às incertezas das variáveis calculadas, esta foram estimadas seguindo o método de propagação das incertezas descrito na norma técnica do NIST(*National Institute of Standards and Technology*) de (Taylor e Kuyatt, 1994), e implementada no software EES. Esse método, baseia-se na premissa de que as medições são independentes e aleatórias.

Dessa forma, é possível determinar a incerteza de uma variável calculada utilizando a Eq. 3.30:

$$u_y = \sqrt{\sum_i^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2} \quad (3.30)$$

onde u_y denota a incerteza da variável calculada, u_{x_i} representa a incerteza da variável i correlacionada com y e $\partial y / \partial x_i$ a sensibilidade. A Tabela 3.9 apresenta a faixa de medição e a incerteza das variáveis calculadas adotada para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 3.9 - Incertezas dos parâmetros calculados.

Parâmetros calculados		
Instrumento	Parâmetro	Incerteza
Vazão do ar	\dot{m}_{ar}	±2,1%
Taxa transferência de calor do líquido de arrefecimento	\dot{Q}_{liq}	±3,6%
Taxa de transferência de calor do ar	\dot{Q}_{ar}	±4,8%
Coefficiente de térmica médio	h	±5,3%
Condutância Térmica global	UA	±4,6%
Número de Nusselt	Nu	±5,6%
Potência de bombeamento	\dot{W}_b	±0,4 %
Número de Reynolds	Re	±0,25 %

Fonte: Autor.

Mais detalhes sobre o cálculo das incertezas para cada variável são descritos no APÊNDICE III.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos neste estudo, que se concentra na medição das propriedades termofísicas e na estabilidade de nanofluidos de prata e nanotubos de carbono, bem como no seu desempenho térmico e hidráulico. Para isso, foram testadas diferentes concentrações volumétricas das nanopartículas e o desempenho foi avaliado sob diferentes condições de vazão e temperatura, como apresentado no capítulo III da Metodologia.

Os resultados são apresentados na seguinte ordem: análise da estabilidade e das propriedades termofísicas, avaliação do desempenho térmico e hidráulico e, por fim, as simulações numéricas. Juntamente com os resultados, serão realizadas discussões pertinentes, visando uma compreensão dos possíveis mecanismos que influenciam no desempenho termo-hidráulico de um radiador automotivo operando com nanofluidos, de acordo com a literatura produzida internacionalmente.

4.1 Análise de estabilidade

A produção de nanofluidos estáveis representa um grande desafio para os pesquisadores, visto que, as nanopartículas possuem alta energia superficial e tendem a se aglomerar devido às forças de atração entre elas. Para contornar essa dificuldade, abordagens recentes têm empregado métodos de tratamentos físicos e químicos visando obter uma dispersão homogênea e estável das nanopartículas (Wang *et al.*, 2023).

Neste estudo, os nanofluidos foram produzidos a partir de uma solução padrão e nanopartículas em forma de pó, disponíveis comercialmente. Para o caso dos nanotubos de carbono, a indicação do fabricante sobre a solução padrão é de que ela contém nanopartículas funcionalizadas para torná-las hidrofílicas, facilitando a dispersão em meios aquosos. Para as nanopartículas de prata em pó, a incorporação do agente surfactante polivinilpirrolidona (PVP) permite uma fácil dispersão no fluido base. Além disso, para a quebra dos aglomerados e

melhorar a dispersão das nanopartículas no fluido base, foram aplicadas técnicas mecânicas de dispersão, como a ultrasonicação e homogeneização sob alta pressão.

Após a produção dos nanofluidos, foram coletadas amostras de 50 ml, como demonstrado na Fig. 4.1, posteriormente, armazenadas em diferentes recipientes para avaliação da estabilidade dos nanofluidos em duas etapas distintas. A primeira etapa teve como objetivo verificar visualmente se as nanopartículas se sedimentavam rapidamente em um intervalo curto de tempo. Após 24 horas de preparação, sem que houvesse acumulação de nanopartículas na base dos recipientes, a segunda fase da avaliação foi iniciada. Nesta segunda etapa, procedeu-se à análise quantitativa por meio da técnica de espectrofotometria UV-vis, conforme mencionado na seção 3.2. Para esta análise, foi utilizado o espectrofotômetro UV-1900 da SHIMADZU.

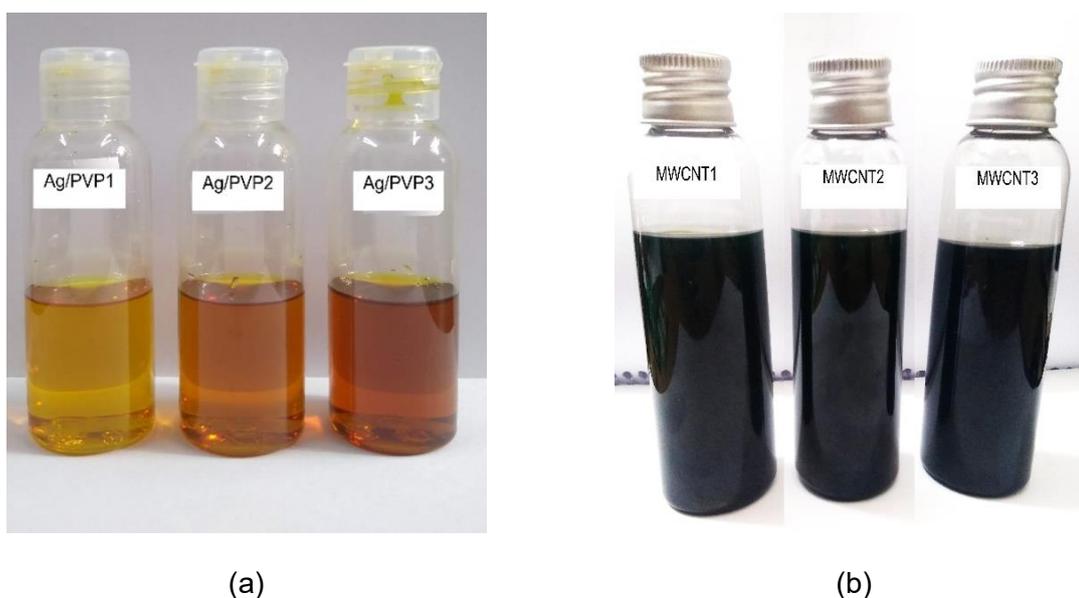


Figura 4.1 - Amostras de nanofluido de 50 ml separadas para inspeção visual da estabilidade. (a) prata, (b) nanotubos de carbono. Fonte: Autor.

Para avaliar a estabilidade, as amostras de Ag/PVP foram colocadas em cubetas de poliestireno de 4,5 ml, com um caminho óptico de 10 mm, necessárias para poder realizar a medição de absorvância com o espectrofotômetro. A Fig. 4.2a mostra os resultados das medições de absorvância para os nanofluidos de prata em uma faixa de comprimentos de onda de 300 a 800 nm. No caso das amostras contendo nanotubos de carbono, foi necessário o uso de cubetas de quartzo, pois o comprimento de onda pico de absorção para este tipo de nanopartícula ocorre a 262 nm, conforme evidenciado na Fig. 4.2c.

A escolha por cubetas de diferentes materiais se deve ao fato de que o material da cubeta também influencia na medição de absorvância, apresentando faixas de absorção distintas das nanopartículas. Especificamente, as cubetas de poliestireno, modelo K42-045 da *Kasvi*, são adequadas para uma faixa de comprimentos de onda entre 340 e 750 nm, enquanto as cubetas de quartzo, modelo K22-135, são apropriadas para uma faixa entre 190 e 2500 nm.

Nesse mesmo procedimento, foi necessário diluir as amostras de nanotubo de carbono antes de colocá-las na cubeta de quartzo, devido à coloração considerada muito escura, que poderia interferir na faixa de medição do espectrofotômetro. Assim, a partir de uma concentração inicial estabelecida, cada amostra foi diluída em uma proporção 1:40 com o fluido base, a fim de obter a absorvância da amostra sem saturar o espectro de medição. Todas as medições foram realizadas à temperatura ambiente variando entre 25 °C e 30 °C.

Com o propósito de avaliar a concentração relativa de nanopartículas de prata em suspensão ao longo do tempo, foi realizada uma regressão linear entre a concentração de nanopartículas e sua absorvância no comprimento de onda pico, encontrado em 415 nm, baseado nos dados coletados no primeiro dia de teste. A Figura 4.2a ilustra essa relação linear entre as variáveis, com o coeficiente de regressão, fixado em 61,77. Por sua vez, na Fig.4.2b, é possível observar a variação da absorvância após trinta dias. Ao longo deste período, a concentração relativa mínima atingida foi de 0,81, indicando uma sedimentação máxima de 19% para a amostra Ag/PVP3. Com isso, a relação entre a absorvância e a concentração de nanopartículas de prata demonstrou ser linear, em conformidade com a lei de Beer-Lambert.

Os resultados da medição de absorvância para as amostras de prata corroboram com a teoria discutida por Paule Pileni (1998), sobre as propriedades ópticas para nanopartículas metálicas. Segundo o autor, para nanopartículas de prata com diâmetro < 20 nm, o aparecimento de bandas de absorção centradas próximas a 400 nm, está relacionado com o formato e material das nanopartículas. Além disso, a detecção no espectro de dois ou mais picos de absorção sugere a presença de nanopartículas não esféricas e anisotrópicas. Observações semelhantes foram feitas por Singh *et al.* (2015) trabalhando com nanopartículas de prata, utilizando PVP como agente estabilizante. Os autores observaram que a concentração de PVP também pode induzir ao aparecimento de picos de absorvância em outros comprimentos de onda, devido à aglomeração de nanopartículas promovida pelos condensados de PVP.

A Figura 4.2d ilustra a variação da concentração relativa das amostras de nanotubo de carbono. De forma análoga ao procedimento realizado para as nanopartículas de prata,

utilizou-se o coeficiente de regressão linear para determinar quantitativamente o grau de sedimentação ao longo do tempo.

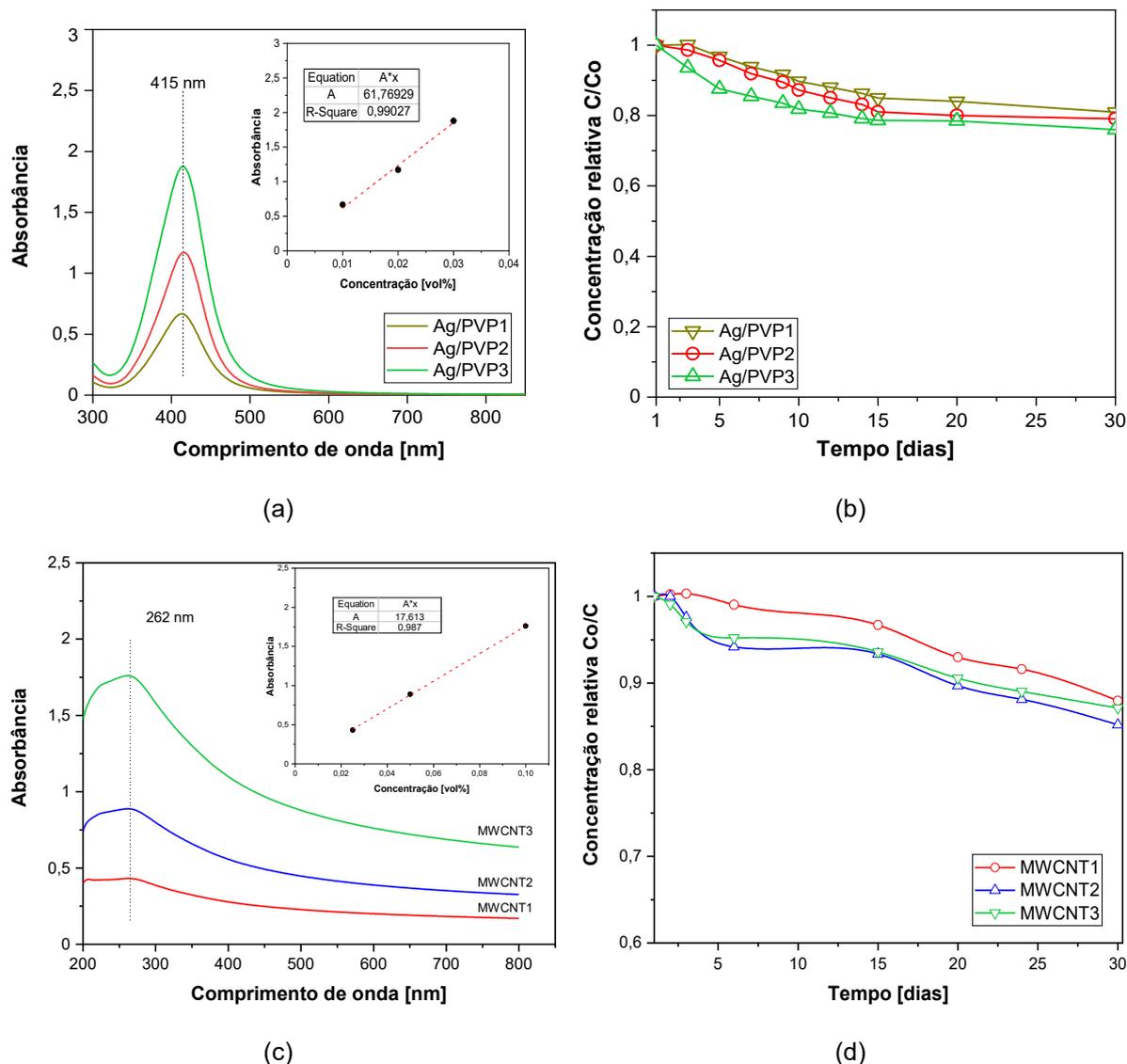


Figura 4.2 - Absorbância de UV-VIS dos nanofluidos (a) Ag/PVP (c) MWCNT. Concentração relativa vs o número de dias após a preparação (b) Ag/PVP e (d) MWCNT. Fonte: Autor.

Foi constatado que, após o término de 30 dias, a concentração relativa diminuiu em um máximo de 10%, para a amostra MWCNT2. Esta observação está em concordância como os estudos de Choi *et al.* (2018) e Kumar *et al.* (2017), que investigaram nanofluidos com nanotubos de carbono e também notaram que o pico de absorção próximo dos 260 nm. Além disso, em ambas as pesquisas foram utilizados surfactantes com o intuito de preservar a estabilidade das nanopartículas em meio aquoso, ressaltando a importância deste aditivo para a manutenção das propriedades dos nanofluidos ao longo do tempo. Essa consistência nos

resultados reforça a validade dos modelos de regressão linear para a previsão do grau de sedimentação das nanopartículas.

Em geral, pela Fig. 4.2, foi possível verificar uma redução na concentração relativa ao longo de um mês (30 dias), com um máximo observado em 10% para os nanotubos de carbono e 14% para as nanopartículas de prata. Visualmente também não foi notada aglomeração ou decantação de nanopartículas na amostra, o que confirma que as amostras apresentam uma boa estabilidade durante o período analisado.

4.2 Propriedades termofísicas

Nesta seção, serão apresentados os resultados experimentais das propriedades termofísicas dos nanofluidos preparados. Os dados serão mostrados em função da temperatura e concentração, os parâmetros mais influentes sobre a viscosidade e a condutividade térmica de nanofluidos, conforme indicado pela comunidade científica na revisão bibliográfica.

Os resultados experimentais das propriedades termofísicas do fluido base foram comparados com os dados obtidos através do *CoolProp*, um software de código aberto que contém bibliotecas com informações sobre as propriedades termofísicas de vários fluidos, incluindo misturas de água e etilenoglicol (Bell *et al.*, 2014). As bibliotecas fornecem parâmetros experimentais provenientes de fontes como a ASHRAE (do inglês, *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*). Além disso, será analisado o comportamento dos modelos teóricos desenvolvidos para estimar as propriedades termofísicas dos nanofluidos. As propriedades termofísicas das nanopartículas, necessárias para o cálculo teórico, foram disponibilizadas pelo fabricante.

4.2.1 Condutividade térmica

As medições da condutividade térmica tanto para o etilenoglicol puro quanto para o fluido base (H₂O/EG 50:50% vol.), foram realizadas em uma faixa de temperatura entre 30 °C e 80 °C, com incrementos de 10 °C. Os resultados apresentados são a média de dez medições realizadas para cada temperatura.

O método transiente da ponte quente THB (do inglês *Transient Hot Bridge*) demonstrou sua viabilidade para medir a condutividade térmica do fluido base, devido aos valores experimentais da condutividade térmica apresentarem um desvio médio de apenas 3% em relação aos valores de referência. A Figura 4.3 ilustra a comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os encontrados nas bases de dados do *EES* para o caso do etilenoglicol puro e do *Coolprop* para o caso da mistura de água e etilenoglicol (50:50 vol. %).

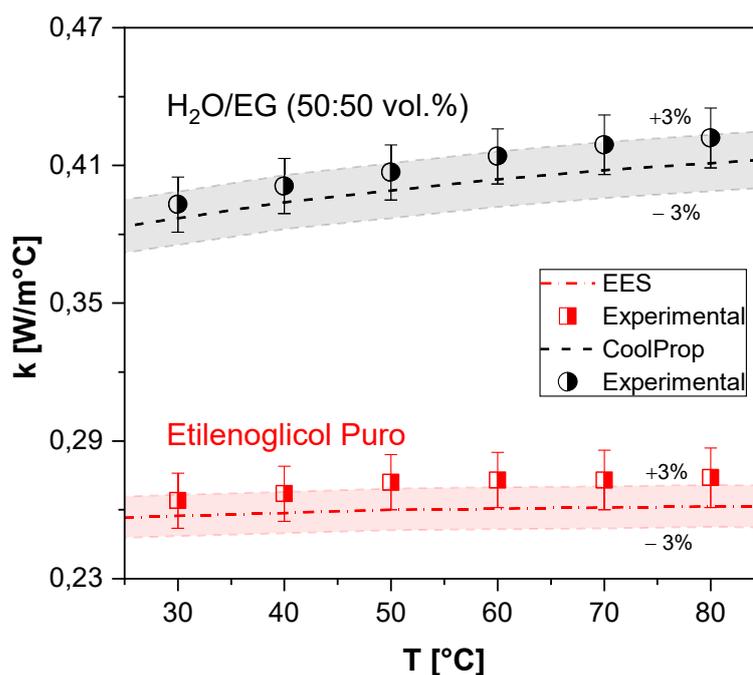


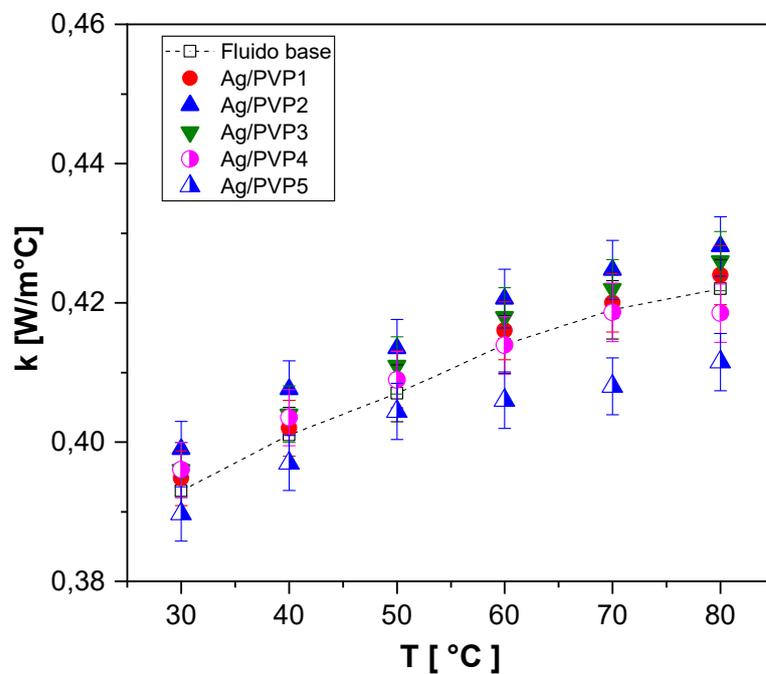
Figura 4.3 - Validação dos resultados experimentais para a condutividade térmica do etilenoglicol puro e do fluido base (H₂O/EG 50:50 vol.%). Fonte: Autor.

A Figura 4.4 apresenta os resultados experimentais da condutividade térmica das amostras de nanofluido de prata (Ag/PVP), nanotubos de carbono (MWCNT) e do fluido base, destacando as variações em função das diferentes temperaturas nas quais as medições foram realizadas.

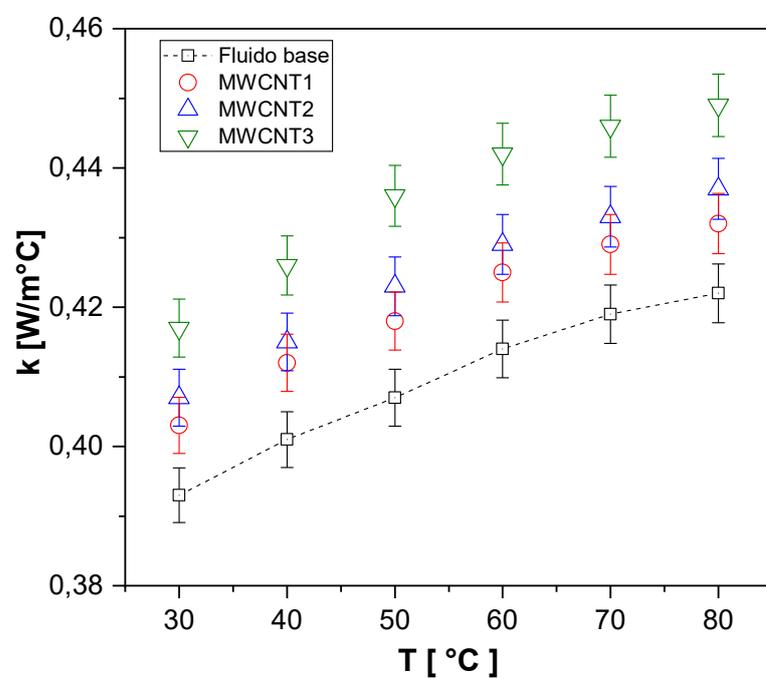
Na Figura 4.4a, sobre a condutividade térmica das amostras de nanofluido de prata, pode ser observado um comportamento anômalo, caracterizando-se pela falta de uma tendência de aumento em função da temperatura ou da concentração de nanopartículas. Sob condição de temperatura de 30 °C, a amostra Ag/PVP2 com uma concentração volumétrica de 0,002% foi a que apresentou o melhor comportamento, com apenas 2% de incremento em comparação ao fluido base. A amostra Ag/PVP3, com uma concentração de 0,003%, teve um incremento máximo de em média 1%. Além disso, acima de 35 °C, as amostras Ag/PVP4 e Ag/PVP5 tiveram uma tendência à degradação conforme a temperatura foi aumentada. O decremento máximo observado foi de 3% a 70 °C.

