

**ERICK OLIVEIRA DO NASCIMENTO**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE NANOFUIDOS  
ESCOANDO EM UM TROCADOR DE CALOR EM  
TÚNEL DE VENTO**



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

**2024**

**ERICK OLIVEIRA DO NASCIMENTO**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE NANOFUIDOS ESCOANDO EM UM  
TROCADOR DE CALOR EM  
TÚNEL DE VENTO**

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

Área de Concentração: Transferência de calor e Mecânica dos fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Enio P. Bandarra Filho

Coorientador: Prof. Dr. Luben Cabezas-Gómez

**UBERLÂNDIA - MG**

**2024**

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

N244 2024	<p>Nascimento, Erick Oliveira do, 1994- Análise numérica de nanofluidos escoando em um trocador de calor em túnel de vento [recurso eletrônico] / Erick Oliveira do Nascimento. - 2024.</p> <p>Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho. Coorientador: Luben Cabezas-Gómez. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.566">http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.566</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Bandarra Filho, Enio Pedone ,1970-, (Orient.). II. Cabezas-Gómez, Luben,1969-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621</p>
--------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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; nº 382; PPGEM				
Data:	19/07/2024	Hora de início:	8:30	Hora de encerramento:	11:20
Matrícula do Discente:	12023EMC003				
Nome do Discente:	Erick Oliveira do Nascimento				
Título do Trabalho:	Análise Numérica de Nanofluidos Escoando em um Trocador de Calor em Túnel de Vento				
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos				
Linha de pesquisa:	Dinâmica dos Fluidos e Transferência de Calor				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Prof. Dr. Luben Cabezas-Gómez - USP; Prof. Dr. Alexandre Kupka da Silva - UFSC; Profª Dra. Debora Cerneiro Moreira - USP; Prof. Dr. Francisco José de Souza - UFU; Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto - UFU e Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho - UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, 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 presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

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 **Aristeu da Silveira Neto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/08/2024, às 15:27, 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 **Debora Carneiro Moreira, Usuário Externo**, em 09/08/2024, às 17:30, 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 10/08/2024, às 22:54, 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 **Francisco José de Souza, Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/08/2024, às 18:02, 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 **Enio Pedone Bandarra Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 15/08/2024, às 02:12, 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 **Alexandre Kupka da Silva, Usuário Externo**, em 02/09/2024, às 15:04, 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](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5598436** e o código CRC **B3E18B05**.

## **DEDICATÓRIA**

À minha família, que lutou ao meu lado para que esse sonho fosse realizado.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me proporcionado chegar até esta etapa da minha vida. Agradeço à minha família por todo o apoio, por me amar incondicionalmente, por me inspirar a sempre sonhar grande e por me mostrar que sempre posso mais. Vocês supõem o céu.

Agradeço a Ana Paula Araújo Carvalho e Thaís Rocha dos Santos Oliveira pelo apoio constante nesta etapa da minha vida. As palavras de encorajamento e apoio foram fundamentais. Vocês não apenas reconheceram meu potencial, mas também me lembraram dele quando eu duvidava.

Agradeço à Elcilane Araújo de Freitas por todo o apoio na graduação e no mestrado, e por me inspirar a ser um pesquisador melhor. Tu és uma parte essencial do que me tornei, e serei eternamente grato.

Agradeço a Edwin Martin Cárdenas Contreras por todo o apoio e compartilhamento de conhecimento durante o doutorado.

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho e Prof. Dr. Luben Cabezas-Gómez, por transmitirem seus conhecimentos e por sua atenção para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, ao Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e à FCA Fiat Chrysler Automóveis Brasil LTDA pelo apoio financeiro, estrutural e pelos equipamentos necessários para a realização desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), bolsa processo nº 140349/2022-7.

NASCIMENTO, E. O. **Análise numérica de nanofluidos escoando em um trocador de calor em túnel de vento**. 2024. 156 f. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

Na última década houve a intensificação de estudos sobre o desempenho térmico de trocadores de calor, devido às técnicas passivas, como o uso de aletas e de microcanais terem atingido um limite técnico, além da baixa condutividade térmica dos fluidos refrigerantes convencionais, como a água, o etilenoglicol (EG) e a mistura EG-água. Em automóveis, a baixa troca de calor desencadeia o aumento do peso dos radiadores e do arrasto, gerado pelo aumento da área superficial. Diversos pesquisadores têm dispersado partículas sólidas de tamanho nanométrico em fluidos base, com o intuito de aumentar a condutividade térmica destes fluidos e por consequência incrementar a transferência de calor em radiadores automotivos. Contudo, os testes experimentais de radiadores automotivos apresentam elevado custo na compra de materiais e equipamentos, se comparadas com as simulações computacional. Esta abordagem apresenta vantagens ainda maiores quando se utiliza nanofluidos como fluido de trabalho, devido à dificuldade de estabilização e o custo com a compra de nanopartículas, os quais são as principais barreiras do estudo experimental de nanofluidos. Desta forma, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho termohidráulico de nanofluidos de grafeno/EG-água (50:50) em um radiador automotivo em um túnel de vento através do método de volumes finitos que está implementado no software Ansys Fluent. Diferentemente de outras simulações computacional de radiadores automotivos, neste trabalho são considerados os efeitos da condução de calor nas paredes do tubo e das aletas, a variação das propriedades do líquido de arrefecimento em função da temperatura local e a condição de contorno térmica não é constante ao longo do trocador de calor. Os resultados obtidos computacionalmente apresentam concordância satisfatória com os resultados experimentais para o fluido base. Numericamente, observou-se ganhos de até 12,13% na taxa de transferência de calor para o nanofluido com concentração de 0,10 vol.%, enquanto experimentalmente o ganho é de apenas 3,3% em relação



ao fluido base. Para concentração de 0,5 vol.% foi identificado o aumento da transferência de calor em até 47,3%. Também foi avaliado o coeficiente de desempenho termohidráulico dos nanofluidos, em que se observou que todas as amostras analisadas foram superiores ao fluido base, indicando resultados promissores para aplicações em radiadores automotivos. Além disso, foi proposta uma nova correlação para o processo de transferência de calor convectiva para o nanofluido de grafeno.

---

*Palavras-chave: Radiador automotivo. Nanofluidos. Transferência de calor. Dinâmica dos fluidos computacional.*

NASCIMENTO, E. O. **Numerical analysis of nanofluids flowing in a heat exchanger in a wind tunnel**. 2024. 156 p. PhD Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

### **Abstract**

In the last decade there has been an intensification of studies on the thermal performance of heat exchangers, due to passive techniques, such as the use of fins and microchannels, having reached a technical limit, in addition to the low thermal conductivity of conventional refrigerant fluids, such as water, ethylene glycol (EG) and the EG-water mixture. In automobiles, low heat exchange triggers an increase in the weight of the radiators and drag, generated by the increase in surface area. Several researchers have dispersed nanometric-sized solid particles in base fluids, with the aim of increasing the thermal conductivity of these fluids and consequently increasing heat transfer in automotive radiators. However, experimental tests of automotive radiators present a high cost in purchasing materials and equipment, compared to computer simulations. This approach presents even greater advantages when using nanofluids as a working fluid, due to the difficulty of stabilization and the cost of purchasing nanoparticles, which are the main barriers to the experimental study of nanofluids. Therefore, this work aims to evaluate the thermohydraulic performance of graphene/EG-water nanofluids (50:50) in an automotive radiator in a wind tunnel using the finite volume method that is implemented in the Ansys Fluent software. Unlike other computer simulations of automotive radiators, this work considers the effects of heat conduction on the walls of the tube and fins, the variation in the properties of the coolant as a function of local temperature and the thermal boundary condition is not constant throughout along the heat exchanger. The results obtained computationally show satisfactory agreement with the experimental results for the base fluid. Numerically, gains of up to 12.13% in the heat transfer rate were observed for the nanofluid with a concentration of 0.10 vol.%, while experimentally the gain is only 3.3% in relation to the base fluid. For a concentration of 0.5 vol.%, an increase in heat transfer of up to 47.3% was identified. The thermohydraulic performance coefficient of the nanofluids was also evaluated, in which it was observed that all analyzed samples were superior to the base fluid, indicating promising results

for applications in automotive radiators. Furthermore, a new correlation for the convective heat transfer process for graphene nanofluid was proposed.

---

*Keywords: Automotive radiator. Nanofluids. Heat transfer. Computational fluid dynamics.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Número de publicações na plataforma ScienceDirect na busca com os termos “nanofluid radiator” até maio de 2024 .....	21
Figura 2.1- Sistema de arrefecimento automotivo. Fonte: Adaptado de Xian <i>et al.</i> (2018).....	38
Figura 2.2- Temperatura de congelamento e de ebulição da mistura de EG-água. Fonte: Elaborado a partir dos dados de Xian <i>et al.</i> (2018) .....	38
Figura 2.3 - Diagrama esquemático da bancada de ensaio experimental para trocadores de calor com fluxo de ar cruzado. Fonte: Adaptado de Contreras <i>et al.</i> (2019).....	45
Figura 2.4 - Resultados experimentais da taxa de transferência de calor para amostras de grafeno em função da vazão mássica. Fonte: Adaptado de Contreras <i>et al.</i> (2019).....	46
Figura 2.5 - Resultados experimentais de potência de bombeamento para amostras de grafeno em função da vazão mássica. Fonte: Adaptado de Contreras <i>et al.</i> (2019).....	47
Figura 2.6 - Desempenho termohidráulico dos nanofluidos analisados. Fonte: Adaptado de Contreras <i>et al.</i> (2019).....	48
Figura 3.1 – Configuração do radiador automotivo simulado.....	68
Figura 3.2 - Configuração do domínio computacional empregado nas simulações.....	69
Figura 3.3 - Influência do movimento browniano, termoforese e difusioforese .....	76
Figura 3.4 – Comparação da condutividade térmica obtida experimentalmente com a correlação de Nan <i>et al.</i> (2003). Fonte: Adaptado de Contreras <i>et al.</i> (2019) .....	79
Figura 4.1 - Comparação da taxa de transferência de calor para diferentes malhas.....	88
Figura 4.2 - Taxa de transferência de calor em função vazão mássica .....	92
Figura 4.3 - Taxa de transferência de calor em função vazão mássica maiores concentrações	96
Figura 4.4 - Taxa de transferência de calor em função da concentração de nanopartículas ....	98
Figura 4.5 - Coeficiente convectivo de transferência de calor em função da vazão mássica.	100
Figura 4.6 - Coeficiente convectivo de transferência de calor para maiores concentrações em função da vazão mássica.....	105
Figura 4.7 – Comparação de resultados experimentais com a correlação.....	109
Figura 4.8 - Potência de bombeamento em função da vazão mássica.....	112
Figura 4.9 - Potência de bombeamento para maiores concentrações em função da vazão mássica .....	117
Figura 4.10 - Coeficiente de desempenho termohidráulico em função da vazão mássica .....	122

Figura 4.11 - Coeficiente de desempenho termohidráulico maiores concentrações em função da vazão mássica .....	127
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Condutividade térmica de materiais sólidos e fluidos refrigerantes à 300 K.....	26
Tabela 2.2 - Propriedades físico-químicas do grafeno .....	28
Tabela 2.3 - Influência da adição de nanopartículas de grafeno e seus derivados nas propriedades termofísicas dos fluidos base .....	36
Tabela 2.4 - Trabalhos numéricos utilizando nanopartículas em radiadores .....	64
Tabela 3.1 - Parâmetros do radiador.....	67
Tabela 3.2 - Constantes do modelo $\kappa$ - $\omega$ SST.....	74
Tabela 3.3 - Influência do movimento browniano, termoforese e difusioforese.....	76
Tabela 3.4 - Trabalhos sobre a utilização do algoritmo SIMPLE .....	83
Tabela 4.1 – Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais.....	93
Tabela 4.2 - Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais para maiores concentrações.....	97
Tabela 4.3- Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais.....	102
Tabela 4.4 - Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais para maiores concentrações.....	107
Tabela 4.5 - Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais.....	114
Tabela 4.6- Comparação dos ganhos obtidos para maiores concentrações com resultados experimentais.....	119
Tabela 4.7 - Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais.....	124

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

Símbolo	Unidade	Nome
A	m <sup>2</sup>	Área
C <sub>p</sub>	J/kg·K	Calor específico
D <sub>h</sub>	m	Diâmetro hidráulico
h	W/m <sup>2</sup> ·K	Coefficiente convectivo de transferência de calor
k	W/m·K	Condutividade térmica
L	m	Comprimento
ṁ	kg/s	Vazão mássica
p	Pa	Pressão
Q̇	W	Taxa de transferência de calor
T	K	Temperatura
V	m <sup>3</sup>	Volume
vol.	%	Concentração em volume
wt.	%	Concentração em massa
u	m/s	Velocidade
x	m	Vetor de coordenadas cartesianas
E	J	Energia total
$\tilde{G}_\kappa$	-	Produção da energia cinética turbulenta
$\tilde{G}_\omega$	-	Geração da dissipação específica
Y <sub>κ</sub>	-	Dissipação de κ
Y <sub>ω</sub>	-	Dissipação de ω
D <sub>ω</sub>	-	Difusão cruzada
S <sub>κ</sub>	-	Termo fonte
S <sub>ω</sub>	-	Termo fonte
h	W/m <sup>2</sup> ·K	Coefficiente convectivo de transferência de calor
GCI	-	<i>Grid Convergence Index</i>

$h_{GCI}$	-	Tamanho representativo
$q''$	W/m <sup>2</sup>	Fluxo de calor

### Letras gregas

Símbolo	Unidade	Nome
$\phi$	%	Concentração
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Massa específica
$\mu$	kg/m·s	Viscosidade dinâmica
$\eta$	-	Coefficiente de desempenho termohidráulico
$\partial$	-	Operador diferencial
$\delta$	-	Delta de Kronecker
$\tau_{ij}$	-	Tensor de tensões viscosas
$\kappa$	-	Energia cinética turbulenta
$\omega$	-	Taxa de dissipação específica
$\Gamma_{\kappa}$	-	Difusividade efetiva de $\kappa$
$\Gamma_{\omega}$	-	Difusividade efetiva de $\omega$
$\nu_t$	-	Viscosidade cinemática turbulenta
$\sigma_{\kappa}$	-	Número de Prandtl de $\kappa$
$\sigma_{\omega}$	-	Número de Prandtl de $\omega$
$\mu_t$	-	Viscosidade cinemática turbulenta
$\Delta$	-	Variação