O comportamento anômalo observado para os nanofluidos de prata pode ser atribuído a quantidade inadequada ou alta concentração de surfactante presente na amostra. Esta hipótese é sustentada pelo fato de que as amostras com maior concentração de surfactante apresentaram menor condutividade térmica em relação ao fluido base. Do mesmo modo, é reforçada pela observação de que a amostra Ag/PVP2 mostrou ter um ligeiro aumento na

condutividade térmica quando comparada com à amostra Ag/PVP3, apesar de ter uma concentração de nanopartículas menor.



(a)



(b)

Figura 4.4 - Condutividade térmica dos nanofluidos em função da temperatura. (a) Prata (Ag/PVP). (b) Nanotubos de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.

Este comportamento é consistente com o argumentado por Xia *et al.* (2014), que relatam a existência de uma concentração ótima de surfactante, na qual a condutividade térmica e estabilidade do nanofluido são superiores às demais concentrações. Além disso, os trabalhos de Iyehraja e Rajadurai (2015) e Zhai *et al.* (2019) onde também foi adicionado PVP como surfactante, comprovaram uma redução significativa na condutividade térmica dos nanofluidos preparados em função do aumento da concentração de surfactante.

Na Figura 4.4b os incrementos obtidos para a condutividade térmica dos nanofluidos de nanotubos de carbono foram em média 2,7%, 3,7% e 6,4% para as amostras MWCNT1, MWCNT2 e MWCNT3, respectivamente. A condutividade dos nanofluidos de nanotubo de carbono mostrou uma tendência de aumento com o aumento da concentração e da temperatura. De acordo com Yu-Hua *et al.* (2008), devido ao aumento de temperatura a energia superficial das nanopartículas e a viscosidade do nanofluido diminui, tornando o movimento Browniano mais intenso. Dessa maneira, conforme a temperatura for aumentada, o movimento aleatório das nanopartículas e as colisões entre elas também aumenta, fazendo que a condutividade térmica do nanofluido seja aprimorada.

Embora os incrementos observados para as amostras de nanotubos de carbono sejam notáveis em relação às amostras de prata, eles ainda são inferiores à maioria dos resultados da literatura, conforme análise realizada por (Oliveira *et al.*, 2021). Essa diferença pode ser atribuída à presença de tensoativo ou surfactantes (entre 1,8 e 2 wt%), nas soluções altamente concentradas e funcionalizadas utilizadas na produção das amostras dos nanofluidos de nanotubo de carbono. De acordo com Chakraborty e Panigrahi (2020), embora o efeito do surfactante contribua com maior estabilidade das amostras, pode também limitar os potenciais ganhos na condutividade térmica da mistura.

Em relação ao aumento da concentração de nanotubos de carbono, os resultados foram comparados com aqueles obtidos por (Soltanimehr e Afrand, 2016). Para concentrações nanofluidos de MWCNT funcionalizados com ácido carboxílico (COOH), os autores destacam que o aumento de volume sólido, em conjunto com a interação entre os nanotubos promove ainda mais o aumento na condutividade térmica. A máxima temperatura avaliada foi de 50 °C, onde foi observado um incremento nesta propriedade de aproximadamente 10% para uma concentração de 0,1 vol%. Este comportamento também foi observado por Dehkordi *et al.* (2017), porém limitado para concentrações volumétricas de até 0,125%. Para maiores concentrações, os autores relatam que a formação de cadeias de nanopartículas no fluido base pode diminuir a relação superfície/volume, afetando a condutividade térmica da amostra.

4.2.2 Viscosidade dinâmica

A Figura 4.5 apresenta as medições de validação da viscosidade dinâmica, comparando esta propriedade para o etilenoglicol puro o fluido base água-etilenoglicol (H₂O/EG 50:50% vol.) com dados do *EES* e *CoolProp*, respectivamente. Os valores experimentais obtidos da viscosidade dinâmica do fluido base apresentaram uma discrepância em relação aos valores de referência, com desvios médios de 5% e 4%, indicando que o procedimento e equipamento experimental utilizados são adequados.

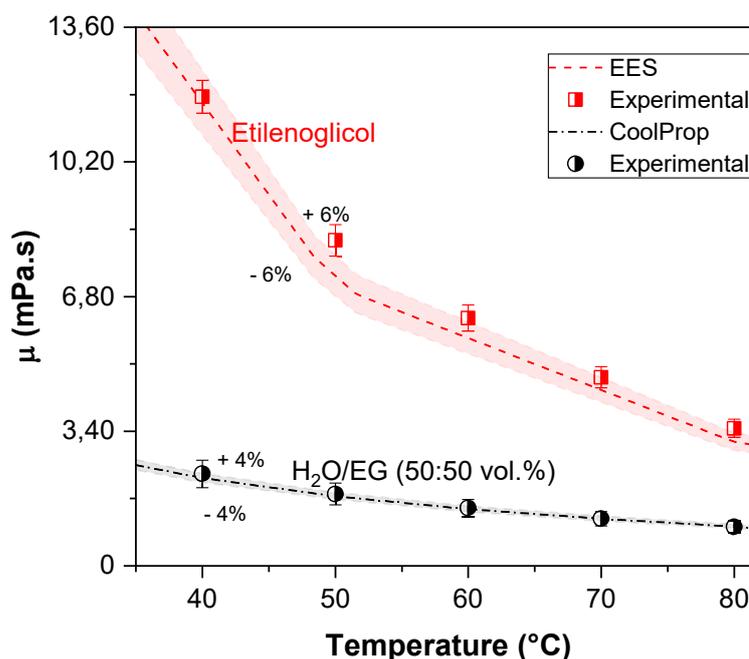
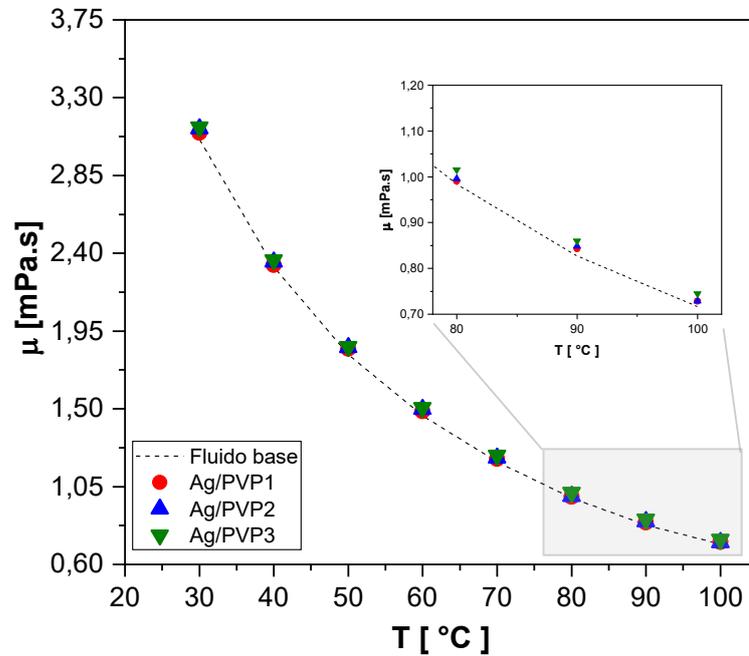


Figura 4.5 - Validação dos resultados experimentais para a viscosidade dinâmica do etilenoglicol puro e do fluido base (H₂O/EG 50:50% vol.). Fonte: Autor.

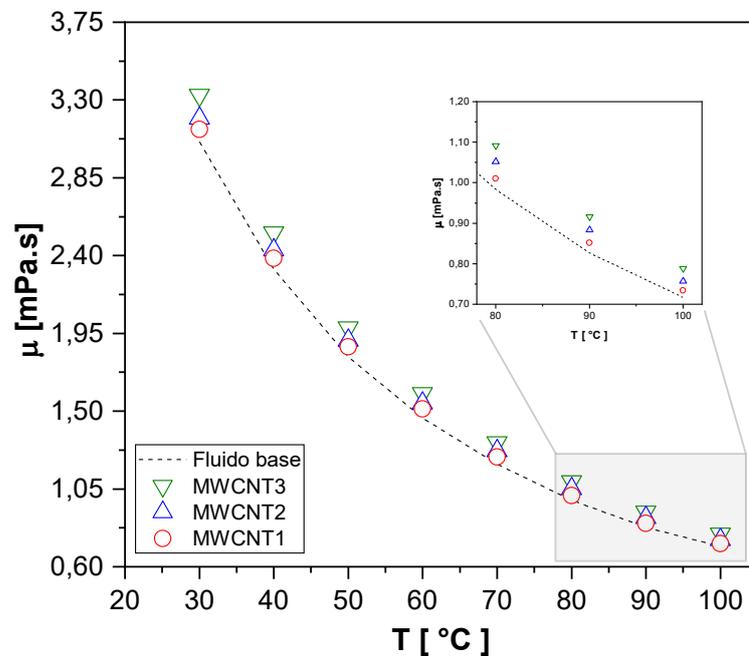
A viscosidade dos nanofluidos foi medida utilizando um viscosímetro rotacional e verificou-se um incremento nesta propriedade com relação ao fluido base, para todas as amostras de nanofluido preparadas. Na Figura 4.6a, apresentam-se os resultados experimentais da viscosidade dinâmica de amostras de nanofluido de prata. Pode-se observar que esta propriedade diminui exponencialmente tanto para os nanofluidos quanto para o fluido base, à medida que a temperatura aumenta. A avaliação da viscosidade dos nanofluidos revelou um discreto incremento em relação ao fluido base, com médias de 1,3%, 2,4% e 3,1% para as amostras Ag/PVP1, Ag/PVP2 e Ag/PVP3, respectivamente.

No caso das amostras com nanotubos de carbono (Fig. 4.6b), os incrementos foram ainda maiores, com um máximo de 11% para a amostra MWCNT3, a uma temperatura de 80 °C, quando comparada ao fluido base. Já as amostras MWCNT1 e MWCNT2 apresentaram um incremento médio de 3% e 5,8% na faixa de temperatura analisada. Além disso, a

viscosidade teve uma redução de em média 80% quando a temperatura foi variada de 30 para 100 °C, comportamento atribuído principalmente aos enfraquecimentos das forças de adesão intermoleculares como comentado por (Ijam *et al.*, 2015).



(a)



(b)

Figura 4.6 - Viscosidade dinâmica dos nanofluidos em função da temperatura. (a) Prata (Ag/PVP). (b) Nanotubos de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.

Na Figura 4.7 observa-se, de forma geral, que houve um aumento na viscosidade dinâmica dos nanofluidos quando a concentração de nanopartículas sólidas foi aumentada. De acordo com Mishra *et al.* (2014), o aumento na viscosidade dos nanofluidos quando usados em baixas concentrações não depende somente da concentração volumétrica de nanopartículas e que, fatores como forma das nanopartículas e adição de surfactante também devem ser considerados, o que dificulta prever um comportamento para esta propriedade. Resultados apresentados por Oliveira *et al.* (2021), que envolvem concentrações semelhantes de nanotubos de carbono, relataram aumentos máximos de até 9,2% na viscosidade. Em contrapartida, no trabalho realizado por Sandhu e Gangacharyulu (2017), a viscosidade dos nanofluidos de MWCNT/água-EG, com uma concentração volumétrica de 0,1%, foi examinada, resultando em aumentos de até 2%. Essas variações sugerem uma influência significativa da concentração, do tipo de surfactante e métodos de preparação, na viscosidade dos nanofluidos e, por fim, Meyer *et al.* (2016) relatam que a estabilidade também tem um impacto direto, devido à probabilidade de aglomeração e sedimentação da amostra.

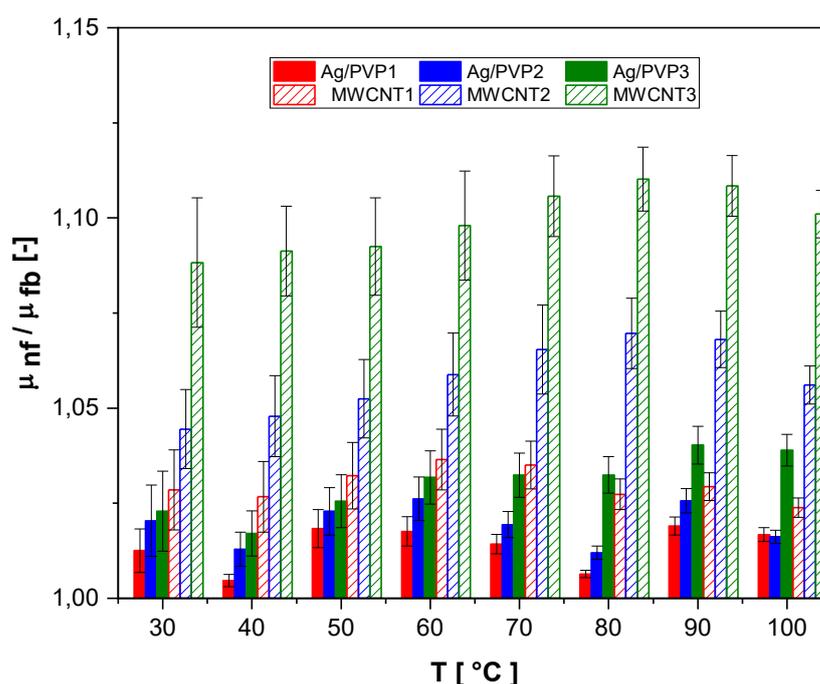


Figura 4.7 - Viscosidade dinâmica relativa dos nanofluidos. Fonte: Autor.

Esses resultados indicam, a priori, que é necessária uma maior potência de bombeamento para fazer escoar os nanofluidos. Além disso, a sensibilidade às mudanças de temperatura é um fator de grande importância para compreender o comportamento dos nanofluidos em aplicações práticas.

4.2.3 Massa específica

A massa específica dos nanofluidos produzidos foi medida utilizando a célula de medição disponível no viscosímetro Anton Paar (Modelo Stabinger™ SVM™ 3000). Na Figura 4.8 pode ser observado que a massa específica de todas as amostras diminui à medida que a temperatura aumenta, evidenciando uma relação inversamente proporcional. Além disso, a adição de nanopartículas resultou em um aumento desta propriedade para todas as amostras de nanofluido. O incremento máximo na massa específica observado foi para as amostras de nanotubos de carbono, com um valor de 0,23%. Os nanofluidos de prata apresentaram um comportamento mais próximo à do fluido base, com um incremento máximo de 0,07%. Esses resultados indicam que, dentro dessa faixa de concentrações, o aumento na massa específica dos nanofluidos é mínima.

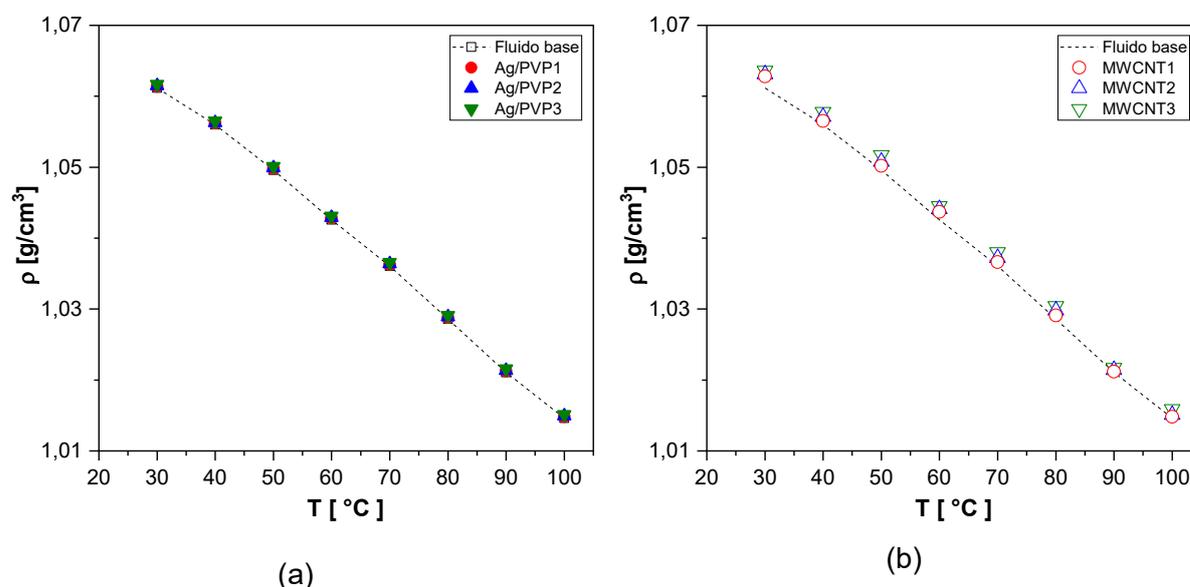


Figura 4.8 - Massa específica dos nanofluidos. (a) Prata (Ag/PVP). (b) Nanotubos de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.

A Tabela 4.1 apresenta a comparação dos incrementos relativos da massa específica obtidos experimentalmente para todas as amostras de nanofluido a 30 °C, em relação aos resultados experimentais, utilizando o modelo da regra da mistura descrito pela Eq. 2.3. Esse modelo, proposto por Pak e Cho (1998), é amplamente utilizado na determinação da massa específica de nanofluidos. Ao comparar os resultados experimentais com os resultados do modelo da regra da mistura, observa-se que o desvio máximo e o desvio médio obtidos foram de 0,94% e 0,88%, respectivamente, indicando uma boa concordância do modelo na estimativa da massa específica dos nanofluidos.

Tabela 4.1 - Comparação da massa específica entre os resultados experimentais e o modelo da regra da mistura para as amostras de nanofluido.

Amostra	Concentração [vol.%]	ρ [g/cm ³]		Desvio [%]
		Experimental	Modelo	
Fluido base	-	1,0496	1,0581	0,91
Ag/PVP1	0,001	1,0498	1,0582	0,96
Ag/PVP2	0,002	1,0499	1,0583	0,95
Ag/PVP3	0,003	1,05	1,0584	0,93
MWCNT1	0,025	1,0502	1,0585	0,98
MWCNT2	0,05	1,0508	1,0586	0,79
MWCNT3	0,1	1,0517	1,0591	0,88

Fonte: Autor.

4.2.4 Calor específico

O calor específico do nanofluido foi determinado assumindo o equilíbrio térmico entre as nanopartículas e o fluido base, mediante o modelo clássico proposto por Xuan e Roetzel (2000) descrito na Eq. 2.5. No modelo, foram utilizados os valores das medições de massa específica para os nanofluidos apresentados na Fig. 4.8 e as propriedades das nanopartículas listadas na Tab. 3.1. Os resultados do cálculo do calor específico para os nanofluidos de prata e nanotubos de carbono estão ilustrados na Fig. 4.9 .

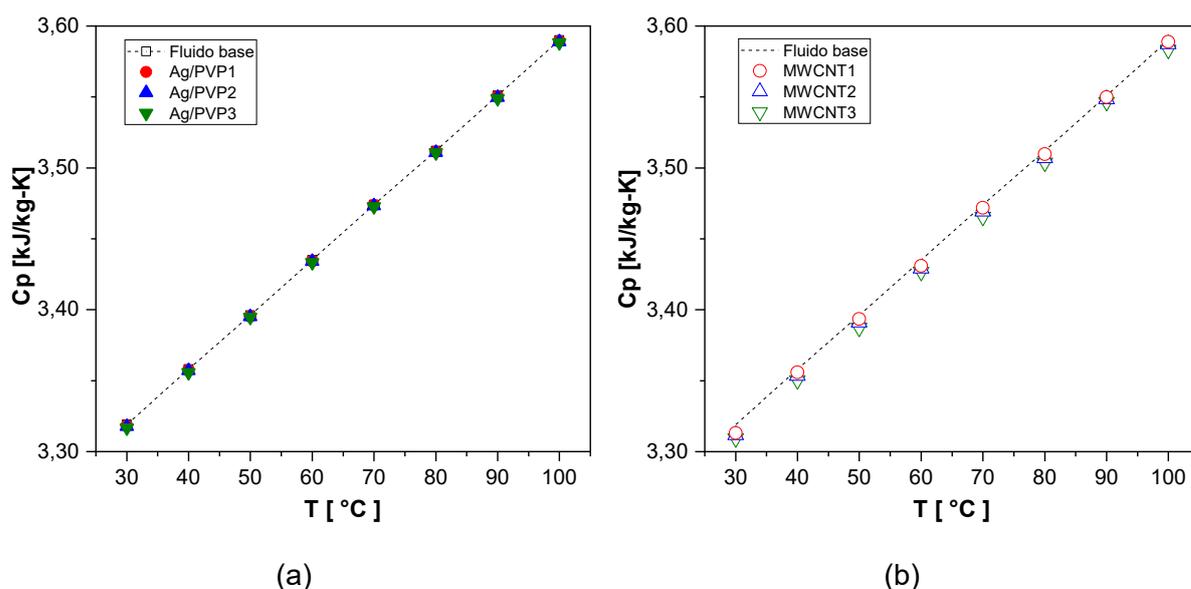


Figura 4.9 - Calor específico dos nanofluidos. (a) Prata (Ag/PVP). (b) Nanotubos de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.

Observou-se que o calor específico obtido para todas as amostras foi inferior ao do fluido base e, essa redução no calor específico dos nanofluidos ocorre devido à capacidade térmica das nanopartículas ser menor em comparação a do fluido base. Dessa forma, o modelo utilizado depende diretamente do calor específico das nanopartículas.

A Tabela 4.2 apresenta uma comparação entre os calores específicos calculados e os valores teóricos para uma temperatura de 30 °C. Os valores teóricos para o calor específico foram obtidos utilizando o valor da massa específica do fluido base encontrado na base de dados *CoolProp*, que está disponível na biblioteca da ASHRAE. Para os valores calculados, foi utilizada a massa específica dos resultados experimentais.

Tabela 4.2 - Comparação do calor específico entre os resultados calculados e o modelo de equilíbrio térmico para as amostras de nanofluido.

Amostra	Concentração [vol.%]	Cp [kJ/kg-K]		Desvio [%]
		Calculado	Teórico	
Fluido base	[-]	3,319	3,319	-
Ag/PVP1	0,001	3,3187	3,318	0,028
Ag/PVP2	0,002	3,3184	3,3177	0,038
Ag/PVP3	0,003	3,3181	3,3167	0,066
MWCNT1	0,025	3,3177	3,3132	0,17
MWCNT2	0,05	3,3164	3,3118	0,22
MWCNT3	0,1	3,3138	3,3092	0,2925

Fonte: Autor.

Revisões recentes, como as realizadas por Qiu *et al.* (2020) e Ali *et al.* (2018), ressaltam que o modelo da Eq. 2.5 é amplamente citado por pesquisadores e sua confiabilidade foi comprovada por meio de estudos experimentais. Esses estudos confirmam a validade da equação para concentrações de até 1% e apontam que fatores como a temperatura e a concentração de nanopartículas têm maior influência nos resultados.

4.3 Desempenho termo-hidráulico do radiador automotivo

4.3.1 Taxa de transferência de calor

Após validar a bancada experimental, foi possível realizar as baterias de testes e coletar os dados necessários para determinar a taxa de transferência de calor e a queda de pressão, os quais são parâmetros essenciais na avaliação do desempenho termo-hidráulico das amostras de nanofluido. Os experimentos foram conduzidos sob as condições descritas

na Tab. 4.3 . A vazão mássica e a temperatura de entrada do ar no radiador foram mantidas constantes em 0,6 kg/s e 28 °C, respectivamente. Enquanto, a umidade relativa variou entre 40 e 80%. Para cada amostra preparada, considerando o fluido base e os nanofluidos, foram realizados 36 ensaios.

Tabela 4.3 - Parâmetros operacionais para os testes com nanofluido na bancada experimental.

Amostra	Concentração [vol.%]	Temperatura entrada [°C]	Vazão mássica [kg/s]
Fluido base H ₂ O/EG (50:50 vol%)	[-]		
Prata Ag/PVP	0,001	80	0,09
	0,002		
	0,003	100	
	0,025		
	0,05		
Nanotubos de carbono (MWCNT)	0,05	105	
	0,1		

Fonte: Autor.

Na Figura 4.10 é possível observar os resultados da taxa de transferência de calor para as amostras de nanofluidos de Ag/PVP e MWCNT dos ensaios realizados a uma temperatura de entrada de 80 °C até 105 °C. Os nanofluidos contendo nanotubos de carbono apresentaram um desempenho superior na taxa de transferência de calor quando comparados com as amostras de fluido base e de prata. Isso pode ser explicado pelo fato de que as nanopartículas de MWCNT têm condutividade térmica superior às nanopartículas de prata, associado a maior concentração de nanopartículas.

Os resultados para as amostras de prata também mostraram um incremento na taxa de transferência de calor com o aumento da vazão mássica. No entanto, com o aumento da temperatura, a proporção dos ganhos em relação ao fluido base diminuiu. Para as amostras com prata (Fig. 4.10a), a Ag/PVP3 teve uma tendência de incremento de 1,28% para uma temperatura de 80 °C, demonstrando ser a que teve uma taxa de transferência de calor relativa ligeiramente superior. As amostras Ag/PVP1 e Ag/PVP2 tiveram um comportamento similar ao fluido base, com incrementos médios de 0,15% e 0,7%, respectivamente.

Com base nos resultados experimentais ilustrados nas Figs. 4.10b e 4.10c, foi observado um aumento na taxa de transferência de calor à medida que a temperatura aumentava, mantendo a vazão mássica constante. Verificou-se também que para as amostras

de prata, o comportamento continuava semelhante ao do fluido base, não havendo um impacto significativo da concentração de nanopartículas na faixa de temperatura testada (90 °C -100 °C).

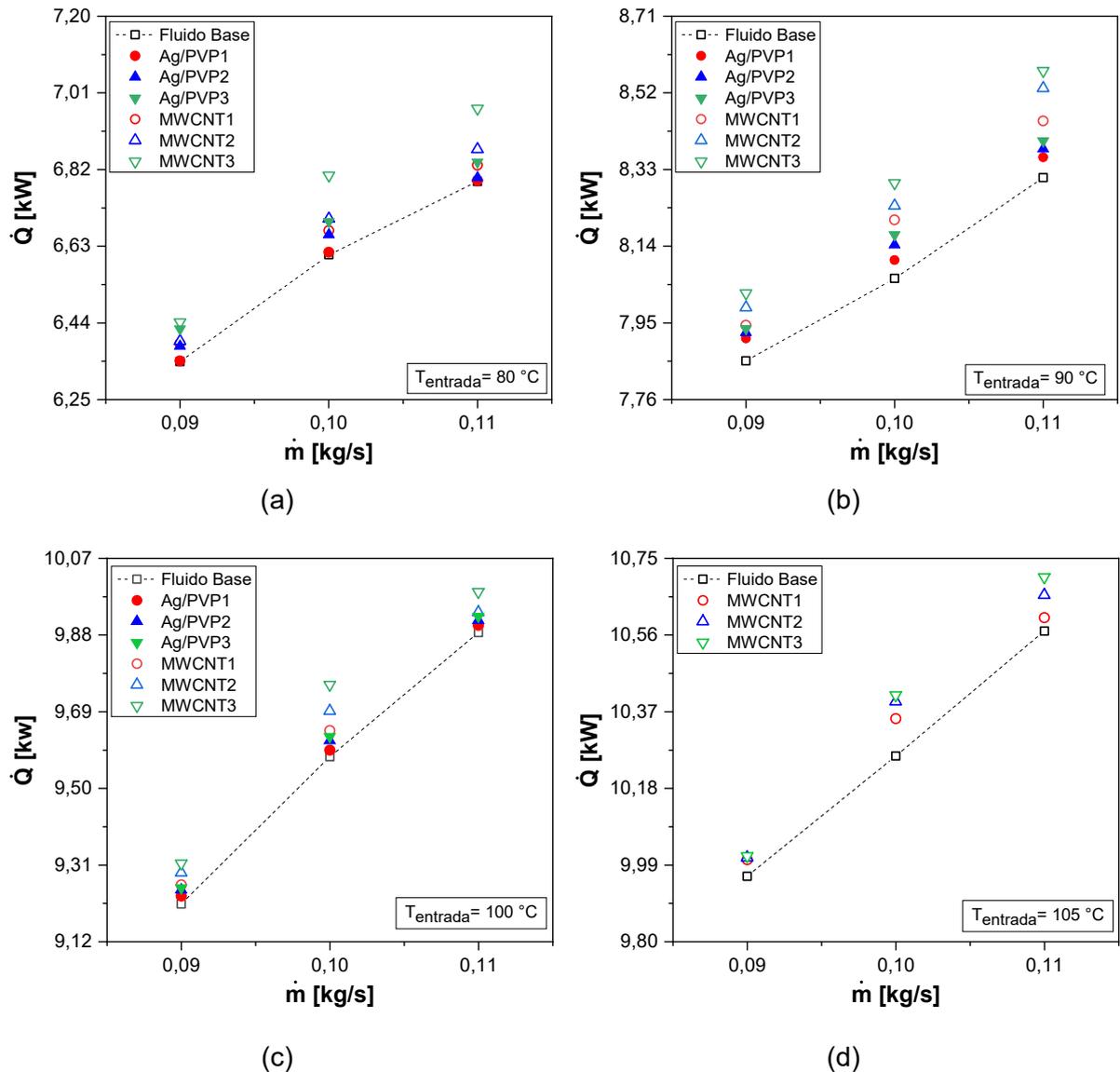


Figura 4.10 - Taxa de transferência de calor para as amostras de nanofluido. (a) 80 °C. (b) 90 °C. (c) 100 °C. (d) 105 °C. Fonte: Autor.

De acordo com Zhai *et al.* (2019), o efeito pode ser atribuído ao uso de surfactante acima de uma concentração ótima, o que resulta em uma redução da condutividade térmica devido ao aumento excessivo da viscosidade do fluido base. Esse aumento de viscosidade limita o movimento Browniano das nanopartículas, prejudicando sua eficiência na transferência de calor. Uma revisão sobre a aplicação de surfactantes, realizada por Said *et al.* (2022) reforça a ideia de que uma limitação do seu uso na estabilização de nanofluidos é a possibilidade de a interação com as nanopartículas ser afetada pelo aumento da

temperatura. Além disso, dependendo do tipo e quantidade de surfactante adicionado, pode haver a contaminação do meio de transferência de calor, produzindo espumas e aumentando a resistência térmica.

Para os nanofluidos de nanotubos de carbono, o aumento da temperatura de 80 °C para 90 °C favoreceu mais aos ganhos na taxa de transferência de calor, indo de 2,6% para 3,7% para a amostra MWCNT3. A Figura 4.10d ilustra os resultados experimentais para as amostras de nanotubos de carbono avaliadas nas temperaturas de 105 °C. Esses ensaios foram realizados unicamente com nanofluidos de nanotubos de carbono devido ao baixo desempenho térmico mostrado pelos nanofluidos de prata às temperaturas de 90 °C e 100 °C. Os resultados revelaram que os incrementos na transferência de calor utilizando nanofluidos de nanotubos de carbono dependem fortemente da concentração e da temperatura de entrada do líquido de arrefecimento. Para a amostra de MWCNT1 a taxa de transferência de calor apresentou uma tendência de incremento em média 1% para uma temperatura de 105 °C. Já para as amostras MWCNT2 e MWCNT3, os aumentos registrados foram ainda maiores, chegando a 1,3% e 2%, respectivamente.

Comportamentos similares foram destacados nos trabalhos de Kumar *et al.* (2018) e Chaurasia *et al.* (2019), nos quais houve aumentos significativos na taxa de transferência de calor ao adicionar nanopartículas e aumentar a temperatura de entrada. No entanto, nesses estudos, a temperatura de entrada máxima trabalhada foi de 70 °C. Para temperaturas de até 90 °C, Elsaid (2019) afirma que com o incremento na temperatura de entrada do nanofluido a eficiência térmica pode ser aumentada, devido ao aumento na condutividade térmica e à diminuição da espessura da camada limite. Um comportamento similar foi registrado por Sokhal *et al.* (2018) para nanofluidos de Al₂O₃/água e concentração de 1% em volume. Nesse caso, foi observado que, quando a temperatura do nanofluido foi aumentada de 60 °C para 90 °C o coeficiente de transferência de calor aumentou de 16% para 33%.

Incrementos de até 2% para a maior concentração de nanotubos de carbono a 105 °C mostram que o comportamento foi ligeiramente superior ao fluido base. Esta situação não é muito discutida em trabalhos com radiadores automotivos, uma vez que a temperatura do nanofluido máxima relatada foi de 95 °C. Contudo, quando nanofluidos são trabalhados em alta temperatura, as diferenças para a massa específica e a viscosidade entre as nanopartículas e o fluido base pode produzir um comportamento irregular para os nanofluidos em escoamento. Esta condição foi mencionada por Teng e Yu (2013), em seu trabalho com nanotubos de carbono. Os autores argumentam que, apesar do aumento na condutividade térmica das amostras, a diferença entre as massas específicas promove velocidades de escoamento diferentes para as nanopartículas e o fluido base. Esta situação pode ser

agravada pelo aumento da viscosidade e resultando na formação de uma camada de resistência térmica que reduz a capacidade de troca de calor. Assim mesmo, devido à elevada relação de aspecto dos MWCNTs a probabilidade de aglomeração aumenta limitando a área de contato e o movimento livre das nanopartículas.

Outros possíveis fatores que influenciam na transferência de calor são abordados nos estudos de Sumanth *et al.* (2018) e Subhedar *et al.* (2018). Nestes trabalhos, observou-se que o aumento da temperatura do nanofluido resultou em incrementos relativos menores no número de Nusselt. Esse efeito foi mais acentuado pelo aumento da concentração de nanopartículas. De acordo com Chakraborty e Panigrahi (2020), para temperaturas elevadas (>60 °C) o aumento na frequência das colisões partícula-partícula elevaria a probabilidade de agregação, assim, o potencial de degradação da dispersão pode acontecer resultando em uma rápida precipitação das nanopartículas, mesmo quando for utilizado surfactante.

(Sarafraz e Hormozi (2016), também concluíram que o efeito da deposição de nanopartículas na superfície de transferência de calor, pode contribuir para uma resistência térmica adicional (*fouling factor*), reduzindo a taxa de transferência de calor e, finalmente, Abbas *et al.* (2020) comenta que a transferência de calor é um parâmetro crucial que deve ser otimizado para melhorar a eficiência térmica do radiador. Portanto, para condições de aplicação, os efeitos de parâmetros importantes como a concentração volumétrica de nanopartículas, regime de escoamento e a temperatura de entrada devem ser considerados.

4.3.2 Coeficiente global de transferência de calor

A Figura 4.11 apresenta a relação entre a vazão mássica e a variação do coeficiente global de transferência de calor (U) para diversas concentrações volumétricas de nanopartículas e temperaturas de entrada do nanofluido.

Foi registrado um aumento médio de cerca de 4% no coeficiente global de transferência de calor quando a vazão mássica aumentou de 0,09 kg/s para 0,11 kg/s. Para uma temperatura de 80 °C e uma vazão de 0,11 kg/s, as amostras MWCNT1, MWCNT2 e MWCNT3 mostraram incrementos máximos de aproximadamente 2,5%, 3,1% e 4,4%, respectivamente. No entanto, foi observado que o aumento na temperatura de entrada do nanofluido prejudica os ganhos do coeficiente global de transferência de calor. Em média, para a maior concentração testada, esses valores diminuíram de 4,4% para 2,5% quando a temperatura foi aumentada de 80 °C para 105 °C. No caso das amostras de prata para todas as condições testadas os incrementos ficaram abaixo de 1%, com o máximo encontrado para a amostra Ag/PVP3, com 0,7% de variação em relação ao fluido base. Este valor foi obtido para uma temperatura de 90 °C e uma vazão mássica de 0,1 kg/s.

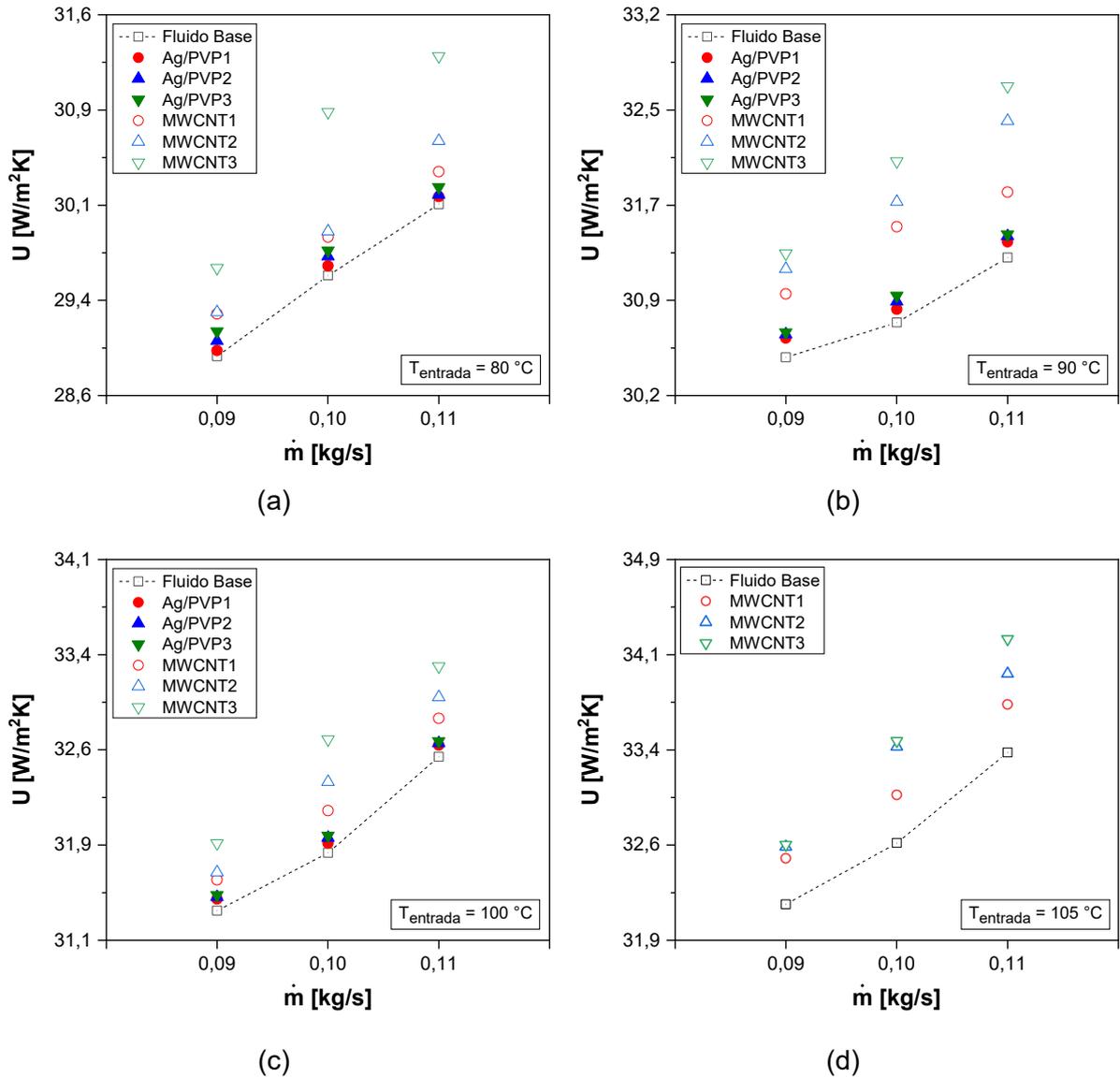


Figura 4.11 - Coeficiente global de transferência de calor para as amostras de nanofluido. (a) 80 °C. (b) 90 °C. (c) 100 °C. (d) 105 °C. Fonte: Autor.

De acordo com Selvam *et al.* (2017a), esses ganhos no coeficiente global de transferência de calor são resultado do aumento da transferência de calor por convecção nos nanofluidos, que é atribuído ao aumento da condutividade térmica e à redução da espessura da camada limite térmica. Além disso, Ravisankar *et al.* (2018) destacaram que o efeito é intensificado devido à não uniformidade da concentração de nanopartículas dentro do tubo. Em adição, Jwo *et al.* (2010, p. 387) destacam três fatores importantes no efeito da interação entre o efeito da temperatura, vazão mássica e a concentração de nanopartículas no coeficiente global de transferência de calor, sendo eles: (i) Quando a vazão aumenta, a principal influência das nanopartículas na superfície da parede é proveniente desse aumento na vazão. Essa influência é mais significativa do que o efeito da colisão entre as

nanopartículas causada pelo aumento de temperatura, a qual é considerada relativamente baixa. (ii) Com o aumento da temperatura, a massa específica do nanofluido tem uma leve diminuição, enquanto sua viscosidade diminui significativamente. Isso resulta em um número de Reynolds mais elevado para o nanofluido a alta temperatura. Portanto, quando o fator de atrito foi menor, a capacidade de troca de calor adquirida com o atrito era menor. (iii) Em baixas velocidades, as propriedades de superfície do trocador de calor têm menos influência no atrito. Embora a alta temperatura aumente a frequência de colisão das nanopartículas suspensas, seu efeito foi relativamente baixo em comparação com o aprimoramento na troca de calor causada por uma velocidade mais rápida.

Subhedar *et al.* (2017) ressaltou que o fator (ii), mencionado acima, resulta em um alinhamento acelerado das nanopartículas à medida que o número de Reynolds aumenta. Esse alinhamento pode estar diretamente relacionado à redução da condutividade térmica na região de contato entre o nanofluido e o tubo. Além disso, Raei *et al.* (2018) acrescenta que esse processo pode ser denominado de esgotamento (do inglês: *depletion*) pois as nanopartículas migram para o centro do escoamento. Os autores também destacam que a adição de surfactante em uma quantidade adequada pode melhorar o desempenho térmico geral, uma vez que, a redução do fator de atrito compensa o efeito negativo dos ganhos na transferência de calor.

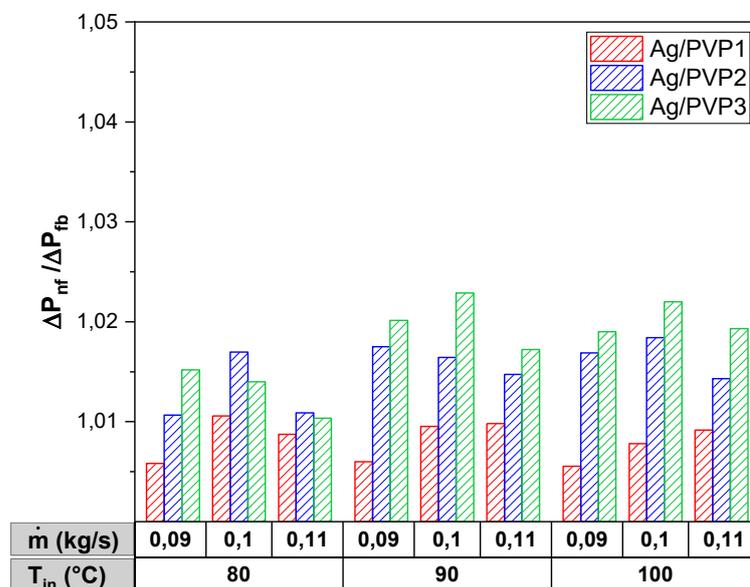
4.3.3 Queda de pressão

A Figura 4.12 mostra os resultados para a queda de pressão relativa em função da concentração, vazão mássica e temperatura de entrada do nanofluido para as amostras de nanofluido trabalhadas. A medição experimental da queda de pressão foi realizada até uma temperatura máxima de 100 °C, limitada pela faixa de operação do sensor.

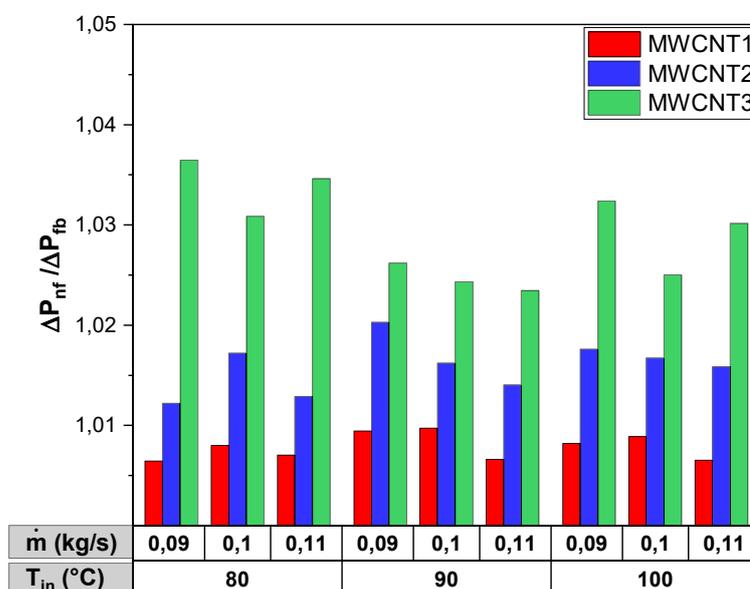
Os resultados para as amostras de prata Ag/PVP, conforme ilustrado na Fig. 4.12a, revelam que o aumento na queda de pressão está associado fortemente ao aumento na concentração de nanopartículas e surfactante, chegando a um máximo de 2,3% na condição de 90°C e 0,1 kg/s. Para a amostra Ag/PVP1, a queda de pressão relativa mostrou um comportamento ligeiramente superior ao do fluido base na faixa de temperaturas analisada, com um incremento de em média 1%.

Nas amostras de MWCNTs, as medições da queda de pressão apresentaram um padrão semelhante ao das amostras de prata, em função da concentração de nanopartículas. Para as concentrações volumétricas de 0,025%, 0,05% e 0,1%, os incrementos máximos observados foram de 1,1%, 2,0% e 3,6%, respectivamente. Esse comportamento evidencia que, mesmo a concentração de nanopartículas sendo 10 vezes maior nas amostras de

nanotubos de carbono os incrementos na queda de pressão ficaram próximos com os obtidos para as amostras de prata.



(a)



(b)

Figura 4.12 - Resultados experimentais para a queda de pressão relativa dos nanofluidos (a) Prata (Ag/PVP). (b) nanotubo de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.