### Número adimensionais

Símbolo	Nome
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl



Re Número de Reynolds

### Subscritos

<b>Nome</b>	<b>Símbolo</b>
bf	Fluido base
eff	Efetivo
h	Hidráulico
in	Entrada
out	Saída
nf	Nanofluido
np	Nanopartícula
w	Parede
f	Fluido
z	Componente do vetor posição
avg	Médio

### Abreviações

<b>Nome</b>	<b>Símbolo</b>
MWCNT	Nanotubo de carbono de paredes múltiplas
f-MWCNT/	Nanotubo de carbono de paredes múltiplas funcionalizado
EG	Etilenoglicol
CNT	Nanotubo de carbono
DW	Água destilada
DI	Água deionizada
GNP	Nanoplaquetas de grafeno
GO	Óxido de grafeno

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	20
1.1	<b>Motivação</b> .....	20
1.2	<b>Objetivos</b> .....	23
1.3	<b>Organização do texto</b> .....	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	25
2.1	<b>Nanofluidos</b> .....	25
2.2	<b>Nanofluidos de grafeno e seus derivados</b> .....	27
2.3	<b>Aplicação de nanofluidos em radiadores automotivos</b> .....	37
<b>3</b>	<b>ABORDAGEM NUMÉRICA</b> .....	67
3.1	<b>Formulação do problema</b> .....	67
3.2	<b>Equações de balanço</b> .....	70
3.3	<b>Cálculo de propriedades dos nanofluidos</b> .....	74
3.4	<b>Parâmetros termohidráulicos</b> .....	79
3.5	<b>Condições de contorno e simulação CFD</b> .....	80
3.6	<b>Índice de convergência de malha</b> .....	84
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	87
4.1	<b>Estudo de independência de malha</b> .....	87
4.2	<b>Taxa de transferência de calor</b> .....	89
4.2.1	<i>Taxa de transferência de calor para maiores concentrações de nanopartículas</i> 94	
4.3	<b>Coefficiente convectivo de transferência de calor médio</b> .....	98
4.3.1	<i>Coefficiente convectivo de transferência de calor para maiores concentrações de nanopartículas</i> .....	103
4.3.2	<i>Nova correlação para o coeficiente convectivo de transferência de calor para trocadores de calor</i> .....	108
4.4	<b>Potência de bombeamento</b> .....	109
4.4.1	<i>Potência de bombeamento para maiores concentrações</i> .....	115

4.5	<b>Coefficiente de desempenho termohidráulico</b> .....	120
4.5.1	<i>Coefficiente de desempenho termohidráulico para maiores concentrações</i> .....	125
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	128
5.1	<b>Recomendações para trabalhos futuros</b> .....	129
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	130

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação

Nas últimas décadas, houve uma intensificação nas pesquisas voltadas ao uso eficaz de energia. Além disso, a transferência de calor em alto desempenho é uma das necessidades mais importantes da indústria e está intimamente ligada à eficiência energética dos sistemas de resfriamento. Na indústria automotiva, os motores precisam de radiadores com sistemas de arrefecimento altamente eficientes, além de menor consumo de combustível e emissão de gases nocivos ao meio ambiente.

Os radiadores automotivos são trocadores de calor do tipo compacto, cujas abordagens convencionais para aumentar a taxa de resfriamento do sistema, como o uso de aletas e de microcanais atingiram um limite técnico. Aliada a esta situação, a baixa condutividade térmica dos fluidos refrigerantes convencionais, fez com que diversos pesquisadores começassem a dispersar partículas sólidas de tamanho nanométrico em fluidos base que são usualmente utilizados nos sistemas de arrefecimento automotivo, como, água, etilenoglicol (EG) e a mistura de H<sub>2</sub>O/EG, para aumentar suas respectivas condutividades térmicas. Os fluidos convencionais apresentam menor troca de calor, acarretando uma maior área superficial do radiador automotivo, aumentando o peso e o arrasto do automóvel (ABBAS *et al.*, 2020).

As suspensões coloidais de partículas sólidas com pelo menos uma das dimensões de tamanho nanométrico (tamanho entre 1 e 100 nm) em fluidos foram denominadas de “nanofluidos” por Choi e Eastman (1995) em seu trabalho sobre a demonstração teórica da

viabilidade, a medida da condutividade térmica e a taxa de transferência de calor da suspensão coloidal de cobre (MCCORMICK *et al.*, 2021). Diversos pesquisadores têm buscado realizar a aplicação de nanofluidos em trocadores de calor como em radiadores automotivos para aumentar a transferência de calor, devido à constante busca da indústria automobilística por sistemas como a mais elevada eficiência, pois quanto mais eficiente for o motor, menor será o consumo de combustível e, por consequência, menor emissão de gases tóxicos ao meio ambiente. Além disso, o aumento da transferência de calor pode propiciar a redução do tamanho dos trocadores de calor (SAID *et al.*, 2021, LI *et al.*, 2021, OYEDEPO *et al.*, 2022, SIVALINGAM *et al.*, 2022 e KUMAR; HASSAN, 2024).

Conforme pode ser observado na Fig. 1.1, existe um crescimento exponencial do número de publicações sobre o uso de nanofluidos em radiadores ao longo dos anos. Este comportamento pode ser explicado pelos resultados promissores no uso de nanofluidos em radiadores (HAJIAKBARI *et al.*, 2024, WANG *et al.*, 2024 e KUMAR; HASSAN, 2024). Os dados foram obtidos na plataforma Science Direct com as palavras-chave “nanofluid radiator” para os anos de 2010 e maio de 2024.

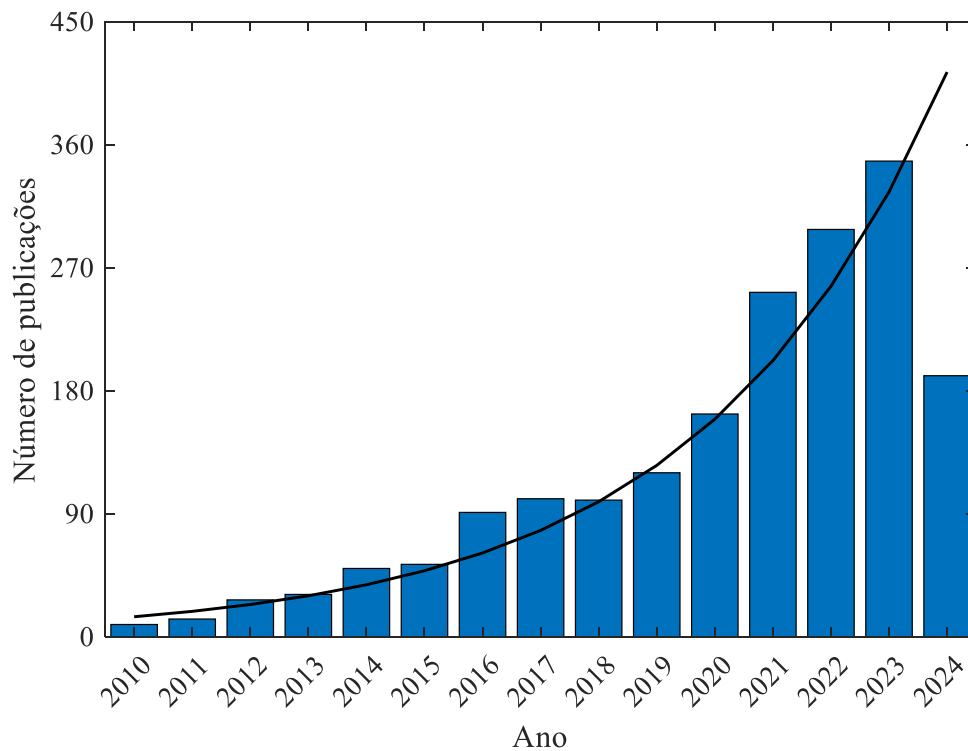


Figura 1.1 - Número de publicações na plataforma ScienceDirect na busca com os termos “nanofluid radiator” até maio de 2024

A avaliação do desempenho termohidráulico de um sistema de arrefecimento automotivo de forma experimental apresenta elevado custo financeiro com a compra de equipamentos (medidores de vazão, de pressão e de temperatura, sensores, inversor etc.) e de materiais (nanopartículas, fluido base, surfactantes etc.) se comparada com simulações numéricas (KAOOD; HASSAN, 2020, GUO, 2020, PORDANJANI *et al.*, 2021, HUQ *et al.*, 2022, CIEŚLIŃSKI; KOZAK, 2023, MUKHERJEE *et al.*, 2024). Ao se ter nanofluidos como fluido de trabalho, a modelagem computacional apresenta maiores vantagens devido aos custos e à dificuldade de preparação de nanofluidos estáveis, os quais são as principais barreiras para a realização de experimentos (SAFAEI *et al.*, 2016).

Huq *et al.* (2022) indicaram em seu trabalho de revisão sobre a aplicação de nanofluidos de grafeno em trocadores de calor que são necessários mais trabalhos sobre a aplicação deste tipo de nanofluido para concentrações superiores a 0,1%, a fim de determinar o desempenho máximo e definir a concentração ideal de nanopartículas. Além disso, recomendaram que novos estudos sobre a utilização de nanofluidos sejam realizados na mesma vazão do fluido base, em vez do número de Reynolds, devido ao aumento da velocidade do fluido de arrefecimento necessário para ajustar o número de Reynolds, que tem seu valor reduzido com o aumento da viscosidade dinâmica pela inserção das nanopartículas. Esse aumento na velocidade pode provocar o aumento da transferência de calor, afetando a análise da real influência da adição de nanopartículas, assim como foi identificado no trabalho de revisão de Wang *et al.* (2024) sobre os métodos de avaliação do desempenho termohidráulico de nanofluidos em aplicações de transferência de calor por convecção forçada monofásica.

Do ponto de vista numérico, a avaliação de radiadores automotivos começa com o estudo das correlações das propriedades termofísicas (densidade, viscosidade dinâmica, condutividade térmica e calor específico) para cada tipo de nanofluido. A partir dessas variáveis, é possível aplicar as equações de balanço da quantidade de movimento linear, da massa e da energia para obter a taxa os campos de pressão, velocidade, temperatura etc., e assim, os valores da transferência de calor, o coeficiente convectivo de transferência de calor, o número de Nusselt, a queda de pressão e entre variáveis inerentes ao desempenho termohidráulico dos nanofluidos em radiadores automotivos.

Na maioria dos trabalhos disponíveis na literatura sobre a análise de nanofluidos em radiadores automotivos, as propriedades termofísicas do líquido de arrefecimento são consideradas constantes ao longo de todo o escoamento apesar da notória variação de

temperatura do líquido de arrefecimento no trocador de calor. Além disso, existem poucos trabalhos numéricos sobre a aplicação de nanofluidos em radiadores automotivos que apresentam comparação com resultados experimentais medidos em túnel de vento bem instrumentado, o que garante uma validação mais confiável (NASCIMENTO *et al.*, 2024, AJEEB; MURSHED, 2022).

Desta forma, com base nos argumentos mencionados, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho termohidráulico dos nanofluidos de grafeno em um radiador automotivo em túnel de vento por meio da dinâmica dos fluidos computacional. É importante destacar que neste trabalho considera-se a influência do ar que escoar sobre a parede e as aletas do tubo, bem como a variação das propriedades termofísicas do líquido de arrefecimento em função da temperatura local do escoamento. Ao contrário dos outros trabalhos numéricos sobre nanofluidos em radiadores automotivos disponíveis na literatura, neste trabalho não se considera uma condição de contorno térmica constante na parede, e nos cálculos são considerados os efeitos da condução na região sólida. Além disso, será apresentada uma revisão sobre a aplicação de nanofluidos em trocadores de calor. Os resultados obtidos são comparados com os resultados experimentais de Mehrli *et al.* (2015), Akhavan-Zanjani *et al.* (2016), Selvam *et al.* (2017a), Ranjbarzadeh *et al.* (2017), Contreras *et al.* (2019), Sarafraz *et al.* (2019) e Naveen e Kishore (2020).

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o comportamento termohidráulico de nanofluidos de grafeno/EG-água (50:50 vol.%) em um trocador de calor por meio da dinâmica dos fluidos computacional. Além disso, realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de nanofluidos em trocadores de calor. Os objetivos específicos definidos são:

- a) Avaliar numericamente o comportamento térmico e hidráulico do escoamento de nanofluidos de grafeno em radiadores automotivos;
- b) comparar os dados obtidos numericamente com os dados experimentais de Contreras *et al.* (2019);
- c) obter o desempenho dos nanofluidos em concentrações volumétricas de até 0,50%;

d) Propor uma correlação para o processo de transferência de calor convectiva para o nanofluido de grafeno.

### **1.3 Organização do texto**

No capítulo 1 foi realizada uma introdução sobre a importância do estudo de nanofluidos em trocadores de calor e da aplicação da dinâmica dos fluidos computacional neste tipo de problema e a necessidade da comparação com dados experimentais em bancadas bem instrumentadas. Além disso, foram apresentados os objetivos deste trabalho.

No capítulo 2, estão apresentados uma revisão bibliográfica e o estado da arte da aplicação de nanofluidos, as particularidades dos nanofluidos de grafeno e o uso de nanofluidos em radiadores automotivos.

O capítulo 3 foi destinado à explanação da metodologia numérica utilizada, abordando as equações de balanço para o líquido de arrefecimento e do ar (laminar e turbulento, respectivamente) e a equação da condução de calor. Neste capítulo, são descritos os modelos empregados para o cálculo das propriedades termofísicas dos nanofluidos de grafeno, o cálculo dos parâmetros termohidráulicos, as condições de contorno e a metodologia de convergência de malha.