A partir dos resultados apresentados, é possível inferir duas situações: a primeira é que a maior quantidade de surfactante presente nas amostras de prata promoveu um aumento expressivo na queda de pressão, seja pelo efeito de aumento na viscosidade da amostra ou

pela degradação em altas temperaturas. A segunda situação é que a suspensão contendo nanotubos mostrou-se mais estável e homogênea, mesmo com o aumento da temperatura. Essa condição beneficia a interação entre o nanofluido e a superfície, evitando um aumento acentuado na queda de pressão.

De acordo com Abbas et al. (2020), além da concentração de nanopartículas e da vazão mássica, a temperatura de entrada do nanofluido também é um fator importante na avaliação do desempenho dos nanofluidos no radiador. No entanto, na literatura, existem outros fatores, como a morfologia das nanopartículas e o uso de surfactantes que, dependendo de sua concentração, promovem um aumento significativo na viscosidade dos nanofluidos.

Para temperaturas de entrada na faixa de 80°C a 95°C, Teng e Yu (2013) avaliaram o desempenho térmico usando nanofluidos de MWCNTs com quitosana como surfactante. Os autores destacam que um aumento na concentração de nanopartículas resulta em um aumento de 4,9% na potência de bombeamento máxima para uma temperatura de entrada de 95°C. No entanto, não há uma correlação definida entre o aumento da potência de bombeamento e o aumento da temperatura, chegando em alguns casos a ser menor quando comparado ao fluido base. Esse comportamento foi associado ao uso de concentrações muito baixas, as quais não tiveram um impacto significativo na viscosidade dos nanofluidos. Um comportamento similar para a mesma faixa de temperatura foi relatado por Nieh *et al.* (2014), com nanofluidos de óxido de alumínio e óxido de óxido de titânio em concentrações de 0,5 – 2 wt%. As variações na potência de bombeamento oscilaram entre -4,0% e +2,5%, indicando um desempenho irregular da suspensão, associado aos efeitos de lubrificação na superfície do tubo.

Outro efeito que pode ser analisado a partir da Fig. 4.12 é o efeito da forma das nanopartículas e do surfactante. Uma vez que, cada um desses parâmetros contribui separadamente para o aumento da viscosidade dos nanofluidos, o que pode resultar em um aumento da queda de pressão. Em um estudo realizado por Wang *et al.* (2020), foi avaliada a influência de diferentes surfactantes na viscosidade de nanofluidos de nanotubos de carbono. Para uma concentração volumétrica de 0,1% e surfactante (SDBS) em uma razão de 10:1, observou-se um aumento de 350% na viscosidade a uma temperatura de 25 °C. Além disso, quando a temperatura foi aumentada para 50 °C, o incremento relativo na viscosidade aumentou para 450%. Isso indica a possibilidade de uma maior potência de bombeamento caso esses nanofluidos sejam utilizados em radiadores automotivos.

Em uma aplicação com radiador automotivo, Akash *et al.* (2020) avaliaram o desempenho termo-hidráulico usando três diferentes tipos de nanopartículas (cobre, alumínio

e nanotubos de carbono), mantendo a temperatura de entrada do nanofluido controlada em 60 °C. O intuito da pesquisa foi verificar a possibilidade de redução do tamanho do radiador baseado em parâmetros como o coeficiente global de transferência de calor e a potência de bombeamento. O estudo revelou que para baixos números de Reynolds (<600), os nanofluidos de nanotubos de carbono demonstraram um potencial de aplicação com incrementos de até 21% no coeficiente global de transferência de calor e penalizações de ~11% na queda de pressão. Além disso, as nanopartículas de cobre e alumínio tiveram uma penalização na queda de pressão menor para Reynolds > 600 quando comparado aos nanotubos de carbono.

Em outro trabalho Akash *et al.* (2019), estimaram o coeficiente de desempenho (*performance index*) do nanofluido, relacionando os incrementos na transferência de calor e na potência de bombeamento relativa para uma concentração em massa de 0,1% de nanopartículas de grafite em água/etilenoglicol (50:50) como fluido base. Como conclusão, foi descrito que o coeficiente de desempenho diminui na medida que a vazão mássica do nanofluido aumenta, indicando um impacto negativo na sua aplicabilidade.

Poucos estudos foram realizados sobre o efeito da temperatura de entrada do nanofluido na queda de pressão no radiador quando nanofluidos de prata ou nanotubo de carbono são trabalhados. Os tópicos mais discutidos são a influência da concentração de nanopartículas e aumento do número de Reynolds. Pesquisas experimentais com radiadores precisam ser realizadas com condições de operação próximas ao funcionamento de um sistema de arrefecimento automotivo para avaliar o comportamento e usabilidade dos nanofluidos em sistemas reais. A falta de informações na forma de preparo ou das condições de operação nos ensaios experimentais gera certas divergências entre os resultados, mesmo quando se trabalha com a mesma natureza e concentração de nanopartículas.

4.3.4 Coeficiente de desempenho termo-hidráulico

É consenso na literatura que os nanofluidos apresentam notáveis propriedades térmicas e que têm o potencial de reduzir os custos operacionais. Além disso, eles oferecem uma oportunidade para alcançar o mesmo desempenho na transferência de calor que os fluidos convencionais, mas com uma vazão reduzida, o que pode possibilitar a miniaturização dos equipamentos e diminuir os custos de fabricação. Em uma revisão abrangente sobre questões críticas, perspectivas de economia e sustentabilidade sobre os nanofluidos, Mukherjee *et al.* (2024) comenta sobre a necessidade de uma análise de custos para avaliar sua viabilidade econômica e prática. Contudo, os autores também questionam a escassez de estudos nessa área, dificultando a obtenção de conclusões claras sobre os aspectos econômicos dos nanofluidos.

Modelos baseados no fator de desempenho de preço (PPF), Índice de Desempenho Econômico (EPI), Índice de Desempenho de Preços (PPI) são os mais utilizados. No entanto, são modelos baseados no custo de produção sem extensão ou estudo adicional. Nesta análise será ampliado o modelo de índice de eficiência-preço (do inglês: *Efficiency-Price Index*) como parâmetro de desempenho definido por Alirezaie *et al.* (2018) como:

$$EPI = \frac{\eta}{price} \times 1000 \quad (4.1)$$

em que, a variável η é o coeficiente de desempenho termo-hidráulico e 'price' é o preço atribuído a cada litro de nanofluido preparado.

O coeficiente de eficiência, também referido como coeficiente de desempenho térmico ou termo-hidráulico do sistema, apresentado na Eq. 4.1 pode ser abordado de várias maneiras na literatura. Neste estudo, foi adotado o modelo usado por Cardenas Contreras *et al.* (2019) e Sonage e Mohanan (2015), especificamente para radiadores automotivos. Este coeficiente é definido como a razão da taxa de transferência de calor (\dot{Q}) e a potência de bombeamento (\dot{W}_b) entre o nanofluido e o fluido base.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{nf} \dot{W}_{fb}}{\dot{Q}_{fb} \dot{W}_{nf}} \quad (4.2)$$

A Figura 4.13a apresenta os resultados do coeficiente de desempenho termo-hidráulico em função da vazão mássica para as amostras de Ag/PVP. Observou-se que, para a maioria dos casos, o coeficiente de desempenho foi menor que 1. Esse fenômeno pode ser atribuído ao fato de que o acréscimo na potência de bombeamento dos nanofluidos sempre foi superior ao ganho na taxa de transferência de calor. Por tanto, com base nos resultados obtidos das condições experimentais analisadas para as amostras de prata, não se evidenciou potencial para aprimorar o desempenho termo-hidráulico do radiador automotivo.

As amostras de nanotubos de carbono exibiram resultados distintos, conforme demonstrado na Fig. 4.13b. Em determinadas condições, o nanofluido apresentou uma maior tendência de aumento no coeficiente de desempenho ($\eta > 1$), indicando potencial para melhorar a eficiência térmica. Um aspecto interessante a ser discutido é o caso da amostra MWCNT3, que apesar de ter mostrado uma tendência de aumento na taxa de transferência de calor, não obteve o melhor desempenho termo-hidráulico. Isso se deve ao fato de que potência de bombeamento requerida para MWCNT3 foi a mais elevada entre as três amostras

analisadas. Em adição, foi notado que a amostra MWCNT2 demonstrou ter um coeficiente de desempenho superior chegando a ser aproximadamente de 1,5%, em comparação com o fluido base. Essas condições foram alcançadas para a temperatura de entrada de 90 °C e a vazão de 0,11 kg/s.

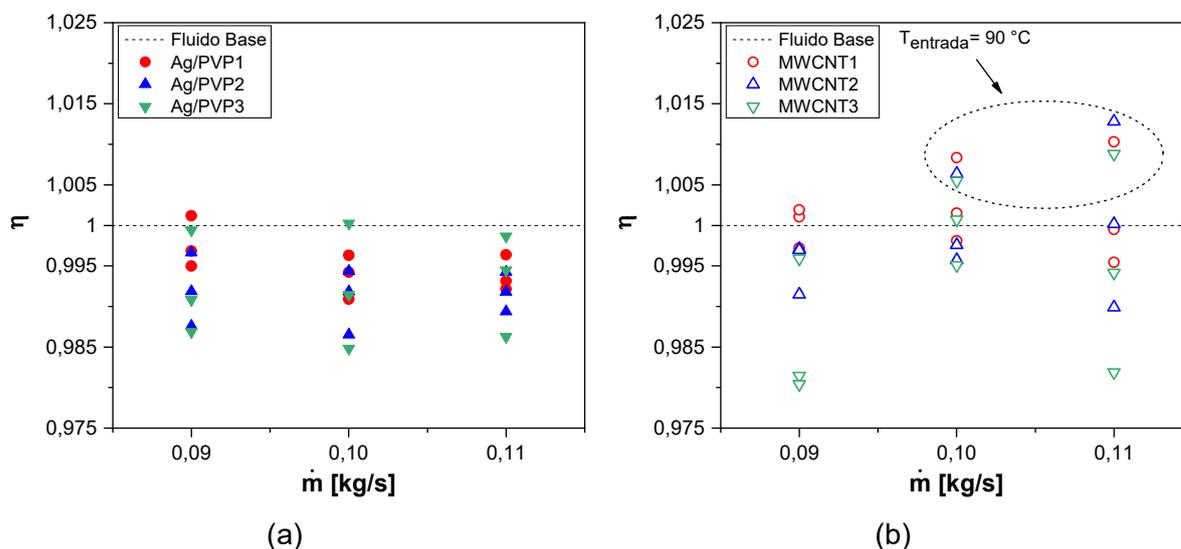


Figura 4.13 - Coeficiente de desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos. (a) Prata (Ag/PVP). (b) Nanotubos de carbono (MWCNT). Fonte: Autor.

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores de produção de cada uma das amostras de nanotubo de carbono analisadas. Os custos foram estimados com base nas informações do site da empresa *Nanoamor* na data de Janeiro de 2024. Segundo esses dados, uma dispersão funcionalizada de 1L de nanotubos de carbono contendo uma concentração de 5 wt% tem um custo aproximado de mil R\$1.500,00 (ou \$ 300). Adicionalmente, o custo médio de 1L de etilenoglicol é de R\$30,00 (ou \$6).

Tabela 4.4 - Índice de performance econômica dos nanofluidos.

Amostra	Concentração volumétrica (%)	Custo de produção de 4,5 L (R\$)	η máximo	EPI
MWCNT1	0,025	108	1,01	9,35
MWCNT2	0,05	145	1,015	7,00
MWCNT3	0,1	225	1,008	4,48

Fonte: Autor.

Os resultados apresentados indicam que, embora a amostra MWCNT2 tenha demonstrado um melhor coeficiente de desempenho, seu EPI ficou abaixo do valor calculado para a amostra MWCNT1. Este resultado se deve, principalmente, ao maior custo de

preparação associado à amostra MWCNT2. Contudo, é importante ressaltar que esta análise é realizada sob condições estáticas, considerando apenas a relação entre o ganho de eficiência e o custo inicial de preparação, sem levar em conta a economia de energia gerada durante a operação do sistema de arrefecimento. Vale destacar que um aumento na eficiência não apenas impacta positivamente o desempenho termo-hidráulico, mas também pode contribuir para a economia de combustível.

4.4 Avaliação da estabilidade após os ensaios

A Figura 4.14 apresenta a análise de estabilidade da amostra MWCNT_2 após a realização de testes no radiador automotivo. As medições foram realizadas à temperatura ambiente, fazendo-se necessário resfriar a amostra retirada do radiador por um período de 3 horas. Na Fig. 4.14a, é apresentada uma análise comparativa do tamanho médio das nanopartículas de nanotubos de carbono utilizando o analisador de tamanho de partículas (DLS-LitesizerTM 500, Anton Paar).

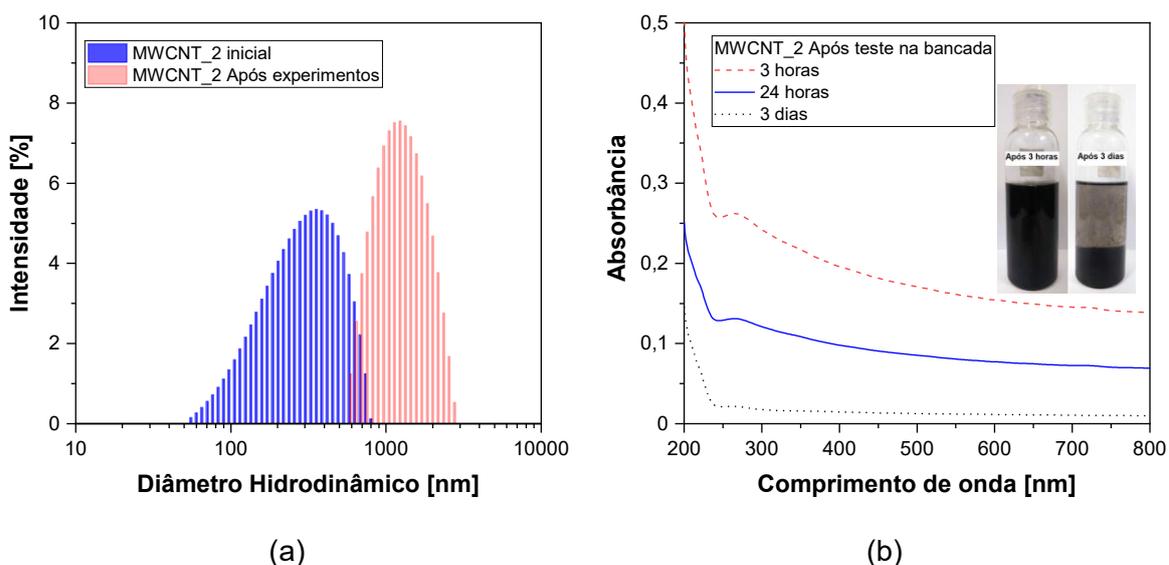


Figura 4.14 – Avaliação da estabilidade da amostra MWCNT 2, antes e após os testes experimentais. (a) Distribuição do tamanho de partícula. (b) Espectro de absorvância UV -vis. Fonte: Autor.

Foi observado um aumento médio do diâmetro hidrodinâmico de 280 nm para 1400 nm, indicando que as nanopartículas sofreram uma possível agregação durante o período de repouso. No entanto, conforme indicado por Reinert *et al.* (2015), o método de análise de estabilidade que avalia o tamanho de aglomerados para nanopartículas de nanotubos de carbono é um método impreciso e aproximado, devido ao princípio de medição do DLS, que caracteriza o tamanho das nanopartículas com base em seu diâmetro hidrodinâmico.

Uma técnica complementar à análise é a medição de absorvância, cujos resultados são apresentados na Fig. 4.14b. Após os testes realizados no radiador, as medidas de absorvância indicaram que a concentração relativa da dispersão diminuiu 90% em um período de 3 dias. Isso evidencia uma degradação significativa das amostras de nanofluido quando submetidas a altas temperaturas.

4.5 Modelos matemáticos propostos e comparação com a literatura

4.5.1 Modelo de Condutividade térmica

A Figura 4.15 apresenta um comparativo entre a condutividade térmica relativa experimental e os modelos encontrados na literatura internacional para nanofluidos contendo nanotubos de carbono. Na Figura 4.15a é possível observar diferenças entre os valores experimentais e os modelos propostos por Ghasemi *et al.* (2019), Dehkordi *et al.* (2017) e Nan *et al.* (2003), com desvios de até 5%. Vale ressaltar que essas correlações foram desenvolvidas para uma faixa de temperatura entre 30 °C e 50 °C.

Ao analisar a condutividade térmica para uma temperatura mais elevada, de 80 °C, os desvios observados são ainda mais acentuados, alcançando um máximo de 14%, como observado na Fig. 4.15b. Por outro lado, o modelo proposto por Nan *et al.* (2003) demonstrou ser mais preciso na previsão da condutividade térmica das amostras MWCNT1 e MWCNT2, embora tenha superestimado essa propriedade para a amostra MWCNT3.

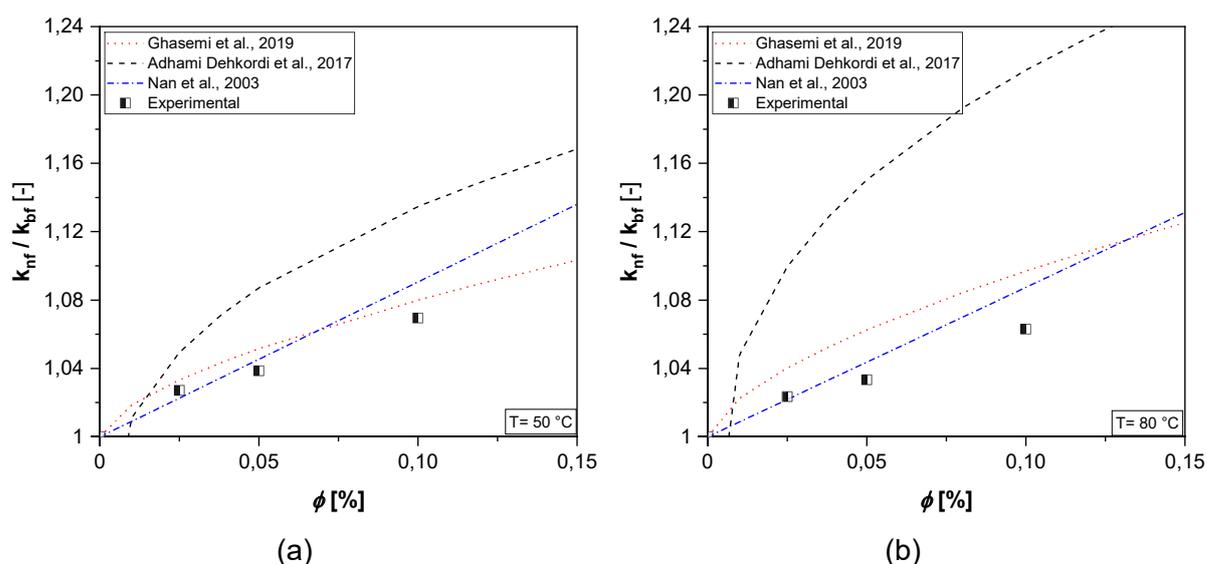


Figura 4.15 - Comparação dos resultados experimentais com os modelos analíticos e experimentais existentes. (a) $T = 50$ °C. (b) $T = 80$ °C. Fonte: Autor.

Essa observação sugere que o modelo não é capaz de prever com precisão a condutividade térmica do nanofluido nas faixas de concentrações e temperaturas utilizadas

neste estudo. Adicionalmente, destaca-se que a condutividade térmica dos nanofluidos pode ser influenciada por fatores como a dispersão e aglomeração das nanopartículas, assim como pela presença de surfactantes. Esses aspectos podem alterar o comportamento da amostra e, conseqüentemente, impactar nos resultados experimentais em relação aos modelos teóricos ou propostos por outros autores.

Devido à falta de um modelo apropriado para prever a condutividade térmica dos nanofluidos de nanotubos de carbono funcionalizados em temperaturas de até 80°C, foi desenvolvida uma nova correlação, com base nos resultados experimentais. Dessa maneira, o modelo descrito na Eq. 4.3 foi obtido por meio do método de ajuste de curvas utilizando o algoritmo Marquardt-Levenberg, proposto por Marquardt (1963), implementado no software *MATLAB*. Esse método permite obter os coeficientes das variáveis independentes (concentração volumétrica e temperatura) que proporcionam o melhor ajuste, minimizando a soma das diferenças quadráticas entre os dados experimentais e os valores previstos.

$$k_{nf}(k_{fb}, \phi, T) = (1 + a \phi^b T^c) k_{fb} \quad (4.3)$$

onde $a = 7,81$, $b = 0,712$ e $c = 0,0259$.

A Figura 4.16 apresenta as comparações entre os resultados experimentais da condutividade térmica das amostras de nanofluido de nanotubos de carbono e os resultados utilizando a correlação proposta na Eq. 4.3.

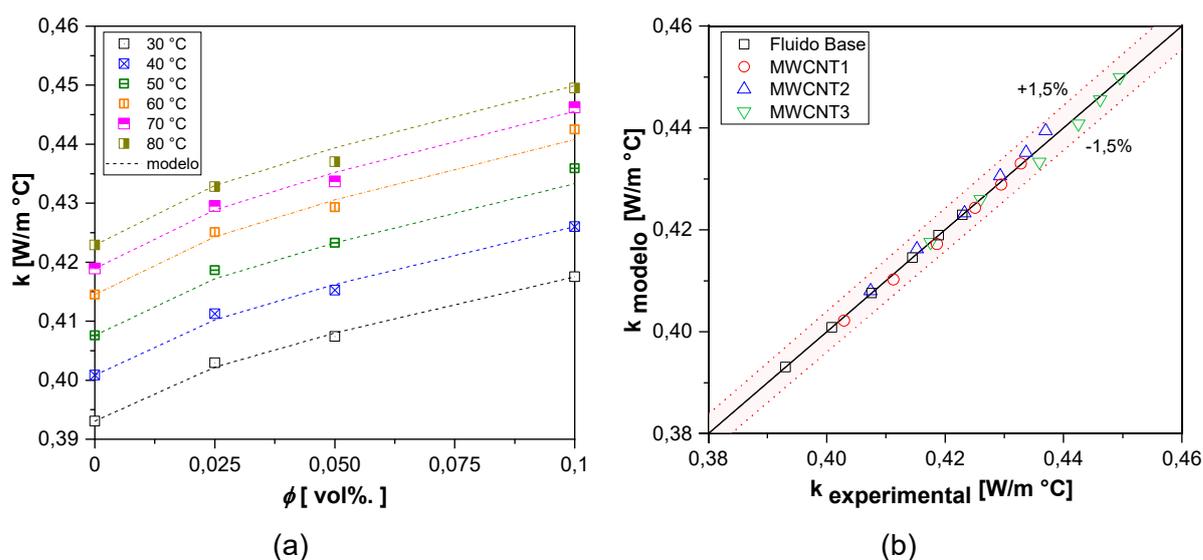


Figura 4.16 - Comparação dos resultados experimentais com os da correlação proposta para a condutividade térmica. (a) $(k \times \phi)$. (b) $(k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod}})$. Fonte: Autor.