No capítulo 4 são ilustrados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho. Neste capítulo, são analisados o estudo de independência de malha, a comparação da taxa de transferência de calor com os dados experimentais, o coeficiente convectivo de transferência de calor, a potência de bombeamento e o coeficiente de desempenho termohidráulico. Além disso, foram utilizados dados de outros trocadores de calor para comparar os ganhos obtidos com os nanofluidos. Adicionalmente, foi apresentada uma nova correlação para o processo convectivo de transferência de calor.

Posteriormente, no capítulo 5, destacam-se as conclusões que puderam ser tomadas com os resultados alcançados e as recomendações para trabalhos futuros.



## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Nanofluidos

As nanopartículas utilizadas na preparação dos nanofluidos podem ser compostas de metais com estabilidade química (como cobre, ouro, entre outros), óxidos (como óxido de titânio, óxido de cobre etc.), não-metais (como grafeno, nanotubos de carbono de parede simples e múltipla, entre outros), nitretos de metais (Nitreto de alumínio e nitreto de silício), carbonetos de metais (como carbeto de silício), entre outros. Este tipo de fluido apresenta características com potencial para aplicações em áreas como na terapia do câncer, trocadores de calor, reatores nucleares, aquecimento de casas e redução de poluição etc. (MEKHEIMER *et al.*, 2018; CONTRERAS *et al.*, 2019; UZUN *et al.*, 2022; ŞIRIN *et al.*, 2023).

Cada tipo de nanopartícula apresenta vantagens e desvantagens para aplicações em trocadores de calor. Usualmente, as nanopartículas são dispersas em um fluido base pelo método de duas etapas, e apresentam estabilidade satisfatória quando se utiliza água como fluido base por apresentar natureza polar (CHAKRABORTY; PANIGRAHI, 2020). As nanopartículas de óxido possuem baixa condutividade térmica quando comparadas às nanopartículas de metais e de carbono (conforme pode ser observado na Tab. 2.1), resultando em um menor incremento da condutividade térmica do nanofluido, em que são necessárias concentrações volumétricas de 1 a 5% para começar a observar aumentos significativos na condutividade térmica (HUQ *et al.*, 2022).

As nanopartículas de metais apresentam condutividade térmica superior aos nanomateriais de óxido e incrementos significativos no desempenho térmico, mesmo em concentrações relativamente pequenas. No entanto, segundo Das *et al.* (2007), a produção de nanofluidos com a maioria desse tipo de nanopartículas (como as de cobre) deve ser feita pelo método de um passo, que apresenta custo de produção elevado em relação ao método de duas etapas. Além disso, as nanopartículas de metais, como ouro e prata, possuem custo superior aos óxidos, além de serem abrasivas. As nanopartículas de materiais baseados em carbono apresentam diversas vantagens em relação aos outros tipos de nanopartículas, como, a alta condutividade térmica, a baixa densidade e a grande razão de aspecto (HUQ *et al.*, 2022).

Tabela 2.1 - Condutividade térmica de materiais sólidos e fluidos refrigerantes à 300 K

	Material	Condutividade térmica (W/m · K)
Líquidos	Água	0,609
	Etilenoglicol	0,258
	EG-água (50:50 vol.%)	0,385
Nanopartícula baseada em Carbono	Diamante	900 - 2300
	Nanotubo	1800 - 4000
	Grafite	110 - 190
	Grafeno	5000
Nanopartícula Metálica	Prata	429
	Cobre	401
	Alumínio	237

Fonte: Elaborado a partir dos dados de Contreras *et al.* (2019) e Ukuje *et al.* (2022)

O método de dois passos é amplamente utilizado para a síntese de nanofluidos, em que as nanopartículas são posteriormente misturadas com o fluido base. Essas nanopartículas estão disponíveis comercialmente, sendo fabricadas por diversos processos químicos, mecânicos e físicos. Para obter nanofluidos estáveis, geralmente adicionam-se surfactantes, como o dodecil benzeno sulfonato de sódio e o brometo de cetiltrimetilamônio que ajudam a melhorar a dispersão do material no fluido, além de promover a distribuição uniforme das nanopartículas suspensas e evitar a sedimentação precoce. Devido à importância de garantir a estabilidade dos

nanofluidos, diversos pesquisadores propuseram métodos para melhorar a dispersão dessas substâncias, como o disruptor ultrassônico, banho ultrassônico, agitador e homogeneizador de alta pressão (GUPTA *et al.*, 2018).

Para avaliar o desempenho termohidráulico dos nanofluidos em trocadores de calor, é necessário avaliar cuidadosamente as propriedades termofísicas dos nanofluidos que dependem diretamente de outras variáveis, como a forma, o tamanho e a concentração das nanopartículas, a presença de surfactantes, a temperatura, o fluido base, entre outras, pois essas propriedades influenciam diretamente no cálculo de parâmetros, como, o coeficiente convectivo, o número de Nusselt, a queda de pressão etc. (GUPTA *et al.*, 2018).

A condutividade térmica dos nanofluidos pode ser afetada pela forma, tamanho e tipo de partículas empregadas. Em geral, nanobastões apresentam maior condutividade térmica em relação às nanopartículas com formato esférico e quanto menor o tamanho das nanopartículas, maior será a condutividade térmica dos nanofluidos produzidos (RAMALINGAM *et al.*, 2020b). Trabalhos como o de Gupta *et al.* (2017) ilustram que geralmente o aumento da temperatura tem efeito positivo na condutividade térmica, e faz-se necessário uma avaliação cuidadosa da quantidade de aditivos e surfactantes, pois estes apresentam menor condutividade térmica que o fluido base. A seguir, são apresentados alguns trabalhos experimentais e numéricos para exemplificar as potenciais áreas de aplicação de nanofluidos.

## 2.2 Nanofluidos de grafeno e seus derivados

O grafeno pode ser definido como uma folha de carbono com a espessura de um átomo, altamente densa em ligações  $sp^2$  em forma hexagonal (SADEGHINEZHAD *et al.*, 2016). Novoselov *et al.* (2004) sugeriram que o grafeno é um material com aplicações promissoras devido às suas características únicas, tais como propriedades eletrônicas, térmicas, ópticas e mecânicas, conforme pode ser observado na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedades físico-químicas do grafeno

Propriedade	Valor
Resistência à fratura	~125 [GPa]
Módulo de Young	~1 [TPa]
Módulo de elasticidade	~2 [GPa]
Tenacidade à fratura	~4 – 5 [MPa·m <sup>1/2</sup> ]
Transmissão de luz	~97,4%
Mobilidade eletrônica	~2·10 <sup>5</sup> [cm <sup>2</sup> ·V <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
Ampacidade	~10 <sup>12</sup> - 10 <sup>13</sup> [A·m <sup>-2</sup> ]
Concentração de portadores de carga	~1,4·10 <sup>13</sup> [cm <sup>-2</sup> ]
Condutividade térmica	~5000 [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
Gap de energia	~0,26 [Ev]
Condutividade elétrica	~10 <sup>4</sup> [S·m <sup>-1</sup> ]

Fonte: Elaborado a partir dos dados de Reddy *et al.* (2006), Bolotin *et al.* (2008), Lee *et al.* (2008), Lee *et al.* (2009); Bae *et al.* (2010), Medina *et al.* (2011), Goenka *et al.* (2014), Contreras *et al.* (2019), Yang *et al.* (2020)

As nanopartículas de grafeno apresentam vantagens em relação a outras nanopartículas, dentre elas destacam-se: a alta condutividade térmica, a facilidade de síntese, a maior estabilidade, a menor potência de bombeamento, a redução da corrosão e do entupimento, e a maior relação entre área de superfície e volume (AGROMAYOR *et al.*, 2016; PAPAGEORGIOU *et al.*, 2017). Alguns trabalhos sobre a utilização de nanofluidos de grafeno e seus derivados para aplicações térmicas são apresentados a seguir para exemplificar a potencial aplicação deste tipo de nanofluido.

Segundo Bubbico *et al.* (2015) os nanofluidos podem causar corrosão e erosão do trocador de calor. Os efeitos químicos (corrosão) têm efeitos maiores do que o efeito mecânico (erosão). Com base na revisão realizada e Borode *et al.* (2019), não existem trabalhos que avaliem os efeitos da corrosão dos nanofluidos de grafeno em trocadores de calor. Contudo, existem trabalhos como o de Rashidi *et al.* (2013) que avaliaram a corrosão do aço carbono por um nanofluido baseado em carbono (MWCNT) através da medição de polarização potenciodinâmica. Os autores concluíram que as nanopartículas funcionalizadas previnem a corrosão do material, contudo, a adição de surfactantes como dodecil sulfato de sódio e dodecil benzeno sulfonato de sódio aumentou a corrente de corrosão.

Akhavan-Zanjani *et al.* (2016) realizaram um experimento para avaliar o Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor (CCTC) de nanofluidos de grafeno em um tubo circular com fluxo de calor constante. Eles observaram um aumento de 14,2% do CCTC para um número de Reynolds de 1850 e concentração de 0,02 vol.% em relação ao fluido base. Além disso, foi observado o aumento de até 10,3% na condutividade térmica do nanofluido. As imagens de microscopia de força atômica não mostraram aglomeração de nanopartículas.

Sajjad *et al.* (2018) conduziram um estudo numérico sobre a transferência de calor de nanofluidos de nanofolhas de óxido de grafeno (GO)/água-EG em um tubo horizontal com fluxo de calor constante na parede. Eles observaram que o aumento do coeficiente de transferência de calor foi menor em comparação ao aumento da queda de pressão para todas as concentrações analisadas (0,01 - 0,1 wt.%), indicando condições desfavoráveis para a aplicação de nanofluidos. Por outro lado, Sadri *et al.* (2018a) avaliaram numericamente o desempenho termohidráulico de nanofluidos de nanoplaquetas de grafeno (GNP) em um tubo horizontal de aço inoxidável para concentrações de 0,025 wt.% a 0,1 wt.%. Eles usaram as propriedades termofísicas obtidas do trabalho de Sadri *et al.* (2018b) e verificaram que os resultados obtidos numericamente estavam em concordância com os resultados experimentais, com um desvio relativo médio de  $\pm 10\%$ . Portanto, a metodologia numérica mostrou-se confiável na predição do desempenho de nanofluidos em tubos retos. Dentre os casos analisados, o nanofluido com concentração de 0,1 wt.% apresentou maior incremento no coeficiente convectivo de transferência de calor tanto experimentalmente quanto numericamente.

Selvam *et al.* (2017a) avaliaram a transferência de calor e a queda de pressão de nanofluidos de nanoplaquetas de grafeno/água-EG em regime laminar, transição e turbulento em um trocador de calor de contracorrente. No preparo dos nanofluidos foi utilizado desoxicolato de sódio como surfactante. Foi observado que o coeficiente convectivo aumentou com o número de Reynolds, a concentração de nanopartículas e a temperatura de entrada, cujo aumento máximo foi de 170% para a concentração volumétrica de 0,5% no regime turbulento. Além disso, foi identificado que o aumento da queda de pressão devido ao incremento de nanopartículas é mais prevalente no regime laminar do que no turbulento. Wang *et al.* (2018) avaliaram as propriedades termofísicas, a taxa de transferência de calor e a queda de pressão de nanofluidos de nanoplaquetas de grafeno/EG-água (50:50 vol.%) em um trocador de calor de placas em miniatura para concentrações de 0,01 – 1,0 wt.%. Foram observados aumentos de até 21,1% na condutividade térmica e 300% na viscosidade dinâmica para o nanofluido com a

maior concentração de nanopartículas. Além disso, foi observado que para este tipo de aplicação, a faixa de concentração ideal de 0,01 – 0,1 wt.%.

Naddaf *et al.* (2019) investigaram a transferência de calor de nanofluidos de MWCNT e de nanoplaquetas de grafeno para diferentes vazões (18,75 - 50 mL/s) e concentrações de nanopartículas (0,05 - 0,5 wt.%) em um tubo circular em regime laminar. Os resultados exibiram que o coeficiente de transferência de calor local aumenta para todos os nanofluidos analisados em relação ao fluido base. Além disso, como era esperado, o maior aumento do coeficiente de transferência local ocorreu na entrada do tubo e diminuiu com a distância axial do tubo. Em relação ao índice de desempenho, apenas dois nanofluidos híbridos apresentaram índice abaixo do fluido base, indicando redução do desempenho termohidráulico. Sarafraz *et al.* (2019) avaliaram o desempenho termohidráulico de nanofluidos de nanoplaquetas de grafeno/EG-água em um microcanal com concentrações de 0,1 – 0,3 wt.%. As medições da condutividade térmica indicaram aumento de até 32,1% para a amostra com a maior concentração de nanopartículas a 323 K. O aumento do fluxo de calor incrementa o coeficiente convectivo de transferência de calor, devido ao aumento da temperatura, que eleva a condutividade térmica do nanofluido, além da amplificação do movimento browniano.

Barai *et al.* (2019) em seu recente trabalho de revisão bibliográfica, verificaram o aumento da condutividade térmica de nanofluidos de grafeno nos trabalhos disponíveis na literatura. Foram observados aumentos na faixa de 1,2 – 83,44% em relação ao fluido base, sendo o ganho máximo observado para nanofluidos híbridos de óxido de grafeno-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/água para a concentração volumétrica de 0,2% e temperatura de 313 K, cujo método de preparo foi realizado pelo método de ultrasonicação.

Purbia *et al.* (2019) compararam numericamente o desempenho de nanofluidos de óxido de grafeno com nanofluidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub> para concentrações volumétricas de 0,025% – 0,1%. A modelagem foi realizada no software MATLAB R2018b para um escoamento em regime permanente, turbulento e bidimensional na faixa de temperatura de 293 – 363 K. Identificou-se aumento de até 300% no desempenho térmico do trocador de calor quando foi utilizado o nanofluido grafeno com concentração volumétrica de 0,1% em vez do fluido base, enquanto para o nanofluido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o incremento foi de 27% e 25% para o nanofluido de TiO<sub>2</sub> na mesma concentração de nanopartículas e mesmo número de Reynolds.

Mazaheri *et al.* (2019) avaliaram o uso de nanofluidos híbridos de nanoplaquetas de grafeno revestidas com platina em um trocador de calor de tubo triplo com a presença de

microaletas internas. Para esta análise, foram consideradas concentrações de até 0,1 wt.%. Constatou-se que a geração total de entropia do trocador reduz com a adição de nanopartículas, ou seja, os nanofluidos apresentam resultados promissores para este tipo de aplicação. O aumento da altura e a diminuição do passo das microaletas tendem a reduzir a entropia do nanofluido. A destruição de exergia total diminuiu em até 23% com o uso do nanofluido com concentração de 0,1 wt.%.