Ao comparar o modelo proposto com as abordagens documentadas na Fig. 4.15, observou-se que o novo modelo oferece melhorias significativas em termos de precisão e aplicabilidade em temperaturas elevadas, reduzindo o desvio máximo de 14% para máximo de 1,5%. Esta comparação destaca a contribuição significativa do presente estudo para o campo de nanofluidos, expandindo o entendimento e a modelagem da condutividade térmica.

4.5.2 Modelo de Viscosidade Dinâmica

Com base nos resultados experimentais da viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido de nanotubos de carbono, foi proposto um modelo matemático descrito na Eq. 4.4 para estimar a viscosidade dinâmica. O modelo adotado é semelhante ao utilizado para prever a condutividade térmica e leva em consideração a concentração das nanopartículas, a temperatura e a viscosidade do fluido base como fatores determinantes.

$$\mu_{nf}(\mu_{fb}, \phi, T) = (1 + a \phi^b T^c) \mu_{fb} \quad (4.4)$$

onde $a = 14,74$, $b = 0,8412$ e $c = 0,1984$.

A Figura 4.17 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais da viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido de nanotubos de carbono e os resultados da correlação proposta na Eq. 4.4. Verificou-se uma boa concordância do modelo utilizado, com um desvio máximo de 3% em relação aos valores experimentais.

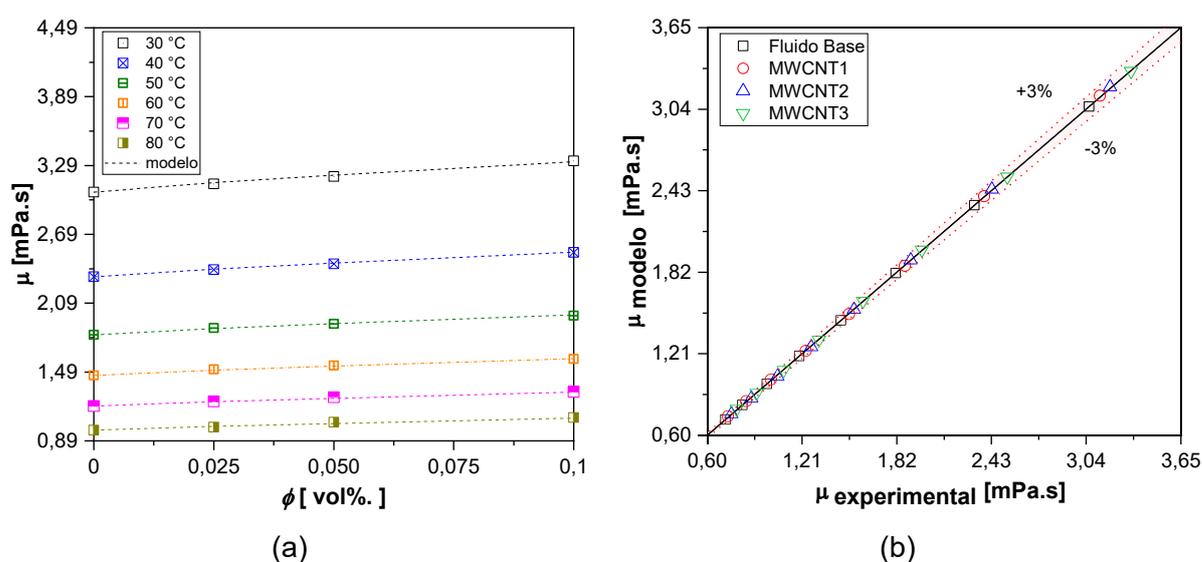


Figura 4.17 - Comparação dos resultados experimentais com os da correlação proposta para a viscosidade dinâmica. (a) $(\mu \times \phi)$. (b) $(\mu_{exp} \times \mu_{mod})$. Fonte: Autor.

Essa consistência ressalta a eficácia dos modelos na previsão tanto para a viscosidade dinâmica quanto para a condutividade térmica do nanofluido, demonstrando sua utilidade e precisão. Os resultados para as propriedades termofísicas são essenciais para fundamentar e validar as simulações numéricas da transferência de calor explicado na seção subsequente.

4.5.3 Modelos de correlação e comparações para a transferência de calor

4.5.3.1 Validação do modelo em regime turbulento

Para o processo de validação do modelo implementado, em um primeiro momento, foi necessário o desenvolvimento de uma correlação para estimar o coeficiente de transferência de calor médio do lado do ar. A empresa *Fiat Chrysler Automobiles (FCA)* forneceu dados experimentais para vazões do líquido de arrefecimento, com número de Reynolds maiores que 10000, e diferentes vazões de ar, entre 1 e 4 m/s), conforme mostrado na Tab. 4.5 .

Tabela 4.5 - Dados experimentais para cálculo do coeficiente médio de transferência de calor por convecção do lado do ar.

Vazão de entrada líquido de arrefecimento [kg/s]	Velocidade do ar [m/s]	Temperatura de saída do ar [°C]	Temperatura saída do líquido de arrefecimento [°C]
1,293	1	80,79	87,41
	2	70,03	85,82
	3	62,01	84,84
	4	56,43	84,16
2,585	1	82,20	88,67
	2	72,89	87,78
	3	64,97	87,22
	4	59,64	86,78

Fonte: Autor.

Com base no conhecimento das propriedades termofísicas do líquido de arrefecimento e considerando que as resistências térmicas tanto do lado do líquido de arrefecimento quanto a da parede do tubo são significativamente inferiores à resistência térmica do ar, os coeficientes de correlação da Eq. 3.26 são calculados como $C = 0,940$; $m=0,334$ e $n =0,333$.

O radiador foi validado com base nos dados experimentais fornecidos pela *FCA*, considerando as perdas de pressão e transferência de calor desprezíveis. Inicialmente, foi avaliado o efeito do número de elementos na taxa de transferência de calor calculada pelo modelo tratado na seção 3.5.4 e sua aproximação com o valor experimental para uma condição específica de operação, que é uma vazão mássica de 1,293 kg/s e a temperatura

de entrada do líquido de arrefecimento de 90 °C. No lado do ar, a temperatura de entrada foi de 25 °C e a velocidade de 3 m/s. Os resultados ilustrados na Fig. 4.18, apresentaram uma diferença de 1,5% em relação aos valores experimentais, indicando que o modelo fornece uma solução satisfatória quando número de elementos for maior ou igual a 40.

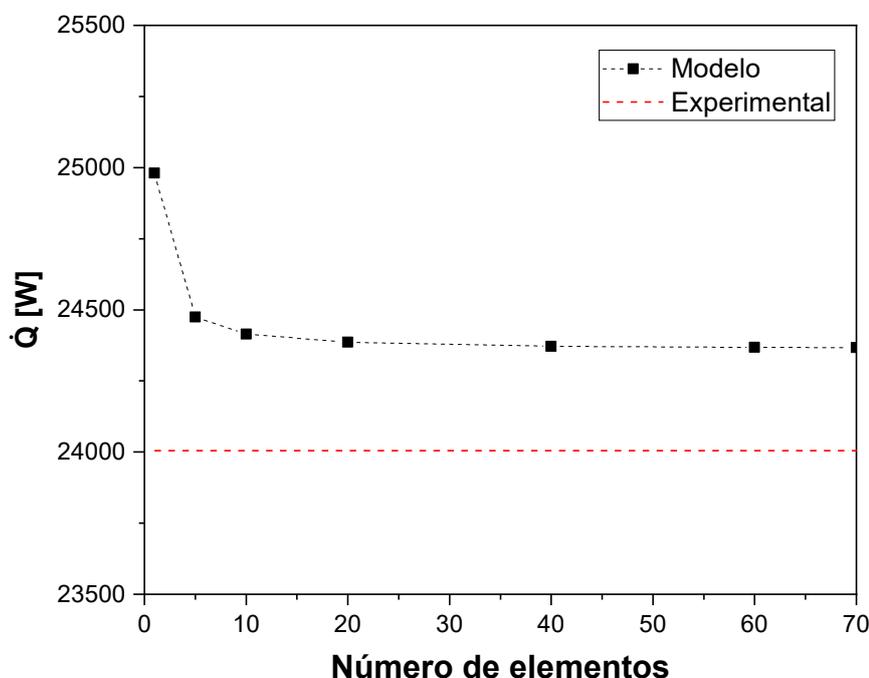


Figura 4.18 - Efeito do número de elementos na transferência de calor utilizando simulação no software EES. Fonte: Autor.

Observa-se que, para 20 elementos, o valor do erro numérico é mínimo. No entanto, a utilização de um número maior de elementos, por exemplo 40, seria aconselhável neste caso. Adicionalmente, como sugerido por Cabezas-Gómez *et al.* (2015), o critério de convergência descrito na Eq. 4.5, é baseado na temperatura média do fluido frio (neste caso o ar), a qual, durante o procedimento iterativo, deve ser inferior ou igual a uma tolerância pré-estabelecida. Neste caso, esse critério foi definido como $\delta T \leq 10^{-5}$.

$$\frac{|(T_{ar,s})_{novo} - T_{ar,s}|}{T_{ar,s}} \leq \delta T \quad (4.5)$$

em que o subscrito 'novo' representa o valor da temperatura média de saída do ar a cada elemento adicionado.

Como parte do processo de validação, foi calculada a taxa de transferência de calor para o fluido base, a partir dos valores dispostos na Tab. 4.5. Os resultados apresentados na Fig. 4.19 demonstraram uma boa concordância com os valores experimentais para a maioria

dos casos, com um desvio médio verificado em 1,8%. As propriedades termofísicas para os valores experimentais do líquido de arrefecimento e do ar foram calculadas na temperatura média entre a entrada e a saída do radiador.

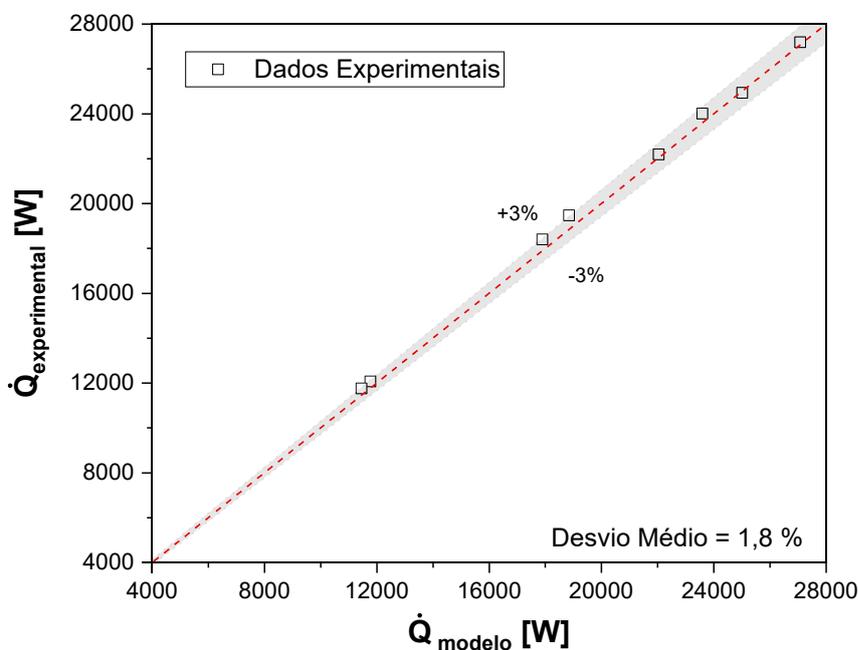


Figura 4.19 - Comparação dos dados experimentais fornecidos pela *Fiat Chrysler Automobiles* com os obtidos por meio do procedimento iterativo. Fonte: Autor.

4.5.3.2 Validação modelo em regime laminar

Antes de conduzir os experimentos do desempenho na transferência de calor em regime de escoamento laminar para os nanofluidos, a configuração experimental foi validada para garantir sua confiabilidade. O processo de validação envolveu a comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção para o fluido base com os valores obtidos a partir das correlações propostas por Hornbeck (1965) e Shah (1975), especificamente projetadas para regime de escoamento laminar em desenvolvimento.

Na Figura 4.20 é possível observar que, todos os pontos experimentais, estão dentro da margem de erro de $\pm 16\%$. O desvio médio foi de 7,6% para a correlação de Hornbeck e 12% para a correlação de Shah. Isso demonstra que há uma boa concordância entre os resultados da validação do coeficiente de transferência de calor por convecção no equipamento experimental e os modelos utilizados para prever o coeficiente de transferência de calor em escoamento monofásico laminar dentro do tubo. Esses valores podem ser considerados aceitáveis, uma vez que foram utilizadas correlações em regime laminar, o que pode implicar em desvios de até 25% em relação a resultados experimentais, conforme relatado por (Holman, 2010).

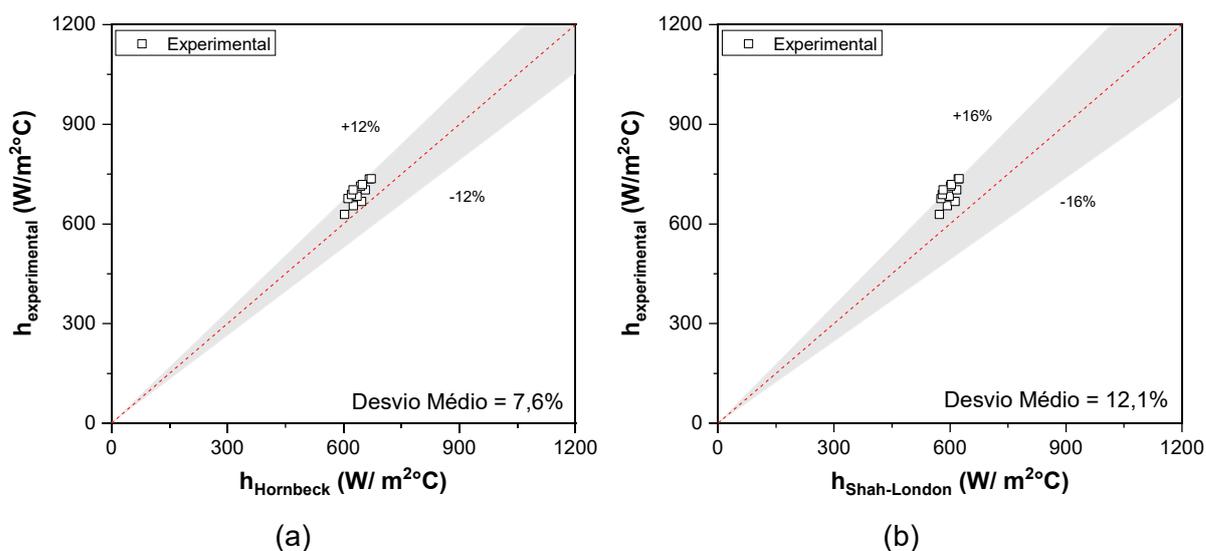


Figura 4.20 - Dados de validação em regime laminar para o fluido base. (a) correlação de Hornbeck. (b) correlação de Shah. Fonte: Autor.

A Figura 4.21 ilustra a comparação dos resultados experimentais com os resultados da simulação para a taxa de transferência de calor (4.21a) e a condutância térmica global (4.21b), calculados a partir da correlação proposta por Hornbeck (1965). A escolha desta correlação se justifica pelo fato de apresentar menores desvios médios para o coeficiente de transferência de calor por convecção. Os resultados revelam desvios médios de 3,1% para a taxa de transferência de calor e de 7,2% para a condutância térmica, reforçando assim a eficácia da metodologia utilizada para realização das simulações.

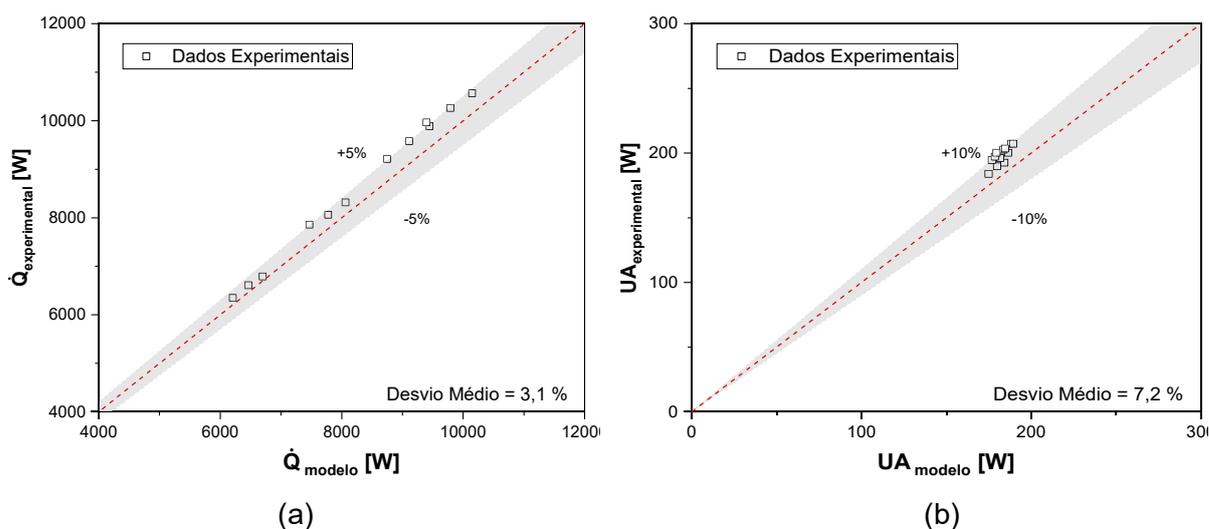


Figura 4.21 - Dados de validação para o fluido base (a) taxa de transferência de calor. (b) a condutância térmica. Fonte: Autor.

4.5.3.3 Uso de modelos existentes para estimar o coeficiente de transferência de calor médio dos nanofluidos

Os dados teóricos obtidos foram analisados por meio da aplicação de modelos de correlação existentes, que incluíram tanto os modelos clássicos quanto aqueles propostos por outros pesquisadores que trabalharam com nanofluidos de nanotubos de carbono. Esses modelos são especificamente aplicados e adaptados para escoamento em regime laminar, considerando as variações das propriedades termofísicas dos nanofluidos em função da temperatura e da concentração de nanopartículas.

A Figura 4.22 ilustra a comparação dos resultados para o coeficiente de transferência de calor, conforme previsto pelas correlações de Hornbeck (1965) e Shah (1975), e os valores experimentais obtidos.

Na Figura 4.22a pode ser observado que o modelo de Hornbeck consegue estimar o coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos com um desvio médio de 7,2% para as condições trabalhadas. Por outro lado, na Fig. 4.22b, o modelo de Shah subestima o coeficiente de transferência de calor com um desvio médio de 12,1%. Vale ressaltar que essas duas correlações clássicas são encontradas na literatura e geralmente utilizadas para substâncias puras em estado líquido monofásico, não levando em consideração o efeito da concentração de nanopartículas ou outros efeitos associados ao comportamento da suspensão. Neste caso, apenas foi levada em consideração a variação das propriedades termofísicas dos nanofluidos.

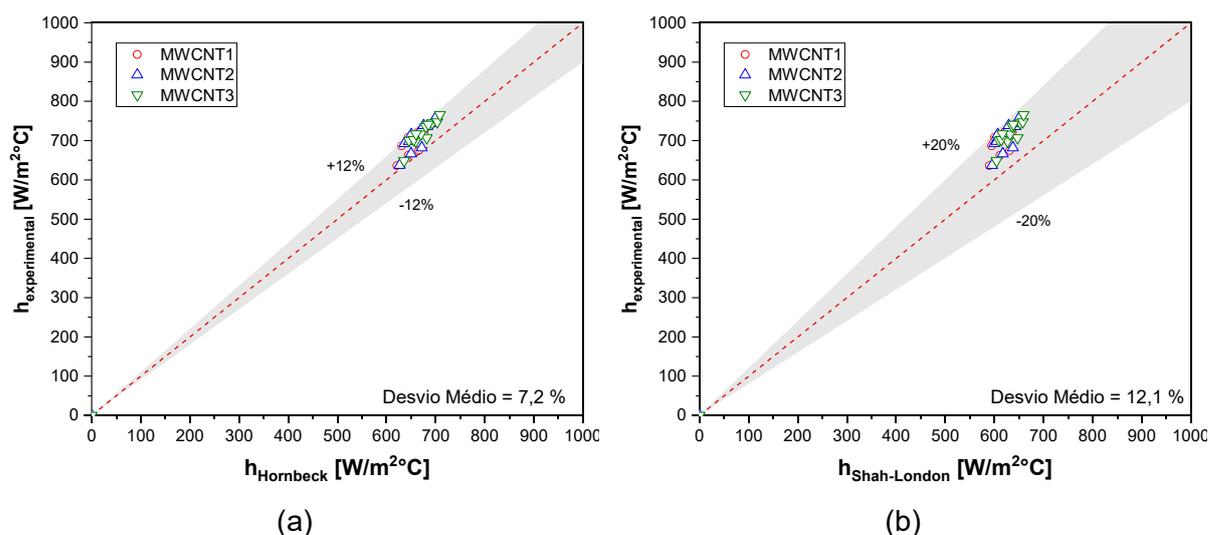


Figura 4.22 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos experimental e a correlação estabelecida, (a) (Hornbeck, 1965). (b) (Shah, 1975). Fonte: Autor.

Na sequência, foram adaptadas as correlações de outros autores encontradas na literatura para quando foram utilizados nanofluidos de nanotubos de carbono em condições semelhantes às do presente trabalho. A Figura 4.23 mostra a comparação dos resultados obtidos para o coeficiente de transferência de calor médio através das correlações também usadas por Meyer *et al.* (2013) e Minea e Estellé (2018) com os valores experimentais deste trabalho.

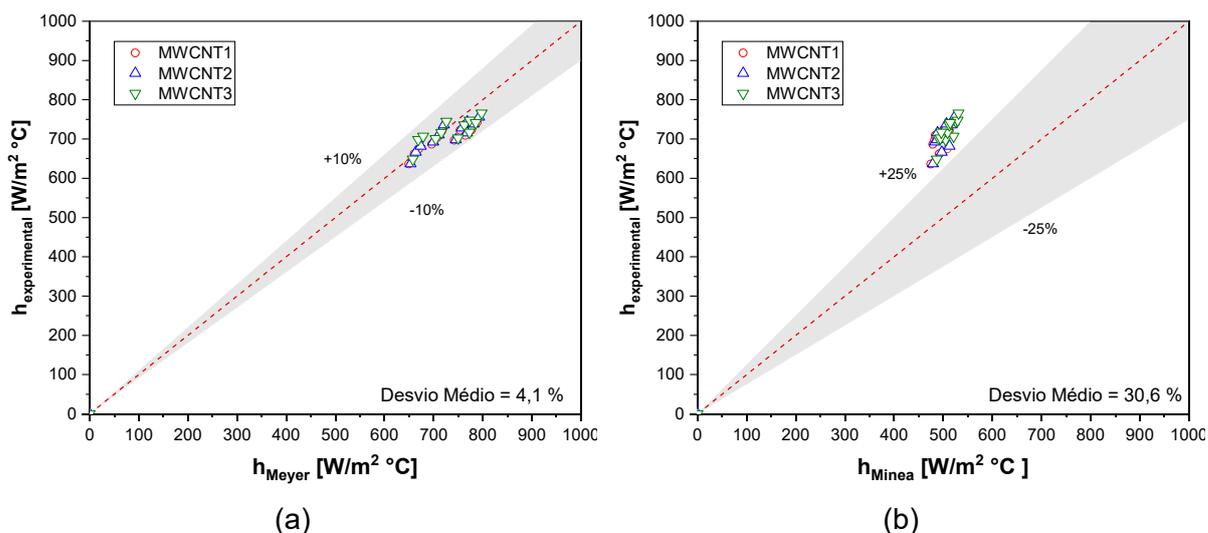


Figura 4.23 - (a) Comparação do coeficiente de transferência de calor entre os resultados experimentais e as correlações encontradas na literatura para os nanofluidos, (a) (Meyer *et al.* 2013). (b) (Minea e Estellé, 2018). Fonte: Autor.