Das *et al.* (2019) avaliaram as propriedades termofísicas de nanofluidos de grafeno em um termossifão em diferentes potências, temperaturas e ângulos de inclinação. Eles observaram que a condutividade térmica do nanofluido de grafeno tende a ser até 29% maior do que o fluido base a 318 K, enquanto a viscosidade dinâmica apresentou um aumento com o incremento das nanopartículas e uma redução com o acréscimo da temperatura. Além disso, eles identificaram que a resistência térmica do termossifão é reduzida com o aumento da potência e não apresentou correlação com o ângulo de inclinação.

Fares *et al.* (2020) avaliaram experimentalmente a transferência de calor de nanofluidos de grafeno/água (0,01 – 0,2 wt.%) em um trocador de calor casco e tubo vertical. Eles observaram um aumento de até 29% no coeficiente global de transferência de calor para o nanofluido com a maior concentração de nanopartículas. Além disso, foi identificado um aumento da eficiência do trocador de calor em até 13,7%. O aumento máximo na eficiência térmica foi encontrado ao utilizar o nanofluido com a concentração máxima de nanopartículas e vazão de 2,16 L/min.

Abdrabbuh *et al.* (2020) prepararam nanofluidos de nanoplacas de grafeno/água funcionalizadas covalentemente com extrações de broto de cravo em concentrações de 0,0025 – 0,1 wt.% para testá-los em tubos horizontais de formatos circular e quadrado. Eles observaram aumentos de até 2,05%, 6,15% e 7,29% no coeficiente convectivo de transferência de calor para as concentrações em massa de 0,025%, 0,075% e 0,1%, respectivamente. Além disso, eles identificaram aumentos de 2%, 5% e 7% na queda de pressão com a adição de nanopartículas de nanoplacas de grafeno. Para a maior concentração de nanopartículas, a queda de pressão apresentou ser 35% menor no tubo circular em comparação com o tubo quadrado.

Balaji *et al.* (2020) investigaram o comportamento térmico de nanofluidos de nanoplaquetas de grafeno funcionalizadas/água destilada em um microcanal para concentrações volumétricas de a entre 0,01 e 0,2% e vazões de 5 a 30 g/s. Foi identificada uma redução de até 10 K na temperatura do dissipador de calor, enquanto o coeficiente convectivo de transferência

de calor apresentou um aumento de até 71%, e o número de Nusselt teve um incremento de 60% em relação ao fluido base. Além disso, ocorreu o aumento de 12% na queda de pressão com o aumento das nanopartículas na concentração volumétrica máxima.

Bai *et al.* (2020) observaram que grande parte do consumo de energia na indústria ocorre devido ao atrito e à transferência de calor ineficiente. Por isso, eles analisaram nanofluidos de óxido de grafeno/água destilada em um dispositivo de teste de escoamento e de transferência de calor. Para a faixa de concentração volumétrica analisada de 0,025% a 0,1%, foram identificados aumentos no número de Nusselt de 2% e 18% para a menor e a maior concentração volumétrica de nanopartículas de óxido de grafeno. Na parte hidráulica, identificou-se a redução do coeficiente de atrito em até 71% em comparação com o fluido base para o nanofluido com a maior concentração. Além disso, a perda por abrasão do nanofluido com 0,05 vol.% de grafeno foi 18,5% menor em relação ao fluido base. Este resultado é um indicativo potencial de aplicação do grafeno em lubrificantes (ELOMAA *et al.*, 2015).

Preocupados com a toxicidade de alguns nanofluidos, Kumar *et al.* (2021b) produziram nanofluidos de nanoplaquetas de grafeno/água destilada ecologicamente corretos e não corrosivos para a aplicação em um coletor solar de placa plana. Foram utilizadas concentrações de 0,025 - 0,1 wt.%, vazões de 0,8 - 1,5 L/min, fluxo de calor de 800 W/m<sup>2</sup> e 100 W/m<sup>2</sup> e temperatura de entrada de 303 K - 323 K. O aumento máximo na eficiência do trocador de calor foi de 24,09% para a maior concentração de nanopartículas e vazão, quando comparado ao fluido base. Além disso, foram observados aumentos no fator de atrito em até 7,9% para o nanofluido com concentração de 0,1 wt.% de nanoplaquetas de grafeno.

Singh *et al.* (2021) analisaram experimental e numericamente o desempenho de nanofluidos de óxido de grafeno em um trocador de calor de placas compactas para concentrações de 0,1 - 1,25 vol.% e vazões de 1 - 5 L/min. Os resultados das duas metodologias apresentaram concordância satisfatória. A inserção de nanopartículas de óxido de grafeno produziu aumento da condutividade térmica em até 13%, na taxa de transferência de calor em 14%, na efetividade em 9% e no coeficiente global de transferência de calor em 10%.

Upadhyay *et al.* (2021) propuseram uma nova correlação para a transferência de calor de nanofluidos de grafeno, Cu, CuO, CNT e TiO<sub>2</sub>/água para aplicações térmicas solares através de dados experimentais, na qual considera as propriedades termofísicas, forma e tamanho da nanopartícula. A correlação consegue prever o número de Nusselt de Cu, CuO, CNT e TiO<sub>2</sub>/água com incerteza máxima de 20%, contudo, para nanofluidos de grafeno/água, a



correlação apresenta incerteza muito superior. Arif *et al.* (2022) analisaram numericamente a utilização de nanofluidos híbridos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -CNT-grafeno/água no escoamento entre duas placas paralelas infinitas através do software MATHCAD, nos quais são considerados os efeitos da forma das nanopartículas (esférica, plaqueta e cilíndrica). Foram utilizadas concentrações volumétricas de 0 – 0,04%, cujo ganho máximo no número de Nusselt devido à inserção das nanopartículas foi de 33,67% para a maior concentração analisada.

Ali (2022) realizou o estudo das propriedades termofísicas e da estabilidade de nanofluidos de grafeno em concentrações volumétricas de 0,01 – 0,10%, cujas temperaturas foram variadas de 283 – 363 K. Além disso, foi analisada a influência da concentração de surfactante. A densidade apresentou incremento com a concentração de nanopartículas, conquanto, o aumento da temperatura reduziu os valores da densidade. O calor específico apresentou forte influência da concentração de nanopartículas e da quantidade de surfactante, cujo valor apresentou redução de até 28,12%. Em relação à viscosidade dinâmica e a condutividade térmica, foi possível observar que o principal parâmetro que influencia na predição dessas propriedades é a temperatura, e o incremento de nanopartículas pode aumentar a viscosidade dinâmica em até 4,9% e aumentar a condutividade térmica em até 125,72%. A presença de surfactante em baixas concentrações demonstrou uma estabilidade de curto prazo, contudo, para uma proporção 1:1 em peso de nanopartículas de grafeno, os nanofluidos apresentaram estabilidade por até 45 dias.

Mei *et al.* (2022) avaliaram o desempenho térmico de nanofluidos de óxido de grafeno em coletores solares com concentrações de 0,002 – 0,01 wt.% em uma faixa de temperatura de 298 – 323 K. Além disso, mediram a condutividade térmica e a viscosidade dinâmica dos nanofluidos e observaram aglomeração e sedimentação após 20 dias. As medições das propriedades termofísicas apresentaram comportamento semelhante ao encontrado por Ali (2022). O maior aumento da condutividade térmica foi observado para a maior concentração e temperatura, cujos ganhos obtidos discordam dos valores encontrados com as correlações propostas por Taherialekouhi *et al.* (2019) e Lu e Lin (1996). Por isso, os autores propuseram uma nova correlação para nanofluidos de óxido de grafeno na faixa estudada.

Fujimoto *et al.* (2022a) realizaram uma análise numérica do escoamento e da transferência de calor de nanofluidos de grafeno (0,1 vol.%) em um tubo de aço inoxidável horizontal em regime turbulento sob um fluxo de calor constante. Na comparação do modelo monofásico com o bifásico, observou-se que ambos os modelos apresentam um número de

Nusselt do nanofluido de grafeno maior que do fluido base e aumentou com o incremento da vazão. Além disso, foram identificados aumentos de 6% na energia cinética turbulenta e de 20% nos gradientes de velocidade na região próxima à parede. Também foi observado que os ganhos térmicos obtidos com o modelo bifásico, subestimaram os ganhos encontrados experimentalmente. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que as simulações consideraram que as nanopartículas de grafeno têm formato esférico.

Fujimoto *et al.* (2022b) propuseram um novo método de produção de nanofluidos de grafeno. Além disso, também foram realizadas investigações experimental e numérica do desempenho de nanofluidos de grafeno em um tubo circular horizontal escoando em regime turbulento e fluxo de calor constante. Na parte numérica foi utilizado o modelo de turbulência  $\kappa - \epsilon$  realizável para prever as flutuações instantâneas. Foram identificados aumentos de 33% no número de Nusselt em relação ao fluido base, de 8% na energia cinética turbulenta e incremento nos gradientes de velocidades próximos à parede, assim como Fujimoto *et al.* (2022a).

Dayou *et al.* (2022) investigaram o uso de nanofluidos de nanoplaquetas de grafeno/água destilada e MWCNT/água destilada em um trocador de calor de tubo concêntrico. Foram consideradas vazões de 1,5 - 2,5 L/min e concentrações volumétricas de 0,01 - 0,35% de nanopartículas. Para todos os casos analisados, observou-se que o nanofluido de nanoplaquetas de grafeno apresentou um coeficiente convectivo de transferência de calor superior ao do nanofluido de MWCNT, cujos ganhos máximos foram de 26,1% e 14,4%, respectivamente, para a vazão de 2,5 L/min. Mesmo em concentrações menores (0,05 vol.%), o nanofluido de nanoplaquetas de grafeno apresentou um incremento maior que o nanofluido de MWCNT com 0,15 vol.% de nanopartículas.

Verma *et al.* (2022) analisaram numericamente o comportamento de nanofluidos de grafeno/água e óxido de grafeno/água em um meio poroso. As equações diferenciais parciais acopladas foram transformadas em equações diferenciais ordinárias e resolvidas utilizando o método do tiro com o Runge-Kutta de quarta-ordem. Foi observado que o nanofluido de grafeno/água atrasou mais a separação da camada limite em relação ao nanofluido de óxido de grafeno. Além disso, a presença do material poroso também retardou a separação do escoamento. Singh *et al.* (2022) caracterizaram nanofluidos de óxido de grafeno e os aplicaram em um coletor solar, cujas concentrações variaram de 0,05 - 0,5 wt.% para aplicações em geração de energia, redução do volume de armazenamento de energia térmica e redução de

preço. Foram observados aumentos de 39,5% na condutividade térmica e de 7,75% do calor específico para a faixa de temperatura de 298 K a 573 K. Além disso, foi destacado por meio de simulações, o aumento de 3,1% na geração de energia.

Huhemandula *et al.* (2022) avaliaram o desempenho térmico de nanofluidos de óxido de grafeno/água com concentrações de 0,1 - 0,45 wt.% em um coletor solar de placa plana para a faixa de temperatura de 298 K a 323 K. Para a redução dos custos experimentais, foram utilizados modelos de redes neurais artificiais e lógica fuzzy para prever o desempenho no intervalo de dados. Identificou-se que a lógica fuzzy apresenta menor erro em comparação com as redes neurais artificiais. Também foi observado que a eficiência do coletor solar aumenta com a radiação solar incidente, assim com o aumento da vazão.

Huq *et al.* (2022) avaliaram a preparação, estabilidade, propriedades termofísicas e aplicação de nanofluidos de nanoplaquetas de grafeno em trocadores de calor e coletores solares através de uma revisão bibliográfica. Foram identificados aumentos de até 30% na condutividade de nanofluidos de nanoplaquetas de grafeno puros e funcionalizados covalentemente para a concentração de 0,1 wt.%, enquanto o incremento máximo no coeficiente convectivo de transferência de calor foi de 200% e 119%, para o nanofluido com nanoplaquetas de grafeno puro e funcionalizado covalentemente, respectivamente.

Zolfalizadeh *et al.* (2023) analisaram experimentalmente o desempenho térmico e hidráulico de nanofluidos contendo nanoplaquetas de grafeno/água com concentrações de 0,01 wt.% a 0,06 wt.% em um trocador de calor do tipo casco e tubo. Ao utilizar o nanofluido com concentração de 0,06 wt.%, foram identificados aumentos máximos de 22,47% e 15,65% no coeficiente convectivo de transferência de calor e na taxa de transferência de calor, respectivamente, em comparação com o fluido base. Além disso, os autores utilizaram o modelo de Brinkman (1952) para prever a viscosidade dinâmica dos nanofluidos.

Na Tab. 2.3 estão apresentados alguns trabalhos sobre a influência de nanopartículas de grafeno e seus derivados nas propriedades termofísicas dos nanofluidos. Foi identificado que a adição de nanopartículas tende a aumentar a condutividade térmica, a viscosidade dinâmica e densidade, enquanto o calor específico tende a reduzir. A adição de nanopartículas de grafeno promove a variação das propriedades termofísicas de forma predominante na condutividade térmica e viscosidade dinâmica. Além disso, são raros os trabalhos que avaliam comportamento da densidade e do calor específico com a adição de nanopartículas de grafeno. O fluido base, a geometria da nanopartícula, surfactantes e concentração de nanopartículas afetam de forma

significativa nas propriedades termofísicas dos nanofluidos de grafeno. Os ganhos obtidos na condutividade térmica dos nanofluidos de grafeno tendem a serem superiores aos nanofluidos com nanopartículas metálicas e de óxidos, mesmo com concentrações inferiores.

Tabela 2.3 - Influência da adição de nanopartículas de grafeno e seus derivados nas propriedades termofísicas dos fluidos base

Autoria	Nanopartícula	Fluido base	Concentração	Descobertas
Taherialekouhi (2019)	GO – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Água	0,1 – 1 vol.%	k ↑ 33,9%
Das <i>et al.</i> (2019)	Grafeno	DI	0,01 – 0,05 vol.%	k ↑ 29 %, μ ↑ 25%
Kilinç <i>et al.</i> (2019)	GO e GNR	Água	0,01 - 0,02 vol.%	k ↑ 13,67%, μ ↑ 49,93%, ρ ↑ 0,25%
Yang <i>et al.</i> (2019)	GO	Água	0,05 – 1,5 vol.%	k ↑ 48,15%
Montazer <i>et al.</i> (2020)	GNP	Água	0,02 – 0,07 vol.%	k ↑ 13,51%, μ ↑ 11,72% e C <sub>p</sub> ↓ 3,9%
Alawi <i>et al.</i> (2020)	GNP	Água	0,01 – 0,05 vol.%	k ↑ 30,48%, μ ↑ 27,53% e ρ ↑ 0,0532%
Naveen e Kishore (2020)	Grafeno	EG-água	0,1 – 0,3 vol.%	k ↑ 30%, μ ↑ 30%
Rafieerad <i>et al.</i> (2020)	GNP	Água	0,05 – 0,09 vol.%	k ↑ 44,63%
Balaji <i>et al.</i> (2020)	f-Grafeno	DW	0,1 – 0,2 vol.%	k ↑ 11%, μ ↑ 13,3%
Akram <i>et al.</i> (2021)	f-Grafeno	DW	0,01 – 0,05 vol.%	k ↑ 25,68%, μ ↑ 13,7%, ρ ↑ 0,12%
Singh <i>et al.</i> (2021)	GO	Água	0,1 – 1 vol.%	k ↑ 13%
Oliveira <i>et al.</i> (2021)	Grafeno	EG-água	0,025 – 0,15 vol.%	k ↑ 5,9%, μ ↑ 4,7%

Kumar <i>et al.</i> (2021a)	GNP	DW	0,01 – 0,05 vol.%	k ↑ 17,76%, μ ↑ 10,39% e ρ ↑ 0,1%
Borode <i>et al.</i> (2021b)	GNP – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DW	0,1 vol.%	k ↑ 5,62%, μ ↑ 17,54%
Ali (2022)	Grafeno	Água	0,01 – 0,1 vol.%	k ↑ 125,72%, μ ↑ 4,9%, ρ ↑ 1,09% e C <sub>p</sub> ↓ 28,12%
Selvarajoo <i>et al.</i> (2024)	GO – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DI	0,25 – 1,0 vol.%	k ↑ 4,97%, μ ↑ 8,27%
Aich <i>et al.</i> (2024)	Grafeno	Água	0,05 – 0,5 vol.%	k ↑ 48,15%, μ ↑ 163%

### 2.3 Aplicação de nanofluidos em radiadores automotivos

Na Fig. 2.1, está ilustrado um sistema de arrefecimento automotivo exemplificativo. O fluido refrigerante é bombeado para o bloco do motor por um tubo, em seguida, este líquido de arrefecimento absorve o calor do bloco do motor (geralmente feito de ferro fundido ou liga de alumínio) e retorna para o radiador ao atingir a temperatura determinada no termostato (localizado entre o radiador e o bloco do motor), que atua como uma válvula para regular a vazão para o radiador, podendo, desta forma, controlar a temperatura no bloco do motor. No último estágio, o fluido refrigerante escoar no radiador, que será resfriado pelo ar circundante, podendo ou não ter o auxílio de um ventilador (XIAN *et al.*, 2018).

A falha na transferência de calor eficiente pode levar ao superaquecimento ou resfriamento excessivo do motor. Desta forma, manter a temperatura ideal do bloco do motor é essencial para aumentar a vida útil do sistema. Devido à necessidade de motores cada vez mais potentes, os radiadores passaram por diversas modificações (adição de aletas, troca de material, formato do tubo etc.), contudo, essas alterações atingiram um limite técnico (ABBAS *et al.*, 2020).

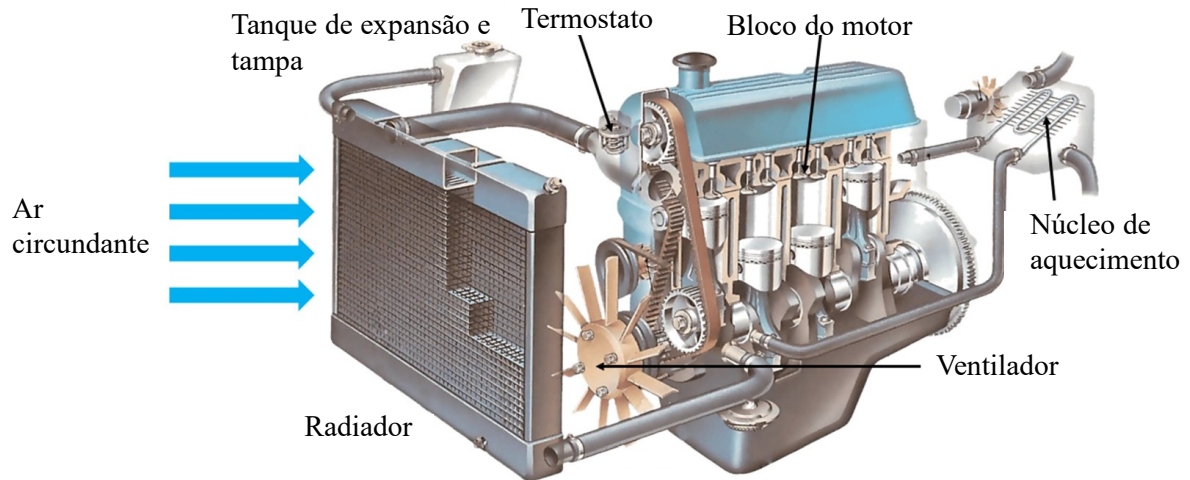


Figura 2.1- Sistema de arrefecimento automotivo. Fonte: Adaptado de Xian *et al.* (2018)

A água é um dos principais fluidos de arrefecimento utilizados em radiadores automotivos e em outros trocadores de calor, conquanto, em alguns países que atingem temperaturas extremamente baixas, a água tende a congelar, causando danos aos tubos, devido ao processo de expansão do seu volume. Desta forma, a indústria automobilística tem adicionado etilenoglicol como agente anticongelante com a função de aumentar o ponto de congelamento e de ebulição do fluido refrigerante, conforme pode ser observado na Fig. 2.2.

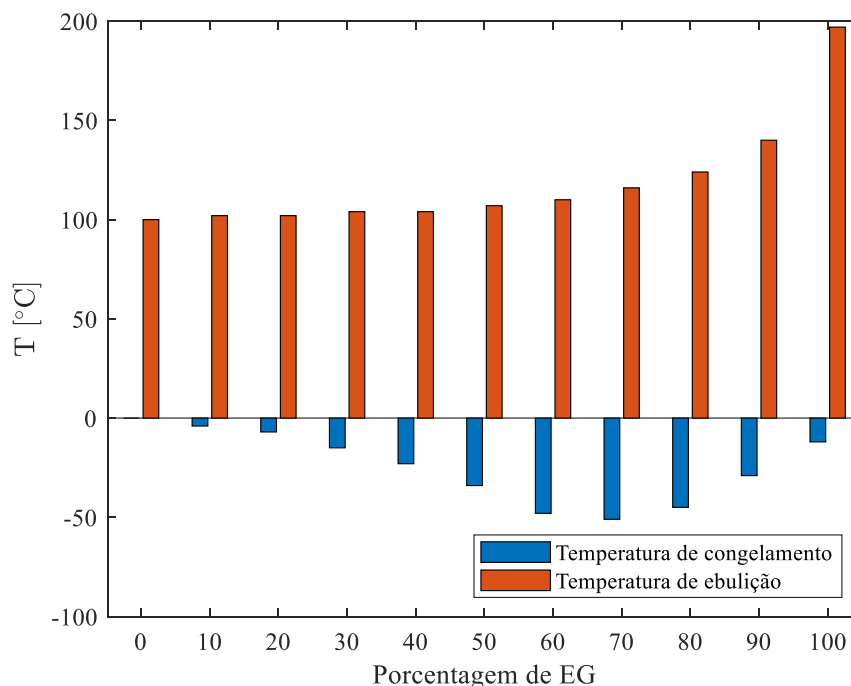


Figura 2.2- Temperatura de congelamento e de ebulição da mistura de EG-água. Fonte: Elaborado a partir dos dados de Xian *et al.* (2018)

Desta forma, tem-se a vantagem de poder absorver mais calor e conseguir operar em uma temperatura mais alta, podendo desta forma ter-se um motor com maior potência (XIAN *et al.*, 2018). Contudo, a inserção de etilenoglicol deve ser feita paulatinamente, pois a adição deste fluido aumenta a viscosidade dinâmica, e diminui a condutividade térmica do fluido refrigerante (AJEEB *et al.*, 2023).

Vários pesquisadores realizaram experimentos e análises numéricas usando nanofluidos como fluidos refrigerantes em radiadores automotivos e, em sua maioria, obtiveram resultados promissores, em relação à melhoria na troca de calor em comparação ao fluido base (PATEL *et al.*, 2023). A seguir, foi realizada uma discussão da aplicação de nanofluidos em radiadores automotivos.

Conforme Arora e Gupta (2020), o desempenho termohidráulico de nanofluidos em radiadores automotivos depende do formato do tubo (circular, plano etc.), tipo de nanofluido, material do radiador (geralmente, alumínio e latão), concentração de nanopartículas, número de Reynolds, temperatura de entrada etc. Quanto mais achatado for o perfil do tubo, mais eficiente será a transferência de calor, pelo fato de que quanto mais próximas estiverem as paredes superior e inferior, maior será a perturbação da camada limite, aumentando a taxa de transferência de calor.

O aumento da concentração de nanopartículas, tende a aumentar o movimento browniano e a nanoconvecção das partículas, perturbando a camada limite térmica, desta forma, ocorre o atraso da formação da mesma, e conforme Albojamal e Vafai (2017), a taxa de transferência de calor é mais alta para regiões de entrada térmica. A transferência de calor apresenta comportamento diretamente proporcional ao número de Reynolds, devido ao aumento da colisão e da mistura das nanopartículas no fluido base, da intensidade da turbulência e, por consequência, ao incremento da transferência de calor.

A temperatura de entrada do líquido de arrefecimento é um parâmetro fundamental na avaliação do desempenho termohidráulico de radiadores automotivos. O aumento da temperatura do fluido tende a aumentar a energia cinética das moléculas, e por consequência o aumento da interação partícula-partícula, resultando em uma maior taxa de transferência de calor, aumentando a condutividade térmica e diminuindo a viscosidade dinâmica do líquido de arrefecimento (AJEEB; MURSHED, 2022). No entanto, Contreras e Bandarra Filho (2022) avaliaram nanofluidos em radiadores automotivos e observaram que para altas temperaturas (353 – 378 K), ocorreu a degradação da estabilidade do nanofluido, resultando na diminuição

da transferência de calor, cujo resultado foi corroborado com os resultados numéricos de Nascimento *et al.* (2024). Contreras *et al.* (2019) observaram a redução da potência de bombeamento devido ao aumento da temperatura de entrada (328 – 358 K) que reduz a viscosidade do líquido.

M'hamed *et al.* (2016) analisaram experimentalmente nanofluidos de MWCNT/água-EG (50:50) em concentrações volumétricas de 0,1 - 0,5% e vazões de 2 - 6 L/min, em que foi possível observar que no regime laminar houve o aumento máximo de 196,3% da taxa de transferência de calor em relação ao fluido base. Por outro lado, Oliveira *et al.* (2017) avaliaram experimentalmente o desempenho térmico de nanofluidos de MWCNT/água com concentrações mássicas entre 0,05% e 0,16% em um radiador automotivo. Para a faixa de vazão de 30 - 70 g/s e temperatura de entrada de 323 - 353 K, observou-se uma ligeira diminuição da taxa de transferência de calor. Essas diferenças nos resultados obtidos podem indicar problemas na estabilidade dos nanofluidos de Oliveira *et al.* (2017), pois nanofluidos não estáveis apresentam menor condutividade térmica do que nanofluidos estáveis (CHAKRABORTY; PANIGRAHI, 2020).

Selvam *et al.* (2017c) investigaram a queda de pressão e o coeficiente convectivo de transferência de calor de nanofluidos de nanoplacas de grafeno/água-EG em um radiador automotivo. Foram consideradas amostras com concentrações de 0,1 - 0,5 vol.%, cujas propriedades foram obtidas experimentalmente. Para a vazão mássica de 10 - 100 g/s e temperatura de entrada de 308 – 318 K, o coeficiente convectivo de transferência de calor apresentou aumento de até 51% em relação ao fluido base. Selvam *et al.* (2017b) verificaram o aumento do coeficiente global de transferência de calor de nanofluidos com as mesmas características de Selvam *et al.* (2017c) em um radiador automotivo. Os autores identificaram o aumento do coeficiente convectivo de transferência de calor em relação a vazão mássica, a temperatura de entrada no nanofluido e a concentração de nanoplacas de grafeno. Além disso, ocorreu o aumento da queda pressão, contudo, este parâmetro foi significativamente mais influenciado pelo vazão mássica, do que pela concentração de nanoplacas grafeno.

Kakavand e Molana (2017) analisaram a transferência de calor de nanofluidos de nanotubos de carbono e de nanotubos de boro em radiadores automotivos de tubos reto e torcido, através dos programas GAMBIT e Fluent, cujas propriedades foram calculadas considerando uma mistura monofásica com até 1% de concentração volumétrica. Dentre os resultados apresentados, destaca-se que a redução da temperatura é maior para os menores



números de Reynolds. A utilização de nanofluidos no tubo torcido apresenta desempenho térmico maior que no tubo reto no regime turbulento e a transferência de calor média é 11% e 7,7% maior em relação à água para nanotubos de carbono e nanotubos de boro, respectivamente.

Minea e Estellé (2018) analisaram numericamente a transferência de calor de nanofluidos de nanotubos de carbono/água e surfactante dodecil benzeno sulfonato de sódio (SDBS) em regime laminar (número de Reynolds entre 500 e 2000). Além da concentração das nanopartículas, levou-se em consideração as características newtonianas e não newtonianas dos nanofluidos. Observou-se que o incremento do coeficiente convectivo de transferência de calor apresenta melhores resultados para baixos números de Reynolds e maiores concentrações de nanotubos em fluidos newtonianos.