Como observado na Fig. 4.23a, a correlação sugerida por Meyer *et al.* (2013) consegue prever os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção em este estudo, com um desvio médio de 4,1%. No caso do modelo proposto por Minea e Estellé (2018), mostrado na Fig. 4.23b, este apresentou um desvio médio de 30,6%, tornando inviável sua utilização para previsão dessa propriedade. Ambas as pesquisas afirmaram que a faixa de uso dessas correlações é ótima para números de Reynolds entre 500 e 2000. Deve-se ressaltar que, para todos os casos, os pontos estão agrupados em relação à linha média, isto é, nos casos em que a dispersão foi reduzida, o modelo pode representar satisfatoriamente os resultados experimentais.

Na Figura 4.24 são apresentados os resultados referentes à taxa de transferência de calor para todas as condições de testes realizadas nos experimentos com nanofluidos de nanotubos de carbono, bem como a comparação com os valores obtidos nas simulações aplicando as correlações de Hornbeck e Meyer. Foram utilizados esses dois modelos pois os desvios obtidos para o coeficiente de transferência de calor foi o menor entre as correlações analisadas.

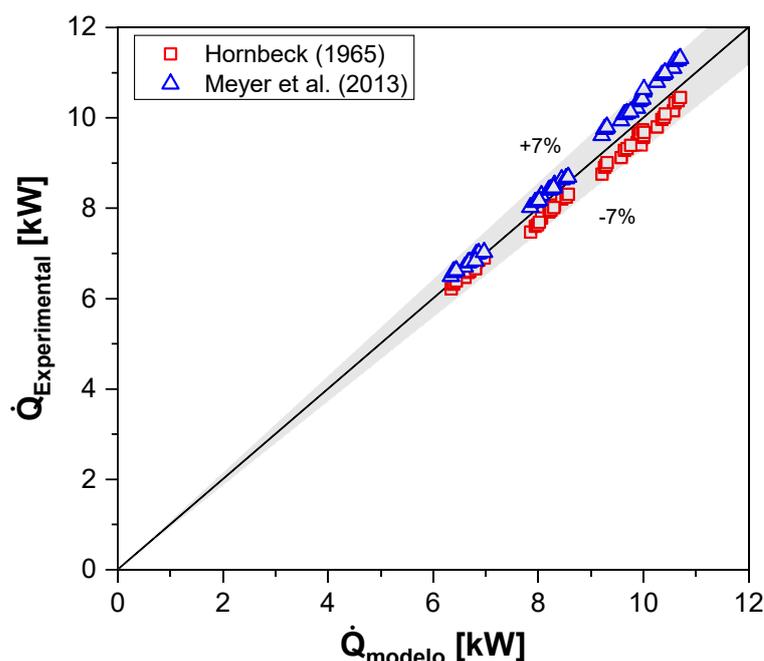


Figura 4.24 - Comparação entre os valores experimentais e os obtidos usando modelos de correlação para a taxa de transferência de calor. Fonte: Autor.

Durante as simulações, verificou-se que o aumento da vazão mássica resultou em um aumento na taxa de transferência de calor, o que promove uma maior transferência de energia para o ar devido ao incremento no processo de convecção do líquido de arrefecimento. O aumento da temperatura de entrada também provocou um aumento na transferência de calor, devido a uma maior diferença de temperatura entre ambos os fluidos. Os resultados também indicam que a taxa de transferência de calor se eleva com a concentração de nanofluidos, seguindo a mesma tendência observada nos dados experimentais. Nesse caso, uma concentração mais elevada implica em um aumento na condutividade térmica, intensificando o processo de transferência de energia.

Os resultados das simulações destacam um desvio máximo de 3,11% para uma temperatura de 80 °C, quando comparados os dados experimentais com os valores obtidos do modelo também utilizado por Meyer *et al.* (2013). Em adição, para temperaturas acima de 90 °C, os desvios foram ainda maiores, variando entre 5 e 6,2%.

Finalmente, pode-se concluir que as discrepâncias entre os resultados das correlações propostas por outros autores e os dados experimentais podem ser atribuídas à falta de consideração de fenômenos físicos e à simplificação do modelo, que podem aumentar ou diminuir a taxa de transferência de calor. Alguns desses fenômenos incluem o movimento browniano, a qualidade da dispersão, a migração de partículas, entre outros (Guo, 2020).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E DESDOBRAMENTOS FUTUROS

Uma avaliação experimental foi realizada para estudar o desempenho termo-hidráulico de um radiador automotivo operando com nanofluidos a base de uma mistura de água etilenoglicol (50:50 em volume) em elevadas temperaturas. Diferentes condições de teste foram realizadas para identificar quais parâmetros influenciam nas propriedades termofísicas e o desempenho termo-hidráulico. Além disso, simulações foram aplicadas com sucesso para prever o comportamento dos nanofluido em regime laminar, considerando uma abordagem de um fluido monofásico e com comportamento Newtoniano.

5.1 Conclusões

As principais conclusões relativas ao presente trabalho podem ser resumidas nos seguintes tópicos:

A revisão bibliográfica realizada permitiu consolidar o estado da arte dos nanofluidos em radiadores automotivos. Foi possível extrair informações sobre as propriedades termofísicas, métodos de avaliação de estabilidade e sua utilização para aprimorar o desempenho termo-hidráulico.

A estabilidade do nanofluido preparado foi avaliada pelos métodos de espectrofotometria UV-vis e DLS. Esses métodos quantitativos permitiram obter com exatidão o comportamento da suspensão de nanopartículas. Além disso, quando comparados com o método qualitativo baseado na análise visual das amostras, estes se mostraram mais eficazes, principalmente para comparação em pequenos intervalos de tempo. Para um período de um mês, uma diminuição na concentração relativa foi encontrada de até 19% para a amostra Ag/PVP3 e de 10% para amostra MWCNT2.

De modo geral, observou-se que a condutividade térmica foi intensificada com o aumento da concentração de nanopartículas e da temperatura. Assim, foram observados

incrementos na condutividade em comparação com o fluido base de até 6,4%, para nanofluidos de nanotubos de carbono. Para as amostras de nanofluidos de prata, destaca-se ainda a influência da concentração de surfactante dentro da amostra. Embora contribua para uma melhora da estabilidade, uma quantidade acima da ideal, pode limitar a intensificação desta propriedade.

A viscosidade também se mostrou dependente, da concentração de nanopartículas, da temperatura e da concentração de surfactante. Em relação à temperatura, foi observado uma diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura, causada pelo enfraquecimento das forças viscosas intermoleculares entre nanopartículas e moléculas do fluido base. Com relação ao surfactante, foi determinante para verificar um incremento nas amostras de prata, em particular, a amostra com maior concentração de nanopartículas (Ag/PVP3) mostrou um incremento similar ao da amostra MWCNT1, apesar de a concentração ser 10 vezes menor. O maior incremento nesta propriedade foi observado para a amostra MWCNT3 com um valor de 11%.

O modelo teórico utilizado para estimar a massa específica apresentou um desvio médio menor que 1%. O calor específico foi determinado a partir do modelo teórico, e sua validação sucedeu a partir de parâmetros outrora reconhecidos, apresentados na bibliografia consultada.

Foram propostas correlações entre a condutividade térmica e viscosidade (propriedades termofísicas dos nanofluidos) com as variáveis concentração e temperatura a partir dos resultados experimentais das amostras de nanotubos de carbono. Nesse sentido, quando comparados os valores obtidos, os desvios médios inferiores a 1,5% e 3%, respectivamente, para a condutividade térmica e viscosidade dinâmica.

A validação da bancada experimental foi realizada com o fluido base e, a comparação entre a taxa de transferência de calor do lado do ar e do lado do líquido de arrefecimento indicou um desvio máximo de 6%, apresentando um desvio médio de 2,2%. Esses resultados comprovam que o erro experimental está dentro da faixa aceita pela norma ASHRAE. Além disso, os resultados experimentais para o fluido base também foram comparados com os resultados da simulação utilizando o modelo de correlação de Hornbeck (1965), apresentando desvio máximo de 12%.

Nos testes realizados com nanofluido de prata (Ag/PVP) foi notado que a taxa de transferência de calor foi inferior em comparação com os nanofluidos de nanotubos de carbono (MWCNT), aproximando-se do comportamento do fluido base, com incrementos máximos de 1,28%. Essa observação foi feita a uma temperatura de 80 °C, para temperaturas superiores, este valor é reduzido para 0,7%.

Para os nanofluidos de nanotubos de carbono, a partir dos testes realizados a uma temperatura de entrada de 90 °C, verificou-se incrementos de até 3,7% na taxa de transferência de calor. Por outro lado, nos testes com temperatura de entrada de 105 °C, a taxa de transferência de calor desses nanofluidos foi de até 2%, quando comparado ao fluido base, indicando que nanofluidos apresentaram maior potencial de aplicações em temperaturas de 80 °C e 90 °C, obtendo desempenhos menores em temperaturas mais elevadas.

A análise complementar, referente ao comportamento do coeficiente global de transferência de calor, foi obtido um resultado de incremento máximo de 4% para uma temperatura de 80 °C, reforçando a ideia de que os nanofluidos analisados, apresentaram vantagens ligeiramente superiores com relação ao fluido base, na faixa de aplicações específicas desta pesquisa.

Os resultados da queda de pressão para as amostras de nanofluido, apresentaram incrementos significativos quando comparados àqueles obtidos para o fluido base, principalmente para as amostras mais concentradas. Este comportamento resulta, em parte, do desgaste das engrenagens da bomba ao longo dos testes (conferido visualmente após a finalização dos testes), além da maior viscosidade dos nanofluidos.

Para os casos em que aumentos na potência de bombeamento foram superiores aos incrementos na taxa de transferência de calor, observou-se que o coeficiente de desempenho termo-hidráulico foi menor que 1. Assim, de modo geral, o desempenho termo-hidráulico para os nanofluidos de prata foi insatisfatório para todas as concentrações, mesmo com uma condutividade térmica aumentada e baixos incrementos na viscosidade dinâmica.

No caso das amostras de nanotubos de carbono, o coeficiente de desempenho termo-hidráulico foi maior para a amostra MWCNT2, mesmo com incrementos menores na taxa de transferência de calor, quando comparada a amostra MWCNT3. Esse comportamento se deve ao fato de que a potência de bombeamento necessária ser suficientemente elevada a fim de obter um coeficiente de desempenho menor para a amostra MWCNT3. Em adição, o índice de performance econômica para a produção das amostras foi também superior para amostra MWCNT2, reforçando a ideia de que para uma possível aplicação real, uma concentração volumétrica de 0,05% é a indicada. No entanto, ainda serão necessários realizar ensaios em um sistema de arrefecimento automotivo real a fim de determinar o impacto global do aprimoramento da taxa de transferência de calor e da potência de bombeamento.

A análise de estabilidade também foi realizada para a amostra MWCNT2, após os ensaios na bancada experimental. Uma degradação foi evidenciada após os testes, uma vez que, fazendo o uso das técnicas de análise quantitativas, foi observada uma sedimentação e

aglomeração rápida. Em apenas 24 horas, as nanopartículas dispersas no interior da amostra sedimentaram quase que completamente, com uma diminuição na concentração relativa de 90% e um aumento no tamanho médio das nanopartículas.

A utilização do código computacional HETE demonstrou ser útil para realização das simulações numéricas, a fim de prever o comportamento das amostras de nanotubos de carbono ensaiadas nesta tese. A simplicidade do modelo para utilização e adaptação permitiu explorar o uso das correlações encontradas na literatura para regime de escoamento laminar. O menor desvio médio absoluto encontrado em relação aos resultados experimentais foi de 4,1% para as correlações comparadas. Com base nesses resultados, pode-se concluir que a abordagem numérica aplicada consegue prever de forma coerente a taxa de transferência de calor, demonstrando sua adequação e potencial para ser replicada em outras análises.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliação o desempenho termo-hidráulico (transferência de calor e potência de bombeamento) de radiadores automotivos de diferentes geometrias e materiais.
- Ensaio em um sistema de arrefecimento real onde além do comportamento em regime permanente, também possa ser avaliado o comportamento transitório do sistema operando com nanofluidos.
- Nos ensaios com nanofluidos em um sistema de arrefecimento real, analisar o impacto do uso de nanofluidos em outros parâmetros como: corrosão, desgaste, temperaturas médias do óleo lubrificante, eficiência do motor e viabilidade técnico-econômica.
- O estudo dos potenciais riscos e benefícios associados ao uso dos nanofluidos para a saúde humana e o meio ambiente, especialmente quando o manuseio e o descarte apropriados não são devidamente considerados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, F. et al. Nanofluid: Potential evaluation in automotive radiator. **Journal of Molecular Liquids**, v. 297, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112014>

ABBAS, F. et al. Towards convective heat transfer optimization in aluminum tube automotive radiators: Potential assessment of novel Fe₂O₃-TiO₂/water hybrid nanofluid. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 124, p. 424–436, fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.02.002>

ADHAMI DEHKORDI, R.; HEMMAT ESFE, M.; AFRAND, M. Effects of functionalized single walled carbon nanotubes on thermal performance of antifreeze: An experimental study on thermal conductivity. **Applied Thermal Engineering**, v. 120, p. 358–366, jun. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.009>

ADUN, H.; WOLE-OSHO, I.; OKONKWO, E. C.; KAVAZ, D.; DAGBASI, M. A critical review of specific heat capacity of hybrid nanofluids for thermal energy applications. **Journal of Molecular Liquids**, v. 340, p. 116890, out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116890>

AFRAND, M.; TOGHRAIE, D.; SINA, N. Experimental study on thermal conductivity of water-based Fe₃O₄ nanofluid: Development of a new correlation and modeled by artificial neural network. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 75, p. 262–269, jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.04.023>

AHMED, S. A.; OZKAYMAK, M.; SÖZEN, A.; MENLIK, T.; FAHED, A. Improving car radiator performance by using TiO₂-water nanofluid. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 21, n. 5, p. 996–1005, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.07.008>

AKASH, A. R.; ABRAHAM, S.; PATTAMATTA, A.; DAS, S. K. Experimental Assessment of the Thermo-Hydraulic Performance of Automobile Radiator with Metallic and Nonmetallic

Nanofluids. **Heat Transfer Engineering**, v. 41, n. 3, p. 235–251, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1528055>

AKASH, A. R.; PATTAMATTA, A.; DAS, S. K. Experimental study of the thermohydraulic performance of water/ethylene glycol-based graphite nanocoolant in vehicle radiators. **Journal of Enhanced Heat Transfer**, v. 26, n. 4, p. 345–363, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1615/JEnhHeatTransf.2019028304>

AKBARI, M.; AFRAND, M.; ARSHI, A.; KARIMIPOUR, A. An experimental study on rheological behavior of ethylene glycol based nanofluid: Proposing a new correlation as a function of silica concentration and temperature. **Journal of Molecular Liquids**, v. 233, p. 352–357, maio 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.03.020>

AKOH, H.; TSUKASAKI, Y.; YATSUYA, S.; TASAKI, A. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. **Journal of Crystal Growth**, v. 45, p. 495–500, 1978. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(78\)90482-7](https://doi.org/10.1016/0022-0248(78)90482-7)

AL-WAELI, A. H. A.; CHAICHAN, M. T.; SOPIAN, K.; KAZEM, H. A. Influence of the base fluid on the thermo-physical properties of PV/T nanofluids with surfactant. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 13, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.10.001>

ALI, A. R. I.; SALAM, B. A review on nanofluid: preparation, stability, thermophysical properties, heat transfer characteristics and application. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 10, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03427-1>

ALI, N.; TEIXEIRA, J. A.; ADDALI, A. A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties. **Journal of Nanomaterials**, v. 2018, p. 1–33, 4 jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/6978130>

ALIREZAIE, A.; HAJMOHAMMAD, M. H.; ALIPOUR, A.; SALARI, M. Do nanofluids affect the future of heat transfer? “A benchmark study on the efficiency of nanofluids”. **Energy**, v. 157, p. 979–989, ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.060>

ALOSIOUS, S.; SARATH, R.; NAIR, A. R.; KRISHNAKUMAR, K. Experimental and numerical study on heat transfer enhancement of flat tube radiator using Al₂O₃ and CuO nanofluids. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 53, n. 12, p. 3545–3563, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2061-0>

ANGAYARKANNI, S. A.; PHILIP, J. Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 225, p. 146–176, nov. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.08.014>

ANSI/ASHRAE STANDARD 33. **Method of Testing Forced Circulation Air Cooling and Air Heating Coils**. Atlanta: ASHRAE, 2000.

ANSI/ASHRAE STANDARD 41.2. **Standard Methods for Laboratory Air-flow Measurement**. Atlanta: ASHRAE, 1987.

ARSHAD, A.; JABBAL, M.; YAN, Y.; REAY, D. A review on graphene based nanofluids: Preparation, characterization and applications. **Journal of Molecular Liquids**, v. 279, p. 444–484, abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.153>

ARZANI, H. K.; AMIRI, A.; KAZI, S. N.; CHEW, B. T.; BADARUDIN, A. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.09.007>

ASADI, A. et al. Effect of sonication characteristics on stability, thermophysical properties, and heat transfer of nanofluids: A comprehensive review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 58, p. 104701, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104701>

ASHOK KUMAR, V.; ARIVAZHAGAN, D. S.; BALAJI, T. Experimental investigation of an automobile radiator using carbon based hybrid nano coolant. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 193, p. 108497, nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108497>

ASHRAE STANDARD. **ASHRAE Handbook: Fundamentals**. Atlanta: ASHRAE, 2001.

BABAR, H.; ALI, H. M. Towards hybrid nanofluids: Preparation, thermophysical properties, applications, and challenges. **Journal of Molecular Liquids**, v. 281, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.02.102>

BABITA; SHARMA, S. K.; GUPTA, S. M. Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: A review. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 79, n. July, p. 202–212, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.029>

BAKTHAVATCHALAM, B.; HABIB, K.; SAIDUR, R.; SAHA, B. B.; IRSHAD, K. Comprehensive

study on nanofluid and ionanofluid for heat transfer enhancement: A review on current and future perspective. **Journal of Molecular Liquids**, v. 305, p. 112787, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112787>

BARGAL, M. H. S. et al. Experimental investigation of the thermal performance of a radiator using various nanofluids for automotive PEMFC applications. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n. 5, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/er.6274>

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. 01, p. 97–117, 1977.

BELL, I. H.; WRONSKI, J.; QUOILIN, S.; LEMORT, V. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 6, p. 2498–2508, 12 fev. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ie4033999>

BHATTACHARJEE, S. DLS and zeta potential – What they are and what they are not? **Journal of Controlled Release**, v. 235, p. 337–351, ago. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>

BIGDELI, M. B.; FASANO, M.; CARDELLINI, A.; CHIAVAZZO, E.; ASINARI, P. A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1615–1633, jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.027>

BOBBO, S. et al. Viscosity of water based SWCNH and TiO₂ nanofluids. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 36, p. 65–71, jan. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.08.004>

BORODE, A. O.; AHMED, N. A.; OLUBAMBI, P. A.; SHARIFPUR, M.; MEYER, J. P. Effect of Various Surfactants on the Viscosity, Thermal and Electrical Conductivity of Graphene Nanoplatelets Nanofluid. **International Journal of Thermophysics**, v. 42, n. 11, p. 158, 29 nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10765-021-02914-w>

BRIGGS, D. E.; YOUNG, E. H. **Modified Wilson plot techniques for obtaining heat transfer correlations for shell and tube heat exchangers**. . Chemical Engineering Progress Symposium Series. **Anais...AIChE**, New York, NY, 1969

BRINKMAN, H. C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. **The Journal of**

Chemical Physics, v. 20, n. 4, p. 571, 1952. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1700493>

BUONGIORNO, J. et al. A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 106, n. 9, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.3245330>

CABEZAS-GÓMEZ, L.; NAVARRO, H. A.; SAIZ-JABARDO, J. M. **Thermal Performance Modeling of Cross-Flow Heat Exchangers**. London, England: Springer Cham, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09671-1>

CARDENAS CONTRERAS, E. **Avaliação experimental do desempenho termohidráulico de nanofluidos de grafeno em um sistema de arrefecimento automotivo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 3 abr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2017.317>

CARDENAS CONTRERAS, E. M.; OLIVEIRA, G. A.; BANDARRA FILHO, E. P. Experimental analysis of the thermohydraulic performance of graphene and silver nanofluids in automotive cooling systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 132, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.014>

CÁRDENAS GÓMEZ, A. O. **Avaliação experimental da transferência de calor e perda de pressão de nanofluidos em escoamento monofásico em dutos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 7 jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2043>

CHAKRABORTY, S.; PANIGRAHI, P. K. Stability of nanofluid: A review. **Applied Thermal Engineering**, v. 174, p. 115259, jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115259>

CHAKRABORTY, S.; SARKAR, I.; BEHERA, D. K.; PAL, S. K.; CHAKRABORTY, S. Experimental investigation on the effect of dispersant addition on thermal and rheological characteristics of TiO₂ nanofluid. **Powder Technology**, v. 307, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.016>

CHAURASIA, P. et al. Heat transfer augmentation in automobile radiator using Al₂O₃–water based nanofluid. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 257, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0260-7>

CHAVAN, D.; PISE, A. Experimental Investigation of Effective Viscosity and Density of Nanofluids. **Materials Today: Proceedings**, v. 16, p. 504–515, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.122>

CHEN, H.; DING, Y.; HE, Y.; TAN, C. Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids. **Chemical Physics Letters**, v. 444, n. 4–6, p. 333–337, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2007.07.046>

CHEN, Z.; SHAHSAVAR, A.; AL-RASHED, A. A. A. A.; AFRAND, M. The impact of sonication and stirring durations on the thermal conductivity of alumina-liquid paraffin nanofluid: An experimental assessment. **Powder Technology**, v. 360, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.036>

CHIAM, H. W.; AZMI, W. H.; USRI, N. A.; MAMAT, R.; ADAM, N. M. Thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃ nanofluids for different based ratio of water and ethylene glycol mixture. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 81, p. 420–429, fev. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.09.013>

CHOI, H. **Geometrical Effect on Ultrasonic Processing for Metal Matrix Nanocomposites (MMNCs)**. Disponível em: <http://clemsonblog.wpenginepowered.com/mechanical-engineering/files/2015/10/MEGSC-poster15_PAVANPasumarthi.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2022.

CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in D.A Singiner, and Wang, H.P. (Eds.). **ASME, New York**, v. FED-231/MD, p. 99–105, 1995.

CHOI, S. U. S.; ZHANG, Z. G.; YU, W.; LOCKWOOD, F. E.; GRULKE, E. A. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. **Applied Physics Letters**, v. 79, n. 14, p. 2252–2254, out. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1408272>

CHOI, T. J.; JANG, S. P.; KEDZIERSKI, M. A. Effect of surfactants on the stability and solar thermal absorption characteristics of water-based nanofluids with multi-walled carbon nanotubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 122, p. 483–490, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.141>

CONTRERAS, E. M.; OLIVEIRA, G. A.; BANDARRA FILHO, E. P. Experimental analysis of the thermohydraulic performance of graphene and silver nanofluids in automotive cooling systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 132, p. 375–387, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.014>

CUI, X. et al. Tribological properties under the grinding wheel and workpiece interface by using

graphene nanofluid lubricant. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 9–12, p. 3943–3958, 25 out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04129-8>

DING, Y.; ALIAS, H.; WEN, D.; WILLIAMS, R. A. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 49, n. 1–2, p. 240–250, jan. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.009>

DITTUS, F. W.; BOELTER, L. M. K. **Heat transfer in automobile radiators of the tubular type**. Berkeley, Calif: University of California Press, 1930.

EINSTEIN, A. **Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen**. Dissertation, Zurich: Universität Zurich, 1905.

ELIBOL, E. A.; TURGUT, O.; AKTAS, F.; SENOL, H.; CELIK, A. F. Experimental investigation on heat transfer and flow characteristics of TiO₂-water nanofluid in a heavy vehicle radiator. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 148, n. 3, p. 977–994, 6 fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11817-3>

ELSAID, A. M. Experimental study on the heat transfer performance and friction factor characteristics of Co₃O₄ and Al₂O₃ based H₂O/(CH₂OH)₂ nanofluids in a vehicle engine radiator. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 108, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.05.009>

EVANS, W. et al. Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 5–6, p. 1431–1438, mar. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.017>

GAO, Y.; WANG, H.; SASMITO, A. P.; MUJUMDAR, A. S. Measurement and modeling of thermal conductivity of graphene nanoplatelet water and ethylene glycol base nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 123, p. 97–109, ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.089>

GHASEMI, A.; HASSANI, M.; GOODARZI, M.; AFRAND, M.; MANAFI, S. Appraising influence of COOH-MWCNTs on thermal conductivity of antifreeze using curve fitting and neural network. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 514, p. 36–45, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.09.004>

GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. **International chemical engineering**, v. 16, n. 2, p. 359–367, 1976.

GUO, Z. A review on heat transfer enhancement with nanofluids. **Journal of Enhanced Heat Transfer**, v. 27, n. 1, p. 1–70, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1615/JEnhHeatTransf.2019031575>

GUPTA, M.; SINGH, V.; KUMAR, R.; SAID, Z. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 638–670, jul. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.073>

HAMILTON, R. L. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 1, n. 3, p. 187–191, 1962. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/i160003a005>

HASSANI, S. M.; KHOSHVAGHT-ALIABADI, M.; MAZLOUMI, S. H. Influence of chevron fin interruption on thermo-fluidic transport characteristics of nanofluid-cooled electronic heat sink. **Chemical Engineering Science**, v. 191, p. 436–447, dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.07.010>

HEMMAT ESFE, M.; SAEDODIN, S.; MAHIAN, O.; WONGWISES, S. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.08.035>

HOLMAN, J. P. **Heat Transfer**. 10th Ed. ed. NY: McGraw-Hill Higher Education, 2010.

HORNBECK, R. W. An all-numerical method for heat transfer in the inlet of a tube. **ASME**, v. Paper WA/H, 1965.

HUMINIC, A.; HUMINIC, G.; FLEACA, C.; DUMITRACHE, F.; MORJAN, I. Thermal conductivity, viscosity and surface tension of nanofluids based on FeC nanoparticles. **Powder Technology**, v. 284, p. 78–84, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.040>

IJAM, A.; SAIDUR, R.; GANESAN, P.; MORADI GOLSHEIKH, A. Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide-deionized water/ethylene glycol based nanofluid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 87, p. 92–103, 2015.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.060>

ILYAS, S. U.; PENDYALA, R.; MARNENI, N. Settling Characteristics of Alumina Nanoparticles in Ethanol-Water Mixtures. **Applied Mechanics and Materials**, v. 372, p. 143–148, ago. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.372.143>

ILYAS, S. U.; PENDYALA, R.; MARNENI, N. Stability of Nanofluids. In: SHARMA KORADA, V.; B HAMID, N. H. (Eds.). . **Engineering Applications of Nanotechnology**. Malaysia: Springer International Publishing, 2017. p. 1–31. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-29761-3_1

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. Reino Unido: Wiley, 2007.

INKSON, B. J. Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) for Materials Characterization. In: HÜBSCHEN, G.; ALTPETER, I.; TSCHUNCKY, R.; HERRMANN, H.-G. (Eds.). . **Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods**. UK: Elsevier Ltd, 2016. p. 17–43. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X>

ISLAM, R.; SHABANI, B.; ANDREWS, J.; ROSENGARTEN, G. Experimental investigation of using ZnO nanofluids as coolants in a PEM fuel cell. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 30, p. 19272–19286, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.087>

IYAHRAJA, S.; RAJADURAI, J. S. Study of thermal conductivity enhancement of aqueous suspensions containing silver nanoparticles. **AIP Advances**, v. 5, n. 5, p. 1–9, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4919808>

JADAR, R.; SHASHISHEKAR, K. S.; MANOHARA, S. R. f- MWCNT Nanomaterial Integrated Automobile Radiator. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 10, p. 11028–11033, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.08.062>

JADAR, R.; SHASHISHEKAR, K. S.; MANOHARA, S. R. Performance Evaluation of Al-MWCNT based Automobile Radiator. **Materials Today: Proceedings**, v. 9, p. 380–388, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.02.167>

JIANG, H.; XU, Q.; HUANG, C.; SHI, L. The role of interfacial nanolayer in the enhanced thermal conductivity of carbon nanotube-based nanofluids. **Applied Physics A**, v. 118, n. 1,

p. 197–205, 25 jan. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8902-5>

JIANG, L.; GAO, L.; SUN, J. Production of aqueous colloidal dispersions of carbon nanotubes. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 260, n. 1, p. 89–94, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(02\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(02)00176-5)

JWO, C.-S.; JENG, L.-Y.; TENG, T.-P.; CHEN, C.-C. Performance of overall heat transfer in multi-channel heat exchanger by alumina nanofluid. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 504, p. S385–S388, ago. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.02.051>

KANTI, P.; SHARMA, K. V.; RAJA SEKHAR, Y. Influence of particle size on thermal conductivity and dynamic viscosity of water-based Indian coal fly ash nanofluid. **Heat Transfer**, v. 51, n. 1, p. 413–433, 6 jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/htj.22313>

KASAEIAN, A.; DANESHAZARIAN, R.; REZAEI, R.; POURFAYAZ, F.; KASAEIAN, G. Experimental investigation on the thermal behavior of nanofluid direct absorption in a trough collector. **Journal of Cleaner Production**, v. 158, p. 276–284, ago. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.131>

KAYS, W. M.; LONDON, A. L. **Compact Heat Exchangers**. 3. ed. [s.l.] Krieger Publishing Company, 1998.

KHAIRUL, M. A.; SHAH, K.; DOROODCHI, E.; AZIZIAN, R.; MOGHTADERI, B. Effects of surfactant on stability and thermo-physical properties of metal oxide nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 98, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.079>

KHAN, A. et al. Experimental investigation of enhanced heat transfer of a car radiator using ZnO nanoparticles in H₂O–ethylene glycol mixture. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 138, n. 5, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08320-7>

KHODADADI, H.; TOGHRAIE, D.; KARIMIPOUR, A. Effects of nanoparticles to present a statistical model for the viscosity of MgO-Water nanofluid. **Powder Technology**, v. 342, p. 166–180, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.076>

KISHORE, P. S.; SIREESHA, V.; SREE HARSHA, V.; DHARMA RAO, V.; BRUSLY SOLOMON, A. Preparation, characterization and thermo-physical properties of Cu-graphene nanoplatelets hybrid nanofluids. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 610–614, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.108>

KOO, J.; KLEINSTREUER, C. Impact analysis of nanoparticle motion mechanisms on the thermal conductivity of nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 32, n. 9, p. 1111–1118, out. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.014>

KUMAR, A.; CHAND, P.; HASSAN, M. A. Louvered finned car radiator with MWCNT-SiO₂ hybrid nanofluid: An experimental approach. **Powder Technology**, v. 415, p. 118176, fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118176>

KUMAR, P. G.; KUMARESAN, V.; VELRAJ, R. Stability, viscosity, thermal conductivity, and electrical conductivity enhancement of multi-walled carbon nanotube nanofluid using gum arabic. **Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures**, v. 25, n. 4, p. 230–240, 3 abr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2017.1283615>

KUMAR, P.; SARVIYA, R. M. Recent developments in preparation of nanofluid for heat transfer enhancement in heat exchangers: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 2356–2361, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.434>

KUMAR, S.; DINESHA, P.; GAGGAD, A.; MEHROTRA, K. Performance of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolant. **Heat Transfer Research**, v. 49, n. 16, p. 1527–1543, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2018020810>

KUMAR SHARMA, A.; KUMAR TIWARI, A.; RAI DIXIT, A.; KUMAR SINGH, R. Measurement of machining forces and surface roughness in turning of AISI 304 steel using alumina-MWCNT hybrid nanoparticles enriched cutting fluid. **Measurement**, v. 150, p. 107078, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107078>

KUMARESAN, V.; VELRAJ, R. Experimental investigation of the thermo-physical properties of water-ethylene glycol mixture based CNT nanofluids. **Thermochimica Acta**, v. 545, p. 180–186, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.07.017>

LI, M.-J.; LI, M.-J.; HE, Y.-L.; TAO, W.-Q. A novel semi-empirical model on predicting the thermal conductivity of diathermic oil-based nanofluid for solar thermal application. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 138, p. 1002–1013, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.080>

LI, X.; WANG, H.; LUO, B. The thermophysical properties and enhanced heat transfer performance of SiC-MWCNTs hybrid nanofluids for car radiator system. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 612, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125968>

LI, Y.; ZHOU, J.; TUNG, S.; SCHNEIDER, E.; XI, S. A review on development of nanofluid preparation and characterization. **Powder Technology**, v. 196, n. 2, p. 89–101, dez. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.07.025>

LO, C. H.; TSUNG, T. T.; CHEN, L. C.; SU, C. H.; LIN, H. M. Fabrication of copper oxide nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). **Journal of Nanoparticle Research**, v. 7, n. 2–3, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11051-004-7770-x>

M'HAMED, B.; CHE SIDIK, N. A.; AKHBAR, M. F. A.; MAMAT, R.; NAJAFI, G. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.024>

MAGHRABIE, H. M.; MOUSA, H. M. Thermal Performance Intensification of Car Radiator Using SiO₂/Water and ZnO/Water Nanofluids. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, v. 14, n. March, p. 1–12, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4051382>

MAHBUBUL, I. M.; ELCIOGLU, E. B.; AMALINA, M. A.; SAIDUR, R. Stability, thermophysical properties and performance assessment of alumina–water nanofluid with emphasis on ultrasonication and storage period. **Powder Technology**, v. 345, p. 668–675, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.041>

MAISURIA, M. B.; SONAR, D. M.; RATHOD, M. K.; BHATT, M. K. Experimental and analytical investigation on an automobile radiator with CuO/EG-water based nanofluid as coolant. **Heat Transfer - Asian Research**, v. 48, n. 6, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/htj.21516>

MARÉ, T. et al. Comparison of the thermal performances of two nanofluids at low temperature in a plate heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 35, n. 8, p. 1535–1543, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.07.004>

MARQUARDT, D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431–441, jun. 1963. Disponível em: <https://doi.org/10.1137/0111030>

MASUDA, H.; EBATA, A.; TERAMAE, K.; HISHINUMA, N. Alteration of Thermal Conductivity

and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles. Dispersion of Al_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 Ultra-Fine Particles. **Netsu Bussei**, v. 7, n. 4, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.2963/jjtp.7.227>

MAXWELL, J. C. **A Treatise on Electricity and Magnetism. A Treatise on Electricity and Magnetism**, 1873. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511709340>

MEHTA, B.; SUBHEDAR, D.; PANCHAL, H.; SAID, Z. Synthesis, stability, thermophysical properties and heat transfer applications of nanofluid – A review. **Journal of Molecular Liquids**, v. 364, p. 120034, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120034>

MEYER, J. P.; ADIO, S. A.; SHARIFPUR, M.; NWOSU, P. N. The Viscosity of Nanofluids: A Review of the Theoretical, Empirical, and Numerical Models. **Heat Transfer Engineering**, v. 37, n. 5, p. 387–421, 23 mar. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01457632.2015.1057447>

MEYER, J. P.; MCKRELL, T. J.; GROTE, K. The influence of multi-walled carbon nanotubes on single-phase heat transfer and pressure drop characteristics in the transitional flow regime of smooth tubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 58, n. 1–2, p. 597–609, mar. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.074>

MINEA, A. A.; ESTELLÉ, P. Numerical study on CNT nanofluids behavior in laminar pipe flow. **Journal of Molecular Liquids**, v. 271, p. 281–289, dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.161>

MISHRA, P. C.; MUKHERJEE, S.; NAYAK, S. K.; PANDA, A. A brief review on viscosity of nanofluids. **International Nano Letters**, v. 4, n. 4, p. 109–120, 7 dez. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40089-014-0126-3>

MOHAMMADI, M.; TAHERI, A.; PASSANDIDEH-FARD, M.; SARDARABADI, M. Electronic chipset thermal management using a nanofluid-based mini-channel heat sink: An experimental study. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 118, p. 104836, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104836>

MUKHERJEE, S.; WCIŚLIK, S.; CHANDRA MISHRA, P.; CHAUDHURI, P. Nanofluids: Critical issues, economics and sustainability perspectives. **Particuology**, v. 87, p. 147–172, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.06.021>

MUKKAMALA, Y. Contemporary trends in thermo-hydraulic testing and modeling of automotive radiators deploying nano-coolants and aerodynamically efficient air-side fins. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, n. January 2016, p. 1208–1229, 2017.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.106>

MURSHED, S. M. S.; LEONG, K. C.; YANG, C. A model for predicting the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid suspensions. **International Journal of Nanoscience**, v. 05, n. 01, p. 23–33, 21 fev. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1142/S0219581X06004127>

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, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(03\)00956-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(03)00956-4)

NANOAMOR. **Nanostructured & Amorphous Materials**. Disponível em: <https://nanoamor.com>. Acesso em: 26 jun. 2018.

NAVARRO, H. A.; CABEZAS-GÓMEZ, L. A new approach for thermal performance calculation of cross-flow heat exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, n. 18, p. 3880–3888, ago. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.03.027>

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.02.004>

NIEH, H. M.; TENG, T. P.; YU, C. C. Enhanced heat dissipation of a radiator using oxide nano-coolant. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 77, p. 252–261, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.11.008>

OLIVEIRA, G. **Análise experimental do desempenho térmico de nanofluidos em radiadores automotivos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 30 ago. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2016.126>

OLIVEIRA, G. A.; BANDARRA FILHO, E. P.; WEN, D. Synthesis and characterization of silver / water nanofluids. **High Temperatures-High Pressures**, v. 43, p. 69–83, 2014.

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

Thermal Engineering, 2016. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.086>

OLIVEIRA, G. A.; CARDENAS CONTRERAS, E. M.; BANDARRA FILHO, E. P. Experimental study of thermophysical properties of MWCNT and graphene coolant nanofluids for automotive application. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 43, n. 3, p. 140, 17 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02870-4>

OLIVEIRA, L. R. **Síntese e caracterização de nanofluidos para aplicação em sistemas térmicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 22 mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2018.753>

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>

PAULE PILENI, M. Optical properties of nanosized particles dispersed in colloidal solutions or arranged in 2D or 3D superlattices. **New Journal of Chemistry**, v. 22, n. 7, p. 693–702, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/a709218k>

PAVITHRA, K. S. et al. Polymer-dispersant-stabilized Ag nanofluids for heat transfer applications. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, n. July, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10064-8>

PETUKHOV, B. S. Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties. In: HARTNETT, J. P.; IRVINE JR., T. F. (Eds.). **Advances in heat transfer**. [s.l.] Elsevier, 1970. v. 6p. 503–564. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70153-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70153-9)

PONANGI, B.; SUMANTH, S.; KRISHNA, V.; SEETHARAM, T.; SEETHARAMU, K. Heat transfer analysis of radiator using graphene oxide nanofluids Heat transfer analysis of radiator using graphene oxide nanofluids. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/346/1/012032>

QASIM, M.; SAJID KAMRAN, M.; AMMAR, M.; ALI JAMAL, M.; YASAR JAVAID, M. Heat Transfer Enhancement of an Automobile Engine Radiator using ZnO Water Base Nanofluids. **Journal of Thermal Science**, v. 29, n. 4, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11630-020-1263-9>

QIU, L. et al. A review of recent advances in thermophysical properties at the nanoscale: From solid state to colloids. **Physics Reports**, v. 843, p. 1–81, fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.12.001>

RAEI, B.; PEYGHAMBARZADEH, S. M.; SALEHI ASL, R. Experimental investigation on heat transfer and flow resistance of drag-reducing alumina nanofluid in a fin-and-tube heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, v. 144, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.006>

RAMALINGAM, S.; DHAIRIYASAMY, R.; GOVINDASAMY, M. Assessment of heat transfer characteristics and system physiognomies using hybrid nanofluids in an automotive radiator. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 150, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107886>

RAVISANKAR, R.; VENKATACHALAPATHY, V. S. K.; ALAGUMURTHI, N. Application of nanotechnology to improve the performance of tractor radiator using Cu-water nanofluid. **Journal of Thermal Engineering**, v. 4, n. 4, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18186/journal-of-thermal-engineering.434036>

RAZMARA, N.; NAMARVARI, H.; MENEGHINI, J. R. A new correlation for viscosity of model water-carbon nanotube nanofluids: Molecular dynamics simulation. **Journal of Molecular Liquids**, v. 293, p. 111438, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111438>

REINERT, L.; ZEIGER, M.; SUÁREZ, S.; PRESSER, V.; MÜCKLICH, F. Dispersion analysis of carbon nanotubes, carbon onions, and nanodiamonds for their application as reinforcement phase in nickel metal matrix composites. **RSC Advances**, v. 5, n. 115, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c5ra14310a>

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.004>

SADRI, R. et al. A facile, bio-based, novel approach for synthesis of covalently functionalized graphene nanoplatelet nano-coolants toward improved thermo-physical and heat transfer properties. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 509, p. 140–152, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.052>

SAID, Z. et al. Enhancing the performance of automotive radiators using nanofluids.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 112, p. 183–194, set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.052>

SAID, Z. et al. Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids. **Physics Reports**, v. 946, p. 1–94, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2021.07.002>

SAJID, M. U.; ALI, H. M. Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, n. January, p. 556–592, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.057>

SALAMON, V.; SENTHIL KUMAR, D.; THIRUMALINI, S. Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Automobile Radiator using TiO₂ -Nanofluid Coolant. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 225, p. 012101, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/225/1/012101>

SANDHU, H.; GANGACHARYULU, D. An experimental study on stability and some thermophysical properties of multiwalled carbon nanotubes with water–ethylene glycol mixtures. **Particulate Science and Technology**, v. 35, n. 5, p. 547–554, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1180335>

SANGEETHA, M.; MANIGANDAN, S.; ASHOK, B.; BRINDHADEVI, K.; PUGAZHENDHI, A. Experimental investigation of nanofluid based photovoltaic thermal (PV/T) system for superior electrical efficiency and hydrogen production. **Fuel**, v. 286, p. 119422, fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119422>

SARAFRAZ, M. M.; HORMOZI, F. Heat transfer, pressure drop and fouling studies of multi-walled carbon nanotube nanofluids inside a plate heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 72, p. 1–11, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.11.004>

SARSAM, W. S. et al. Synthesis, stability, and thermophysical properties of aqueous colloidal dispersions of multi-walled carbon nanotubes treated with beta-alanine. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 89, n. October, p. 7–17, dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.09.006>

SELVAM, C.; LAL, D. M.; HARISH, S.; MOHAN LAL, D.; HARISH, S. Enhanced heat transfer performance of an automobile radiator with graphene based suspensions. **Applied Thermal**

Engineering, v. 123, p. 50–60, 2017a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.076>

SELVAM, C.; SOLAIMALAI RAJA, R.; MOHAN LAL, D.; HARISH, S. Overall heat transfer coefficient improvement of an automobile radiator with graphene based suspensions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 115, p. 580–588, 2017b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.071>

SHAH, R. K. **Thermal entry length solutions for the circular tube and parallel plates**. . Proceedings of 3rd national heat and mass transfer conference. **Anais...**1975

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4404-8>

SHANKARA, R. P. et al. An insight into the performance of radiator system using ethylene glycol-water based graphene oxide nanofluids. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 7, p. 5155–5167, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.037>

SHARMA, S. Fabricating an experimental setup to investigate the performance of an automobile car radiator by using aluminum/water nanofluid. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 133, n. 3, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7224-9>

SINGH, S.; BHARTI, A.; MEENA, V. K. Green synthesis of multi-shaped silver nanoparticles: optical, morphological and antibacterial properties. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 26, n. 6, p. 3638–3648, 11 jun. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10854-015-2881-y>

SIVALINGAM, V. et al. An automotive radiator with multi-walled carbon-based nanofluids : A study on heat transfer optimization using MCDM techniques. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 29, n. December 2021, p. 101724, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101724>

SOHRABI, N.; MASOUMI, N.; BEHZADMEHR, A.; SARVARI, S. M. H. A simple analytical model for calculating the effective thermal conductivity of nanofluids. **Heat Transfer—Asian Research**, v. 39, n. 3, p. 141–150, 23 maio 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/htj.20290>

SOKHAL, G. S.; GANGACHARYULU, D.; BULASARA, V. K. Heat transfer and pressure drop performance of alumina–water nanofluid in a flat vertical tube of a radiator. **Chemical Engineering Communications**, v. 205, n. 2, p. 257–268, 1 fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1387853>

SOLTANIMEHR, M.; AFRAND, M. Thermal conductivity enhancement of COOH-functionalized MWCNTs/ethylene glycol–water nanofluid for application in heating and cooling systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 105, p. 716–723, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.089>

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0438-x>

SONG, Y. Y.; BHADESHIA, H. K. D. H.; SUH, D. W. Stability of stainless-steel nanoparticle and water mixtures. **Powder Technology**, v. 272, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.11.026>

SRINIVAS, V.; MOORTHY, C. V. K. N. S. N.; DEDEEPIYA, V.; MANIKANTA, P. V.; SATISH, V. Nanofluids with CNTs for automotive applications. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 52, n. 4, p. 701–712, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1588-1>

SUBHEDAR, D. G.; RAMANI, B. M.; GUPTA, A. Experimental Investigation of Overall Heat Transfer Coefficient of Al₂O₃/Water–Mono Ethylene Glycol Nanofluids in an Automotive Radiator. **Heat Transfer - Asian Research**, v. 46, n. 7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/htj.21247>

SUBHEDAR, D. G.; RAMANI, B. M.; GUPTA, A. Experimental investigation of heat transfer potential of Al₂O₃/Water-Mono Ethylene Glycol nanofluids as a car radiator coolant. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 11, n. November 2017, p. 26–34, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.11.009>

SUBUDHI, S.; KUMAR, A. Application of Nanofluids for Radiator Cooling. **Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials**, p. 1–9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11463-8>

SUMANTH, S.; BABU RAO, P.; KRISHNA, V.; SEETHARAM, T.; SEETHARAMU, K. Effect of carboxyl graphene nanofluid on automobile radiator performance. **Heat Transfer-Asian**

Research, v. 47, n. 4, p. 669–683, jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/htj.21335>

SUNDAR, L. S. et al. Energy, efficiency, economic impact, and heat transfer aspects of solar flat plate collector with Al₂O₃ nanofluids and wire coil with core rod inserts. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 40, p. 100772, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100772>

SWINEHART, F. The Beer-Lambert Law. **Journal of Chemical Education**, v. 39, n. 7, p. 333–335, 1962.