Jadar *et al.* (2017) analisaram a aplicabilidade de nanofluido de f-MWCNT/água destilada com a concentração volumétrica de 0,1% e vazão mássica de 0,5 L/min – 2,5 L/min em um radiador automotivo de 33 tubos, cuja temperatura de entrada foi de 318 K. O trocador sofre ação de um fluxo cruzado de ar, com o intuito de reproduzir um sistema automotivo real. Pôde ser observado o aumento de até 45% da taxa de transferência de calor ao se utilizar nanofluidos em comparação ao fluido base. Além disso, a temperatura de saída no radiador automotivo apresentou redução em comparação ao fluido base, conquanto, o aumento da vazão mássica tende a aumentar essa temperatura.

Gulhane e Chincholkar (2017) verificaram a influência de nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /água em um radiador automotivo, em concentrações volumétricas de 0,1% e 0,4%, sem a utilização de dispersantes ou estabilizantes. Foram consideradas vazões de 2 a 5 L/min e temperaturas de entrada de 323 K a 343 K. O coeficiente de transferência de calor convectiva apresentou um aumento de 45,87% em relação ao fluido base para a concentração volumétrica de 0,4% e temperatura de entrada de 323 K. Além disso, o número de Nusselt aumentou com a adição de nanopartículas, o incremento da vazão e a temperatura de entrada do líquido de arrefecimento.

Alosious *et al.* (2017) avaliaram de forma experimental e numérica a transferência de calor de nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CuO}$ /água em um radiador automotivo de tubos planos com temperatura de entrada constante de 363 K. Foram preparados nanofluidos com concentração volumétrica de 0,05% para a realização dos experimentos na faixa de número de Reynolds de 136 a 816. Identificou-se o aumento máximo de 13,2% e de 16,4% no coeficiente de transferência de calor, e possível redução de 2,1% e 2,9% da área do radiador, para os

nanofluidos de CuO e de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, respectivamente. Tijani e Sudirman (2018) analisaram através do programa Ansys Fluent, a transferência de calor de nanofluidos com as mesmas nanopartículas que Alosious *et al.* (2017), porém, foi utilizada uma mistura de água e EG (50:50) como fluido base e concentrações de 0,05%, 0,15% e 0,3% em um radiador automotivo de tubo plano. Pôde-se observar que a amostra de CuO apresentou o maior desempenho na transferência de calor, obtendo o número de Nusselt de 208,71, enquanto para o nanofluido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, foi de 173,19.

Salamon *et al.* (2017) avaliaram a transferência de calor de nanofluidos de TiO<sub>2</sub>/água-propilenoglicol em um radiador automotivo em concentrações volumétricas de 0,1 a 0,3%. Foram consideradas vazões de 3 a 6 L/min e temperaturas de entrada de 323 K a 353 K. Foram observados aumentos de até 8,3% no número de Nusselt para o nanofluido com a maior concentração de nanopartículas. Além disso, identificou-se que os nanofluidos apresentaram melhores resultados para as temperaturas mais altas. Ahmed *et al.* (2018) realizaram um estudo experimental do aprimoramento de um radiador automotivo, utilizando nanofluidos de TiO<sub>2</sub>/água como fluido refrigerante do sistema. Os autores identificaram a diminuição do fator de atrito em relação ao aumento do número de Reynolds e da concentração volumétrica das nanopartículas. Além disso, este nanofluido com concentração de 0,2% pode aumentar a efetividade do radiador em até 47% em relação às outras amostras analisadas. O coeficiente de transferência de calor médio possui forte influência do número de Reynolds e da concentração volumétrica das nanopartículas de TiO<sub>2</sub>.

Palaniappan e Ramasamy (2018) apresentaram o desempenho térmico de nanofluidos de cinzas volantes/EG-água em um radiador automotivo para concentrações volumétricas de 0 a 2% e número de Reynolds de 4000 a 8000. Foram constatados aumentos de até 11,7% no coeficiente global de transferência com o nanofluido com menor número de Reynolds e maior concentração de nanopartículas em relação ao fluido base, enquanto para o maior número de Reynolds, esse aumento foi de 21%. Contudo, para a concentração volumétrica de 2%, a potência de bombeamento apresentou um incremento de 50% em relação ao fluido base.

Karimi e Afrand (2018) avaliaram numericamente um trocador de calor similar a um radiador automotivo, sob a ação de um fluxo cruzado de ar. Foram utilizados como líquido de arrefecimento nanofluidos de MgO-MWCNT/EG e MgO-MWCNT/água. Os resultados apresentados indicaram que radiadores com tubos verticais apresentam melhores resultados que aqueles com tubos horizontais. Descobriu-se ainda que o aumento da concentração de

nanopartículas tende a melhorar o número de Nusselt. Além disso, com os tubos elípticos o número de Nusselt apresentou ser até 10% maior do que os tubos circulares.

Ganesan e Kannan (2018) avaliaram experimentalmente e numericamente, o uso de nanofluidos híbridos de MWCNT- $\text{Al}_2\text{O}_3$ /EG-água (1:1) em um radiador automotivo. As concentrações volumétricas, temperaturas de entrada e vazão volumétrica foram variadas entre 0,03 – 0,12%, 313 – 348 K e 0,6 -0,96  $\text{m}^3/\text{h}$ , respectivamente. Foi identificado um aumento de até 35% na taxa de transferência de calor para o nanofluido com 1,5 vol.% de MWCNT e 0,09 vol.% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . No entanto, também foi identificado o aumento de 27,03% na viscosidade do nanofluido com a maior concentração de nanopartículas.

Ponangi *et al.* (2018) analisaram nanofluidos de óxido de grafeno/água-EG em um radiador automotivo com concentrações volumétricas de 0,02 – 0,04% e vazão de 3 – 6 L/min. Foi observado um aumento de até 56,45% na efetividade do radiador para o nanofluido com uma concentração de 0,03%, vazão de 5 L/min e temperatura de entrada de 313 K. No entanto, para temperaturas superiores a 323 K, os resultados apresentaram efetividades inferiores, sugerindo a possibilidade de problemas de aglomeração devido ao aquecimento do nanofluido.

Sumanth *et al.* (2018) avaliaram o efeito da adição de nanopartículas de carboxil grafeno em um líquido de arrefecimento de um radiador automotivo. Foi utilizado uma mistura binária de água e EG como fluido base, com concentrações volumétricas de 0,02%, 0,03% e 0,04% de nanopartículas. A vazão foi variada entre 3 – 6 L/min, a temperatura de entrada foi ajustada para 313 K e 323 K e o número de Reynolds do ar variou entre 1200 e 2500. Foram observados aumentos de até 32,7% no número de Nusselt para temperatura de entrada de 313 K, concentração volumétrica de 0,02%, número de Reynolds em 2900 e velocidade do ar em 2,6 m/s. A condição com melhor eficácia do radiador dentre os casos analisados foi para o nanofluido com concentração volumétrica de 0,02%, temperatura de entrada de 313 K e vazão de 5 L/min, cujo aumento foi de 27,38%.

Subhedar *et al.* (2018) avaliaram a transferência de calor de nanofluidos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /água-etilenoglicol em um radiador automotivo, cujas concentrações volumétricas, vazão e temperatura foram de 0,2% a 0,8%, 4 a 9 L/min e 338 K a 358 K, respectivamente. Para o nanofluido com a menor concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , foi observado um aumento de 30% da transferência de calor e a possibilidade de redução de 41,16% da área superficial do radiador. Rafi *et al.* (2019) avaliaram experimentalmente o desempenho térmico de nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /EG-água e CuO/EG-água com concentrações volumétricas de 0,2% e 0,1%,

respectivamente, em um radiador automotivo (resfriado por um ventilador com velocidade constante) para a faixa de temperatura de entrada de 318 K – 353 K e vazão fixa de 0,135 kg/s. Eles identificaram aumentos de 30 - 35% e 40 – 45% no desempenho térmico do fluido quando foram utilizados os nanofluido de  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ -água e  $\text{CuO}/\text{EG}$ -água, respectivamente, em comparação com o fluido base. Além disso, observou-se que a adição de etilenoglicol em água tende a diminuir o desempenho térmico em até 25%.

Kilinç *et al.* (2019) verificaram o desempenho de um radiador automotivo utilizando água pura como fluido base e nanofluidos de óxido de grafeno e de nanofitas de grafeno (GNR) para temperaturas de entrada de 308 – 317 K, vazão de 0,6 - 0,9  $\text{m}^3/\text{h}$  e concentrações volumétricas de 0,01% e 0,02%. Eles encontraram aumentos nos valores médios do coeficiente global de transferência de calor de até 36,08% para o nanofluido de óxido de grafeno e de até 20,64% para os nanofluidos de nanofitas de grafeno, em relação ao fluido base.

Toh e Ting (2019) analisaram o desempenho térmico de nanofluidos de nanoplacas de grafeno/água no mesmo tipo de trocador de calor, através do programa Ansys Fluent. Eles observaram o aumento do número de Nusselt em função da concentração volumétrica (0 - 0,5 vol.%) e do número de Reynolds (1000 - 2000). O aumento máximo do número de Nusselt médio foi de 74,18% para a maior concentração e número de Reynolds. Além disso, os autores destacam que este incremento pode acarretar redução do trocador de calor, reduzindo o consumo de combustível.

Contreras *et al.* (2019) realizaram experimentos para avaliar o desempenho termohidráulico de nanofluidos de grafeno (0,01%, 0,05% e 0,1 vol.%) e de prata (0,05 vol.%) e uma mistura de água e etilenoglicol dividida em partes iguais, em um radiador automotivo. Os testes foram realizados em uma bancada de testes ilustrada na Fig. 2.3. Contreras *et al.* (2019) conseguiram avaliar o desempenho termohidráulico dos nanofluidos de grafeno e de prata nas condições de trabalho de um radiador automotivo. Nesta configuração têm-se os circuitos do líquido de resfriamento e do ar. A região do nanofluido contém um banho termostático para realizar o aquecimento do fluido até a temperatura desejada mantida por um termostato. Além disso, o circuito contém uma microbomba para vazões de até 12 L/min e elevadas temperaturas. No lado do ar a bancada consiste em um túnel de vento que possui um ventilador centrífugo que realiza a sucção do ar em um fluxo cruzado ao radiador, o qual é controlado por um inversor de frequência.

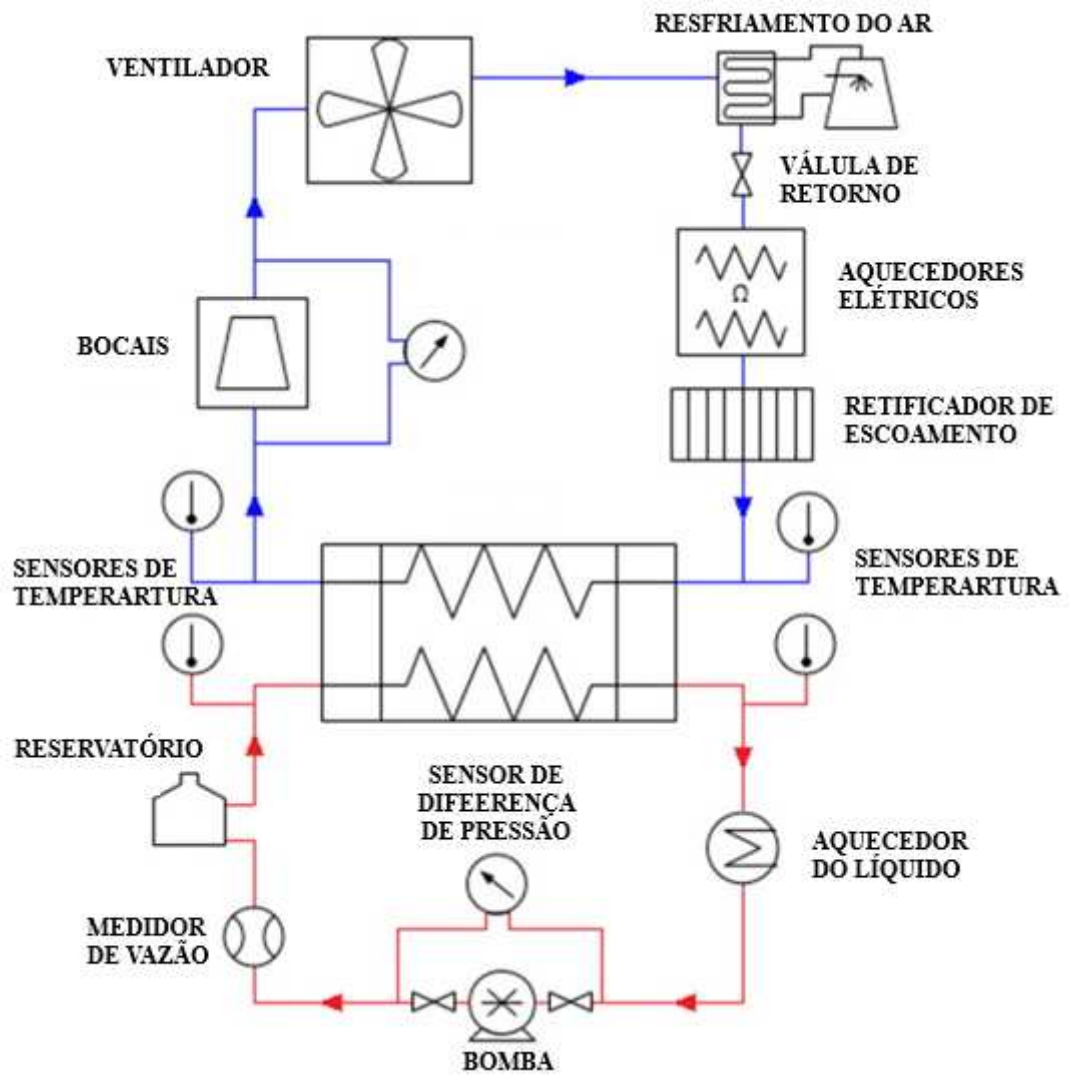


Figura 2.3 - Diagrama esquemático da bancada de ensaio experimental para trocadores de calor com fluxo de ar cruzado. Fonte: Adaptado de Contreras *et al.* (2019)

Os testes foram realizados em regime laminar para o fluido base e os nanofluidos com vazões mássicas de 0,08 kg/s a 0,11 kg/s e temperaturas de entrada de 328 K a 358 K, enquanto o ar foi mantido a 2,1 m/s e 298 K para todos os testes. Os resultados mostraram que, para a concentração de 0,05%, o nanofluido de grafeno apresentou maior incremento na condutividade térmica em comparação com o nanofluido de prata. Em temperaturas mais altas, os aumentos da taxa de transferência de calor foram maiores, como na concentração de 0,1% a 358 K, em que houve um aumento de 3,3% em relação ao fluido base. No entanto, para as amostras com menores concentrações de grafeno, ocorreu uma redução de até 11%, conforme está ilustrado na Fig. 2.4.

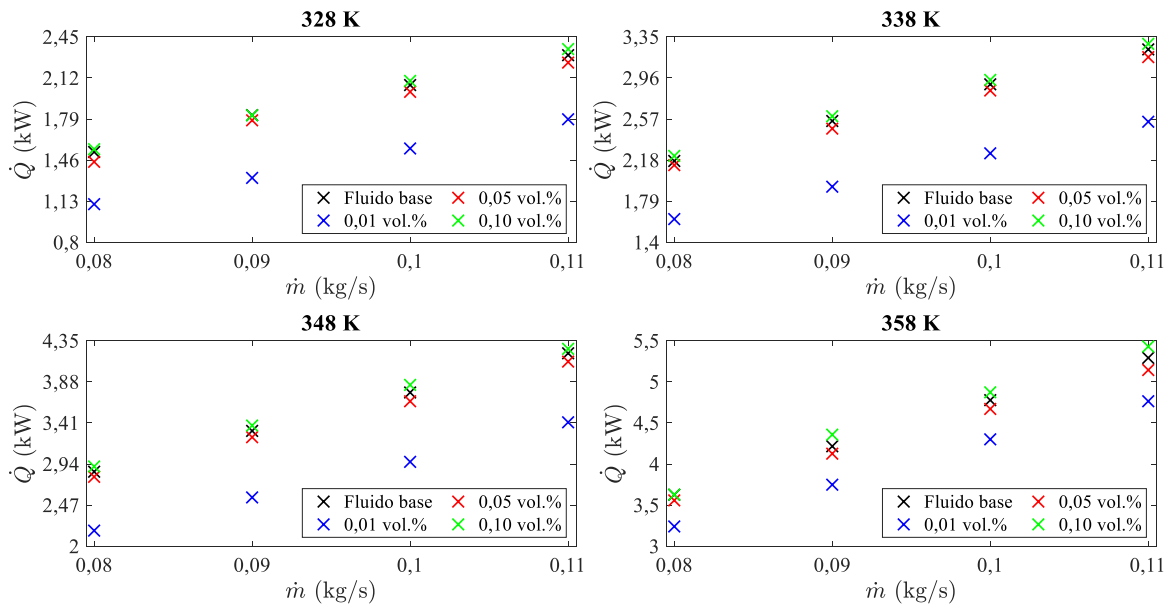


Figura 2.4 - Resultados experimentais da taxa de transferência de calor para amostras de grafeno em função da vazão mássica. Fonte: Adaptado de Contreras *et al.* (2019)

Além da parte térmica, Contreras *et al.* (2019) também avaliaram o desempenho hidráulico dos nanofluidos de grafeno em relação ao fluido base, através da potência de bombeamento, conforme ilustrado na Fig. 2.5. Pode-se observar que, para a amostra com 0,01 vol.% de grafeno, houve redução na potência de bombeamento para as duas temperaturas de entrada mais baixas. No entanto, para temperaturas mais altas, as amostras apresentaram maiores ganhos na potência de bombeamento. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, para temperaturas mais elevadas, há tendência de aglomeração e sedimentação das nanopartículas, o que aumenta a potência de bombeamento. Ainda na Fig. 2.5, pode-se observar que, dentre todas as amostras analisadas, o acréscimo máximo na potência de bombeamento em função do incremento de nanopartículas foi de cerca de 4% para a temperatura mais alta.

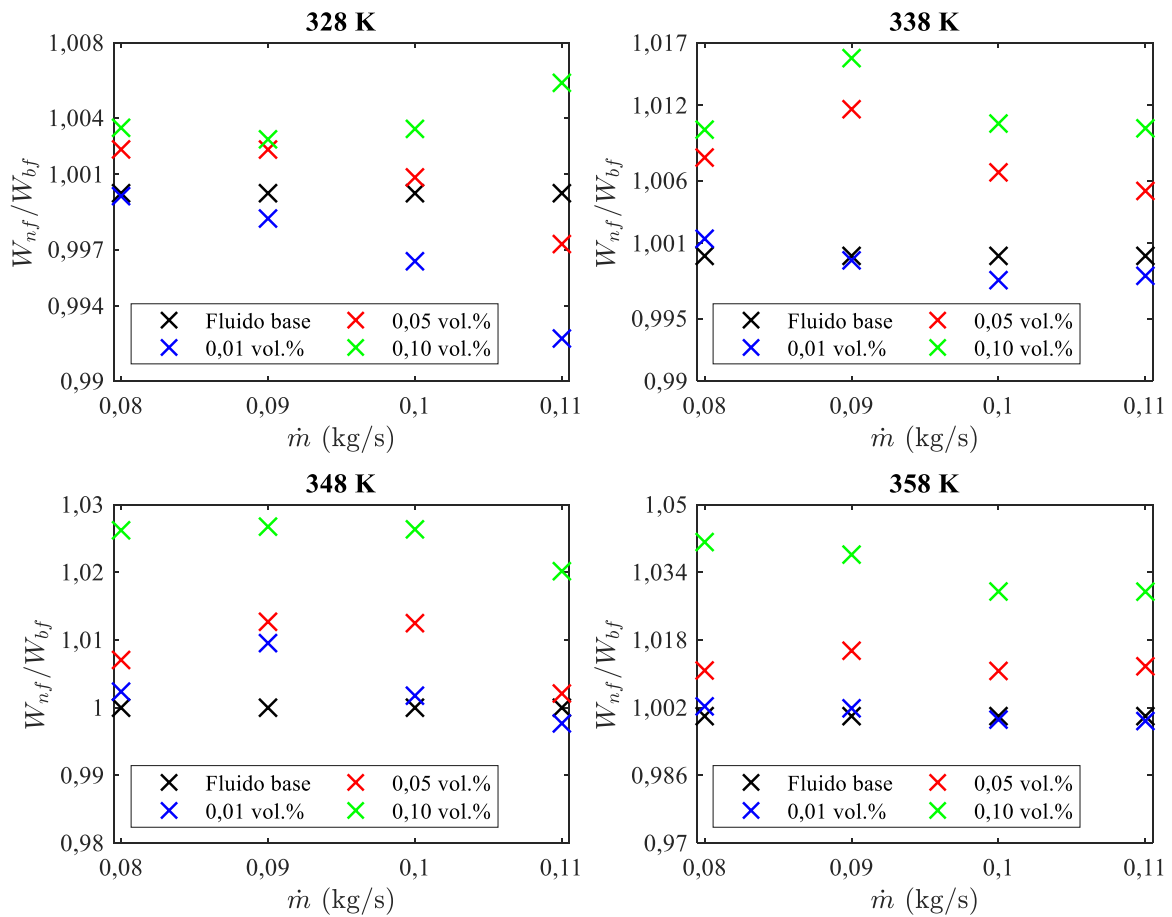


Figura 2.5 - Resultados experimentais de potência de bombeamento para amostras de grafeno em função da vazão mássica. Fonte: Adaptado de Contreras *et al.* (2019)

Em estudos sobre a aplicação de nanofluidos em radiadores automotivos, é necessário avaliar o coeficiente de desempenho termohidráulico dos líquidos de arrefecimento para determinar se os ganhos térmicos compensam o aumento da potência de bombeamento devido ao aumento da viscosidade (ocasionado pela adição de nanopartículas), como realizado por Contreras *et al.* (2019). Conforme pode ser observado na Fig. 2.6, apenas o nanofluido com maior concentração de nanopartículas e nas duas menores temperaturas apresentou resultados satisfatórios (superiores ao fluido base), ou seja, os ganhos térmicos foram maiores que o aumento na potência de bombeamento. Esse comportamento pode ser explicado pela Fig. 2.5, em que foi possível observar o aumento da potência de bombeamento em função do aumento da temperatura de entrada, provavelmente devido à aglomeração e sedimentação das nanopartículas.

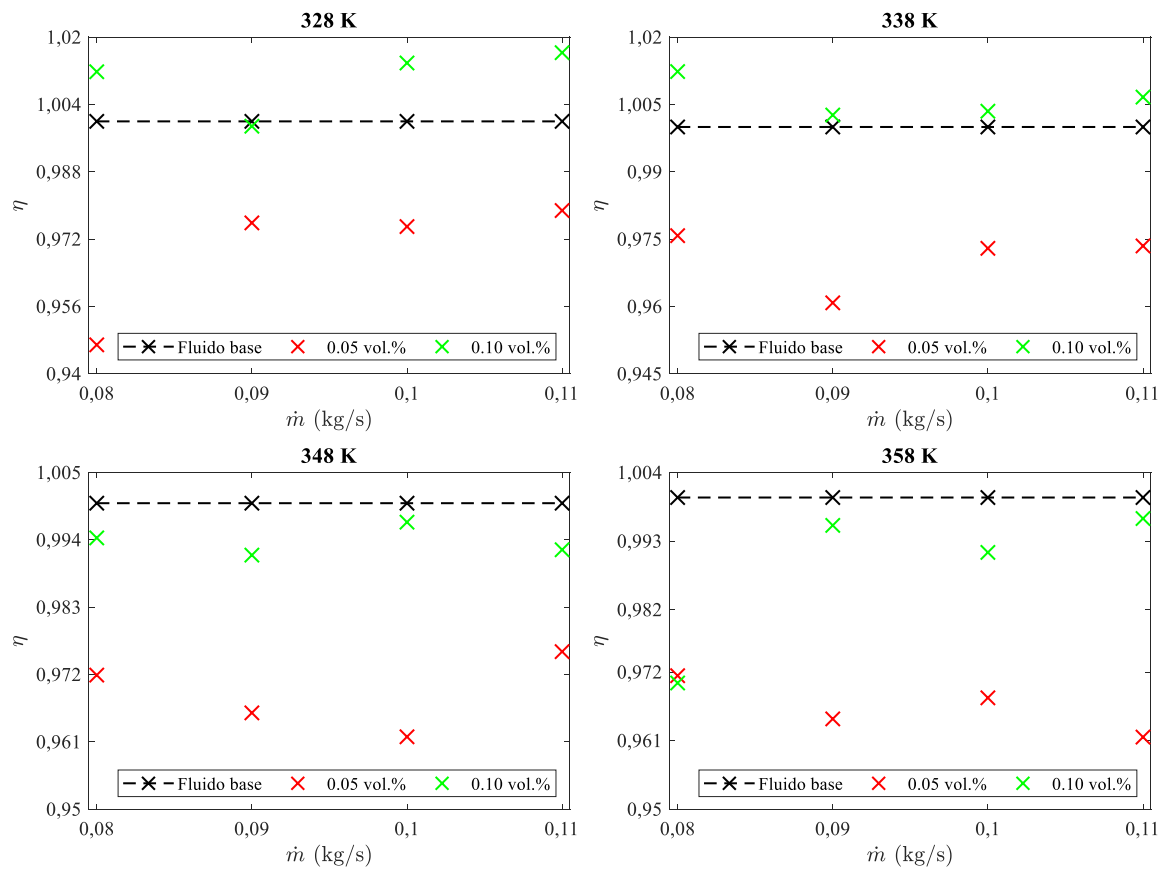


Figura 2.6 - Desempenho termohidráulico dos nanofluidos analisados. Fonte: Adaptado de Contreras *et al.* (2019)

Said *et al.* (2019) realizaram um estudo sobre a aplicação de nanofluidos de  $\text{TiO}_2$  e de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,05 e 0,3 vol.%) em um radiador automotivo de 36 tubos. Foi identificado um aumento de até 24,21% para a maior concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em relação ao fluido base (água-EG). Além disso, o critério de avaliação de desempenho (razão entre os ganhos térmicos e hidráulicos) para todos os nanofluidos foi superior a 1, cujo valor máximo foi de 1,31, ou seja, apresentaram ganhos térmicos superiores ao incremento da potência de bombeamento. A viscosidade e a densidade dos nanofluidos de  $\text{TiO}_2$  apresentaram valores maiores que os nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , além de terem menores incrementos na condutividade térmica.

Kumar e Sahoo (2019) apresentaram um estudo sobre a aplicação de nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -água em um radiador automotivo com aletas onduladas, cujas nanopartículas apresentam diferentes formatos (esférico, plaquetas e retangular). Foi observado que para a vazão de 5 a 30 L/min, as nanopartículas esféricas apresentaram eficácia de 21,9% e 18,2% maior que as



nanopartículas de plaquetas e retangulares, respectivamente. Para todos os parâmetros operacionais analisados, o nanofluido com nanopartículas esféricas apresentou resultados melhores do que as demais nanopartículas. Além disso, foi identificado o valor ótimo de geração de entropia para a vazão de 13 L/min para a faixa estudada, o qual tende a diminuir após este valor.

Soylu *et al.* (2019) analisaram a transferência de calor dos nanofluidos de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  dopado com 0,1% de Ag,  $\text{TiO}_2$  dopado com 0,3% de Ag,  $\text{TiO}_2$  dopado com 0,1% de Cu e do fluido base água-EG (50:50) com concentrações volumétricas de 0,3, 0,5, 1 e 2%. Dentre as amostras analisadas, observou-se um aumento de até 11,094% do coeficiente global de transferência de calor para o nanofluido de  $\text{TiO}_2$  dopado com 0,3% de Ag na concentração volumétrica máxima. Além disso, identificou-se um incremento do coeficiente convectivo de transferência de calor em até 27,72%.