TAYLOR, B. N.; KUYATT, C. E. **Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement**. [s.l.] National Institute for Standards and Technology (NIST), 1994. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/TN1297>>.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.03.007>

TETIK, T. et al. An experimental study on the heat transfer performance of a radiator using MWCNT-SiO₂ hybrid nanofluid. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 45, n. 4, p. 12590–12603, 2 out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2274504>

TIMOFEEVA, E. V.; ROUTBORT, J. L.; SINGH, D. Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 106, n. 1, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.3155999>

TIMOFEEVA, E. V.; SINGH, D.; YU, W.; FRANCE, D. M. **Development of Nanofluids for Cooling Power Electronics for Hybrid Electric Vehicles**. Argonne National Laboratory, 2014.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.118>

TIWARI, A. K.; KUMAR, A.; SAID, Z. Synthesis, characterization, and measurement techniques for the thermophysical properties of nanofluids. In: ALI, H. M. (Ed.). **Advances in Nanofluid Heat Transfer**. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 59–93. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88656-7.00012-X>

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.077>

VAJJHA, R. S.; DAS, D. K. A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 15–16, p. 4063–4078, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.048>

VAJJHA, R. S.; DAS, D. K.; KULKARNI, D. P. Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 21–22, p. 4607–4618, out. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.06.032>

WAGENER, M.; MURTY, B. S.; GUENTHER, B. **Preparation of metal nanosuspensions by high-pressure dc-sputtering on running liquids**. . Materials Research Society Symposium - Proceedings. **Anais...**1997Disponível em: <https://doi.org/10.1557/proc-457-149>

WANG, J. et al. A review on nanofluid stability: preparation and application. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 188, p. 113854, dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113854>

WANG, J.; LI, G.; LI, T.; ZENG, M.; SUNDÉN, B. Effect of various surfactants on stability and thermophysical properties of nanofluids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09381-9>

WANG, X. J.; LI, X.; YANG, S. Influence of pH and SDBS on the stability and thermal conductivity of nanofluids. **Energy and Fuels**, v. 23, n. 5, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef800865a>

WEI, H.; NOR, X.; CHE, A.; NAJAFI, S. G. Recent state of nanofluid in automobile cooling systems. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 3, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7477-3>

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. 042412, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2818775>

XIA, G.; JIANG, H.; LIU, R.; ZHAI, Y. Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al₂O₃/deionized water nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 84, p. 118–124, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.05.004>

XIE, H.; WANG, J.; XI, T.; LIU, Y. Thermal Conductivity of Suspensions Containing Nanosized SiC Particles. **International Journal of Thermophysics**, v. 23, n. 2, p. 571–580, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1015121805842>

XING, M.; YU, J.; WANG, R. Experimental investigation and modelling on the thermal conductivity of CNTs based nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 104, p. 404–411, jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.024>

XU, G.; FU, J.; DONG, B.; QUAN, Y.; SONG, G. A novel method to measure thermal conductivity of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 130, p. 978–988, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.014>

XUAN, Y.; ROETZEL, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. v. 43, p. 3701–3707, 2000.

XUE, Q. Z. Model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites. **Physica B: Condensed Matter**, v. 368, n. 1–4, p. 302–307, nov. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.07.024>

YANG, L.; DU, K. A thermal conductivity model for low concentrated nanofluids containing surfactants under various dispersion types. **International Journal of Refrigeration**, v. 35, n. 7, p. 1978–1988, nov. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.07.013>

YANG, L.; XU, J.; DU, K.; ZHANG, X. Recent developments on viscosity and thermal conductivity of nanofluids. **Powder Technology**, v. 317, p. 348–369, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.04.061>

YANG, L.; XU, X. A renovated Hamilton–Crosser model for the effective thermal conductivity of CNTs nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 81, p. 42–50, fev. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.12.010>

YU-HUA, L.; WEI, Q.; JIAN-CHAO, F. Temperature Dependence of Thermal Conductivity of Nanofluids. **Chinese Physics Letters**, v. 25, n. 9, p. 3319–3322, set. 2008. Disponível em:

<https://doi.org/10.1088/0256-307X/25/9/060>

YU, F. et al. Dispersion stability of thermal nanofluids. **Progress in Natural Science: Materials International**, v. 27, n. 5, p. 531–542, out. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2017.08.010>

YU, W.; CHOI, S. U. S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Hamilton-Crosser model. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 6, n. 4, p. 355–361, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11051-004-2601-7>

YU, W.; XIE, H. **A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications.** **Journal of Nanomaterials**, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2012/435873>

YU, W.; XIE, H.; WANG, X.; WANG, X. Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets. **Physics Letters A**, v. 375, n. 10, p. 1323–1328, mar. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.01.040>

YUVARAJAN, D.; DINESH BABU, M.; BEEMKUMAR, N.; AMITH KISHORE, P. Experimental investigation on the influence of titanium dioxide nanofluid on emission pattern of biodiesel in a diesel engine. **Atmospheric Pollution Research**, v. 9, n. 1, p. 47–52, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.06.003>

ZHAI, Y.; LI, L.; WANG, J.; LI, Z. Evaluation of surfactant on stability and thermal performance of Al₂O₃-ethylene glycol (EG) nanofluids. **Powder Technology**, v. 343, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.051>

ZHOU, X. R.; WANG, Y.; ZHENG, K.; HUANG, H. Comparison of heat transfer performance of ZnO-PG, α -Al₂O₃-PG, and γ -Al₂O₃-PG nanofluids in car radiator. **Nanomaterials and Nanotechnology**, v. 9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1847980419876465>

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.04.026>

APÊNDICE I

Código no software EES para diluição da solução padrão a fim de determinar a quantidade de nanopartículas, água e etilenoglicol a serem adicionados para produção das amostras de nanofluido.

$$phi_{v_{mwcnt}} = 0,001 \quad \{0,025;0,05;0,1\}$$

$$V_{final} = 4500 \text{ [ml]} \quad \text{"Volume final de nanofluido"}$$

$$rho_{mwcnt} = 2,1 \text{ [g/ml]} \quad \text{"massa específica nanotubo de carbono"}$$

$$rho_{agua} = 0,998 \text{ [g/ml]} \quad \text{"massa específica da água"}$$

$$rho_{EG} = 1,113 \text{ [g/ml]} \quad \text{"massa específica do etilenoglicol"}$$

$$phi_{m_{sp}} = 5 \text{ [%]} \quad \text{"concentração de nanopartículas na solução padrão"}$$

$$V_{np} = V_{final} * phi_{v_{mwcnt}} \quad \text{"Volume de nanopartículas no nanofluido"}$$

$$m_{t_{np}} = V_{np} * rho_{mwcnt} \quad \text{"massa de nanopartículas no nanofluido"}$$

$$m_{agua_{sp}} = m_{t_{np}} * \frac{1 - phi_{m_{sp}}}{phi_{m_{sp}}} \quad \text{"massa de água na solução padrão"}$$

$$V_{agua_{sp}} = m_{agua_{sp}} * rho_{agua} \quad \text{"volume de água na solução padrão"}$$

$$V_{t_{sp}} = V_{agua_{sp}} + V_{np} \quad \text{"volume total de solução padrão"}$$

$$V_{fb} = V_{final} - V_{t_{sp}} \quad \text{"Volume de fluido base para adicionar"}$$

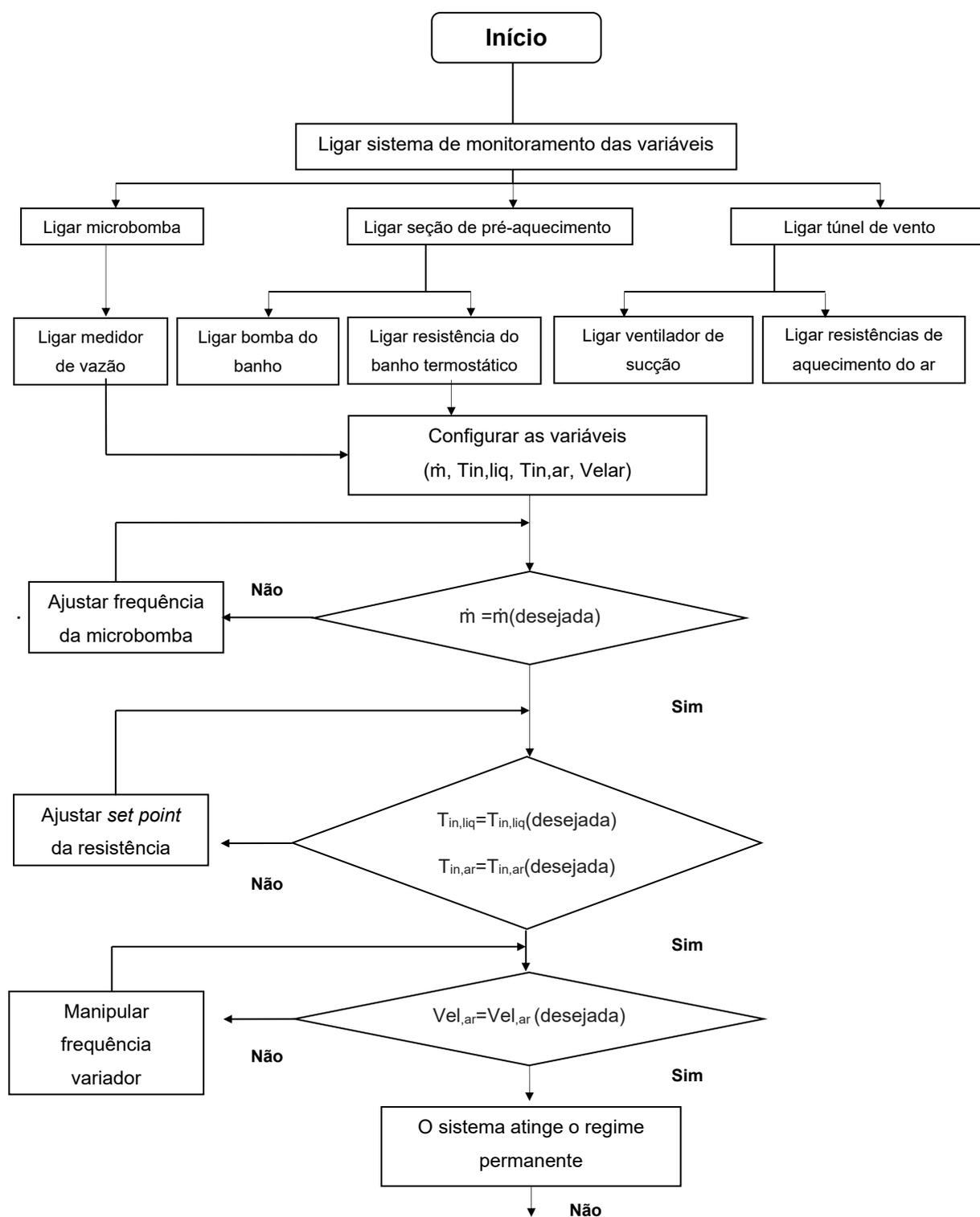
$$V_{agua_{fb}} = 0,5 * V_{final} - V_{agua_{sp}} \quad \text{"Volume de água no fluido base adicionado"}$$

$$V_{EG_{fb}} = 0,5 * V_{final} \quad \text{"Volume de etilenoglicol no fluido base adicionado"}$$

$$m_{agua_{fb}} = V_{agua_{fb}} * rho_{agua} \quad \text{"massa de água no fluido base adicionado"}$$

$$m_{EG_{fb}} = V_{EG_{fb}} * rho_{EG} \quad \text{"massa de etilenoglicol no fluido base adicionado"}$$

APÊNDICE II



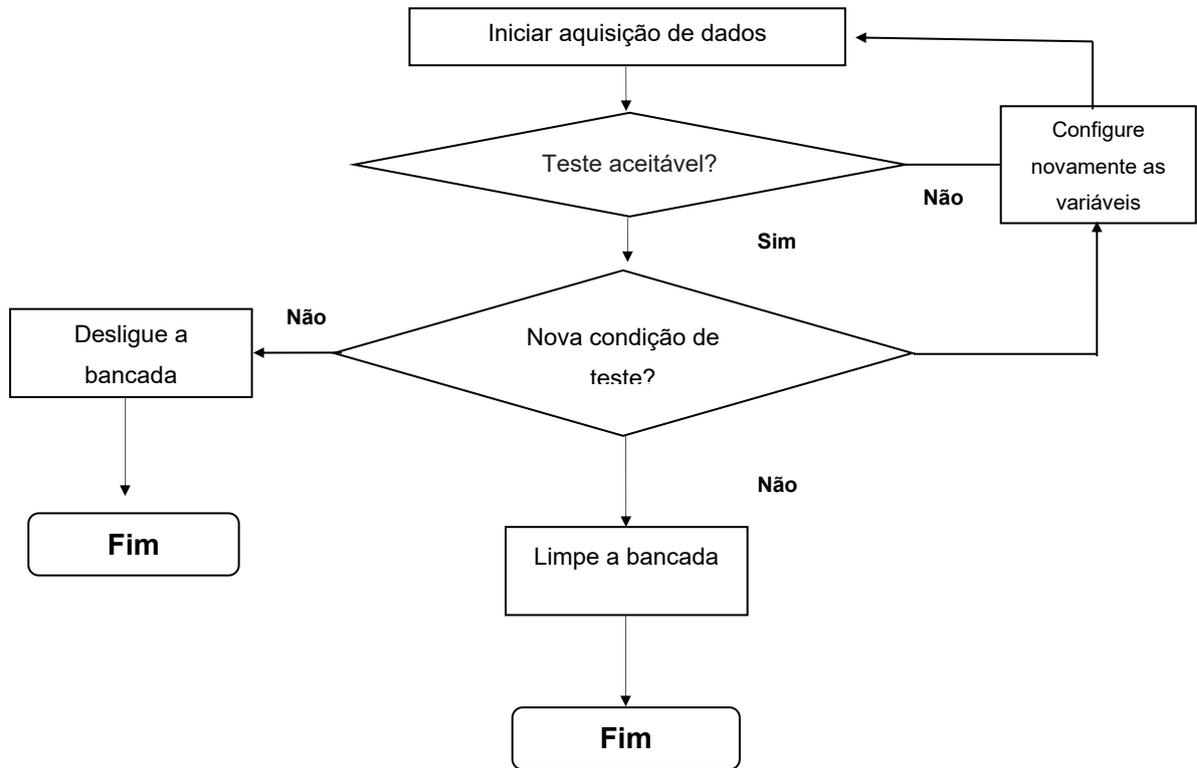


Figura A1. - Diagrama operação da bancada experimental.

APÊNDICE III

Incertezas dos coeficientes de transferência de calor

-Taxa de transferência de calor do ar

Como $\dot{Q}_{ar} = f(C_{ar}, T_{ar,e}, T_{ar,s})$ então;

$$u(\dot{Q}_{ar}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{Q}_{ar}}{\partial C_{ar}} \cdot u(C_{ar})\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{ar}}{\partial T_{ar,e}} \cdot u(T_{ar,e})\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{ar}}{\partial T_{ar,s}} \cdot u(T_{ar,s})\right)^2}$$

Onde $C_{ar} = f(Cp_{ar}, \dot{m}_{ar})$

-Taxa de transferência de calor do líquido de arrefecimento

Como $\dot{Q}_{liq} = f(C_{liq}, T_{liq,e}, T_{liq,s})$ então;

$$u(\dot{Q}_{liq}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{Q}_{liq}}{\partial C_{liq}} \cdot u(C_{liq})\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{liq}}{\partial T_{liq,e}} \cdot u(T_{liq,e})\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{liq}}{\partial T_{liq,s}} \cdot u(T_{liq,s})\right)^2}$$

Onde $C_{liq} = f(Cp_{liq}, \dot{m}_{liq})$

-Taxa de transferência de calor média

Como $\dot{Q}_m = f(\dot{Q}_{ar}, \dot{Q}_{liq})$ então:

$$u(\dot{Q}_m) = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{Q}_m}{\partial \dot{Q}_{ar}} \cdot u(\dot{Q}_{ar})\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_m}{\partial \dot{Q}_{liq}} \cdot u(\dot{Q}_{liq})\right)^2}$$

Vazão de ar

Como $\dot{m}_{ar} = f(\Delta P_{ar}, \rho_{ar}, T_{ar,s})$ então;

$$u(\dot{m}_{ar}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}_{ar}}{\partial \Delta P_{ar}} \cdot u(\Delta P_{ar})\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_{ar}}{\partial \rho_{ar}} \cdot u(\rho_{ar})\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_{ar}}{\partial T_{ar,s}} \cdot u(T_{ar,s})\right)^2}$$

Número de Reynolds do ar

Como $\dot{m}_{ar} = f(\dot{m}_{ar}, \mu_{ar}, Dh_{ar})$ então;

$$u(\text{Re}_{ar}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \text{Re}_{ar}}{\partial \dot{m}_{ar}} \cdot u(\dot{m}_{ar})\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_{ar}}{\partial \mu_{ar}} \cdot u(\mu_{ar})\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_{ar}}{\partial Dh_{ar}} \cdot u(Dh_{ar})\right)^2}$$

Número de Reynolds do líquido de arrefecimento

$$u(\text{Re}_{liq}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \text{Re}_{liq}}{\partial \dot{m}_{liq}} \cdot u(\dot{m}_{liq})\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_{liq}}{\partial \mu_{liq}} \cdot u(\mu_{liq})\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_{liq}}{\partial Dh_{liq}} \cdot u(Dh_{liq})\right)^2}$$

As incertezas dos parâmetros geométricos primários foram realizadas com um paquímetro, apresentando como incerteza de medida $\pm 0,05$ mm, com exceção da dimensão W (comprimento do tubo), que foi medida com uma fita métrica com incerteza $\pm 0,5$ mm.

APÊNDICE IV

Os termopares tipo T, foram construídos aplicando uma descarga de arco elétrico nos dois fios do termopar (Cobre / Constatam), fundindo os dois metais e criando a junção. O processo foi controlado pela carga-descarga de um banco de capacitores.

Os termopares foram calibrados utilizando como referência um conjunto de termômetros de precisão e um banho térmico. O processo de calibração consistiu na inserção dos termopares e do termômetro de precisão em um banho termostático como observado na Fig. A.2.



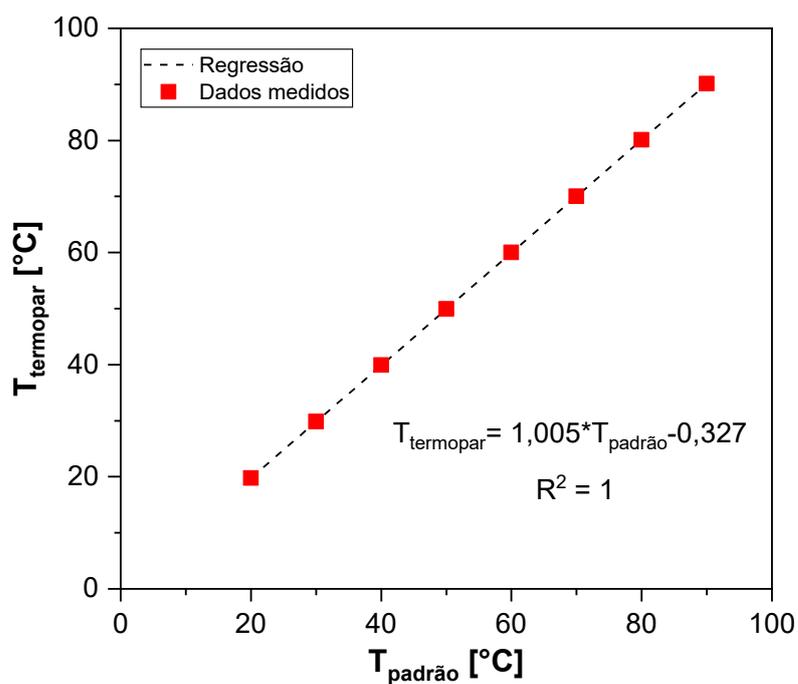
Figura A.2 - Processo de calibração dos termopares. Adaptada de (Cárdenas Gómez, 2019).

O sinal proveniente dos termopares foi registrado por um sistema de placas de aquisição de dados da National Instruments. Enquanto, ao valor de referência foi fornecido pelo termômetro de imersão de precisão, de bulbo de mercúrio, com resolução de 0,1 °C. Assim as curvas de calibração dos 32 termopares, foram realizadas em uma faixa de temperatura de 20 a 90 °C com incrementos de 10 °C. A temperatura fornecida pelo termômetro de precisão foi considerada $T_{\text{padrão}}$.

Adotou-se, para a incertezas associadas às medições, um valor baseado no desvio padrão apresentado pela regressão linear da relação de temperaturas. A regressão linear da curva apresentada na Fig. A14, proporcionou a seguinte relação:

$$T_{\text{termopar}} = 1,0051 * T_{\text{padrão}} - 0,327$$

Considerando uma distribuição normal para os desvios, as incertezas nas medidas de temperatura foram assumidas como $\pm 0,2$ °C ou duas vezes o desvio padrão, considerando um intervalo de confiança de 95%. Este valor é aceitável de acordo com o descrito pela norma ANSI MC96.1-1982 e ASTM E320 para termopares tipo T ($E_{\max} = \pm 1$ °C).



Curva calibração termopares

APÊNDICE V

Características geométricas do radiador testado

Parâmetro	Unidade	Valor
Material	-	Alumínio
Altura	mm	377
Largura	mm	480
Comprimento	mm	23
Diâmetro interno do tubo	mm	7
Espessura da parede do tubo	mm	0,35
Passo vertical do tubo	mm	18,5
Passo horizontal do tubo	mm	11,5
Passo da aleta	mm	1
Espessura da aleta	mm	0,08
Número de filas de tubos	-	2
Número de tubos por fila	-	20