Chaurasia *et al.* (2019) avaliaram a performance de nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /água destilada em um radiador automotivo como fluido refrigerante para concentrações volumétricas de 0 a 0,2%, vazão de 40 a 100 L/h e temperatura de entrada 318 K a 343 K. Eles verificaram um aumento na taxa de transferência de calor de até 44,29% para a maior concentração em relação ao fluido base, bem como um aumento da efetividade de 40,3% para a vazão 40 L/h. Além disso, o estudo mostrou que a transferência de calor aumentou com o acréscimo da vazão do líquido de arrefecimento e do ar.

Elsaid (2019) realizou um estudo sobre a influência da concentração (0,02 a 0,2 vol.%) e tipo de nanopartículas ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ), temperatura de entrada (323 K a 363 K) e vazão mássica (0,05 a 0,2 kg/s) de nanofluidos com três tipos de fluido base (EG/água 0:100, 10:90 e 20:80) em um radiador automotivo. Os resultados indicaram que os nanofluidos de óxido de cobalto apresentaram melhores resultados que os de alumina. Os melhores desempenhos termohidráulico dos nanofluidos foram observados para as menores concentrações e maiores números de Reynolds. Além disso, observou-se que a adição de etilenoglicol tende a diminuir o número de Nusselt e aumentar a potência de bombeamento, quando comparada a água pura.

Akash *et al.* (2019a) avaliaram o desempenho termohidráulico de nanofluidos de cobre, alumínio e MWCNT na concentração volumétrica de 0,3% em um radiador automotivo de 33 tubos em regime laminar. Foi observado um aumento de 40%, 29% e 25% no coeficiente global de transferência de calor para os nanofluidos de MWCNT, cobre e alumínio, respectivamente. Contudo, para o nanofluido de MWCNT, foi identificado o maior aumento na queda de pressão

em relação ao fluido base, cujos ganhos são mais proeminentes conforme se aumenta a vazão do líquido de arrefecimento.

Akash *et al.* (2019b) realizaram a avaliação do desempenho térmico e hidráulico de nanofluidos de grafite/EG-água em um radiador automotivo com uma concentração de 0,1% em peso. Foi detectado que o aumento máximo do coeficiente global de transferência de calor foi de 10,5% para as vazões mais baixas de ar (360 kg/h) e líquido refrigerante (500 kg/h). Além disso, identificou-se o aumento de 3,8% na condutividade térmica do fluido base com o aumento da temperatura, enquanto para o nanofluido, esse aumento foi 13% maior.

Khan *et al.* (2019) produziram nanofluidos de ZnO/EG-água (0,01 - 0,04 vol.%) para avaliar a transferência de calor em um radiador automotivo de 36 tubos em regime turbulento. Foi observado um aumento do coeficiente global de transferência de calor e da taxa de transferência de calor em relação ao aumento da concentração de nanopartículas para um vazão de 4 - 12 L/min. O aumento máximo da taxa de transferência de calor foi de 36% para a amostra com a maior concentração de nanopartículas. Além disso, foram realizados novamente os testes com o mesmo nanofluido com concentração de 0,01% 6 dias após o primeiro teste. Foi observado o decréscimo na taxa de transferência de calor em até 4%, contudo, dentro da faixa de incerteza de 5,3%.

Zhou *et al.* (2019) analisaram o desempenho de nanofluidos de ZnO,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à base de propilenoglicol para concentrações volumétricas de 0,1 – 0,5 vol.%, vazão de 10 – 15 L/min e temperatura de entrada de 313 – 333 K. Identificou-se que o nanofluido de ZnO apresentou um aumento de 122,6% do coeficiente convectivo de transferência de calor para a concentração volumétrica de 0,2%, conquanto, de 0,3 – 0,5 vol.% ocorreu uma redução de 25,6% desse parâmetro. Além disso, o aumento da temperatura de entrada do nanofluido de ZnO com concentração volumétrica de 0,2% de 313 K para 333 K resultou em um aumento do coeficiente convectivo de transferência de calor de 46,4%.

Ramadhan *et al.* (2020) realizaram um estudo sobre a aplicação de nanofluidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/EG-água em um radiador automotivo de 32 tubos sob ação de um fluxo de ar cruzado. Foram utilizados nanofluidos com concentrações volumétricas de 0,05 a 0,3% para uma faixa de vazão de 2 a 12 L/min e temperatura de entrada de 343 K, enquanto a velocidade do ar foi mantida constante em 4 m/s. Foi observado o aumento do coeficiente convectivo de transferência de calor com a adição das nanopartículas, com incremento máximo de 39,7%, enquanto o número de Nusselt apresentou aumento de 45%.

Qasim *et al.* (2020) avaliaram o aprimoramento da transferência de calor e o comportamento hidráulico de nanofluidos de ZnO/água em um radiador automotivo para concentrações volumétricas de 0 a 0,3% de nanopartículas. Nos testes foram consideradas condições em regime laminar (186 - 1127) e temperatura de entrada constante em 343 K. Foram observados aumentos de até 41%, 50% e 31% na taxa de transferência de calor, no coeficiente global de transferência de calor e no número de Nusselt, respectivamente, para a concentração volumétrica de 0,2% de nanopartículas de ZnO. No entanto, também foi observada a redução dos incrementos desses parâmetros no aumento da concentração após 0,2%. Na análise hidráulica foi identificado o aumento de 66,54% da queda de pressão em relação ao fluido base.

Topuz *et al.* (2020) investigaram experimentalmente a transferência de calor e a queda de pressão de nanofluidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/EG-água com concentração volumétrica de 0,5% em um radiador automotivo de 34 tubos. Nos testes foi mantida a temperatura de entrada do líquido de arrefecimento constante a 368 K, e a vazão variando entre 10 e 25 L/min sob a ação de uma vazão de ar com velocidade variando entre 1,7 e 4,3 m/s. Os resultados obtidos indicaram um aumento de até 15% da taxa de transferência de calor com a utilização de nanopartículas. Além disso, o número de Nusselt apresentou aumento de até 18% em relação ao fluido base.

Asokan *et al.* (2020) avaliaram as propriedades termofísicas e o desempenho térmico de nanofluidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CuO/EG-água destilada em concentrações volumétricas de nanopartículas de 0,02 – 0,06% em um radiador automotivo com 70 tubos em regime laminar. Foi identificado que a condutividade térmica dos nanofluidos híbridos apresenta ganhos superiores ao fluido base e às outras nanopartículas analisadas. Além disso, ocorreu um incremento de até 23,2%, 17,9% e 6,7% no número de Nusselt para o nanofluido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO em relação ao fluido base, o nanofluido de CuO e o nanofluido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, respectivamente.

Shah *et al.* (2020) realizaram um estudo da transferência de calor de nanofluidos de SiO<sub>2</sub>/água em um radiador automotivo com concentrações volumétricas de 0,04 a 0,12%, temperatura de entrada de 333 K a 343 K e vazão 12 a 18 L/min. O trocador de calor consiste em 31 tubos planos com aletas venezianas. Dentre as amostras analisadas foi observado um aumento de 36,92% e 45,53% na taxa de transferência de calor e no número de Nusselt, respectivamente, para a temperatura de entrada de 343 K, vazão de 18 L/min e concentração volumétrica de 0,12%. No entanto, para foram identificadas aglomerações e formações de clusters, devido ao aumento da quantidade de nanopartículas.

Tafakhori *et al.* (2020) sintetizaram nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  em água com concentrações volumétricas variando de 0 a 0,9% e realizaram testes para avaliar seu desempenho termohidráulico em um radiador automotivo. Através deste estudo, observou-se que os nanofluidos de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /água com concentração de 0,1 vol.% aumentaram a troca de calor em média 21% em relação ao fluido base para a faixa de temperatura de 72 a 88 °C. Além disso, concentrações acima desta, podem levar a aglomeração de nanopartículas e o número de Reynolds pode reduzir a taxa de transferência de calor. Ao analisar a influência da velocidade do ventilador do radiador, percebeu-se que a temperatura do líquido de arrefecimento diminuiu com o aumento da velocidade do ventilador de 1000 para 2500 rpm, tendo seu efeito atenuado para temperaturas acima de 80 °C e velocidades entre 2000 e 2500 rpm.

Ijaz *et al.* (2020) realizaram um estudo utilizando o programa Ansys Fluent para analisar o desempenho de radiadores automotivos utilizando nanofluidos de óxido de grafeno/água (6 - 10 vol.%). Foi observado o decaimento da temperatura na saída do radiador em função da concentração volumétrica de nanopartículas, além disso, ocorreu o aumento da efetividade em até 97,49% quando se utiliza o nanofluido na maior concentração de nanopartículas.

Naveen e Kishore (2020) compararam a transferência de calor de nanofluidos de grafeno/água-EG com concentrações volumétricas de 0,1 – 0,3% com o fluido base em um radiador automotivo. Para a faixa de vazão de 2 – 8 L/min e de temperatura de entrada de 323 – 343 K, ocorreu o aumento de até 68,04% da taxa de transferência de calor para a maior concentração de nanopartículas e vazão, cujo coeficiente de transferência de calor apresentou incremento de até 66,22% e número de Nusselt superior em 53,4% para a mais alta vazão.

Rai *et al.* (2020) realizaram um estudo sobre a taxa de transferência de calor de nanofluidos de MgO/EG-água destilada (40:60) em um radiador automotivo, cujas concentrações variaram de 0 – 0,2%, nos quais foram preparados pelo método de duas etapas. Observou-se que a adição 0,2 vol.% de nanopartículas de MgO para a temperatura de entrada de 313 K aumentou a taxa de transferência de calor em até 29,83%. Contudo, os incrementos tendem a diminuir com o aumento da concentração de nanopartículas no fluido base e a temperatura de entrada.

Shankara *et al.* (2020) analisaram o comportamento térmico de nanofluidos mono e híbridos (grafeno/água deionizada e MWCNT-CuO/água deionizada) em um radiador automotivo de 40 tubos. Foram utilizados nanofluidos com concentrações de 0,05 – 0,15 wt.%, vazões de 3 – 7 L/min e temperatura de entrada de 323 – 353 K. Foi identificado um aumento

de até 295% do número de Nusselt para o nanofluido híbrido com a concentração de 0,1 wt.%, vazão de 7 L/min e temperatura de entrada de 353 K. Além disso, o número de Nusselt do nanofluido de MWCNT-CuO pode ser até 30% maior do que o do nanofluido de grafeno.

Muruganandam e Kumar (2020) realizaram um estudo experimental sobre a aplicação de nanofluidos de MWCNT/água em um radiador automotivo. Foram preparados nanofluidos com concentrações volumétricas de 0,1 – 0,5% com a adição do surfactante dodecil butano sulfonato de sódio. Identificou-se que o nanofluido com a concentração de 0,3 vol.% apresentou estabilidade satisfatória 45 dias após o preparo. Além disso, verificou-se que, para a maior concentração de nanopartículas de MWCNT, a eficiência mecânica aumenta em até 14%, enquanto o consumo de combustível reduz em até 16%.

Kocheril e Elias (2020) verificaram o desempenho de um motor de combustão interna resfriado por um radiador com nanofluidos de ferro magnético/água em concentrações de 1 – 6%. Para uma velocidade constante de 40 km/h, o uso do nanofluido com concentração volumétrica de 5% resultou em um aumento de 11% da distância percorrida em comparação ao fluido base. Conquanto, para a concentração de 6%, o desempenho diminuiu devido ao aumento na bomba de resfriamento.

Ramalingam *et al.* (2020a) avaliaram o desempenho de nanofluidos híbridos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-carbeto de silício/EG-água (50:50 vol.%) em um radiador automotivo com concentrações volumétricas de 0,4 – 0,8%. Foram observados aumentos de até 28,34% no desempenho térmico geral usando nanofluidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-carbeto de silício/EG-água na concentração de 0,8 vol.%. Além disso, o número de Nusselt apresentou aumento com o incremento de nanopartículas, cujo ganho para a concentração de 0,4% e 0,8% foi de 8,98% e 23,46%, respectivamente.

Ramalingam *et al.* (2020b) analisaram de forma experimental e estatística a influência do tamanho (24 e 110 nm) e da concentração volumétrica (1 - 3%) das partículas de carboneto de silício (SiC) no desempenho térmico de um radiador automotivo. Foi identificado que as nanopartículas com menor tamanho apresentam melhores resultados que as partículas de maior tamanho, pois foram observados aumentos de até 23% na condutividade térmica do nanofluido com tamanho de 24 nm em comparação com a amostra com partículas de 110 nm. Além disso, o coeficiente convectivo de transferência de calor demonstrou ser até 28% superior em comparação ao nanofluido com nanopartícula de tamanho de 110 nm e ao fluido.

Benedict *et al.* (2020) realizaram um estudo de nanofluidos mono e híbridos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -nanocelulose em concentrações volumétricas de 0,1 -0,9% em um radiador automotivo. Para a faixa de temperatura analisada (283 – 333 K), observou-se um ganho máximo de 3,51% na condutividade térmica. Além disso, verificou-se que a concentração ótima entre os casos analisados é de 0,5 vol.%. O nanofluido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -nanocelulose apresenta um coeficiente convectivo de transferência de calor até 15% maior do que a nanocelulose e até 50% maior do que a mistura EG-água (60:40).

Satyaprasad *et al.* (2020) verificaram experimentalmente o desempenho de nanofluidos híbridos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC/EG-água em um radiador automotivo de 48 tubos. Foram consideradas concentrações volumétricas de nanopartículas de 0 – 0,3%, vazões de 3 – 12 L/min e temperatura de entrada de 333 K a 363 K. Foi identificado um aumento de até 21% no número de Nusselt para o nanofluido com concentração volumétrica de 0,3% e vazão de 12 L/min em relação ao fluido base. Além disso, o número de Nusselt tende a aumentar com o incremento da temperatura de entrada do líquido de arrefecimento dentro da faixa de temperatura analisada.

Sathish *et al.* (2020) avaliaram a utilização de nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -óxido de cério (0,2 – 1 vol.%) em um radiador automotivo com vazões mássicas de 0,02 – 0,1 kg/s e temperatura de entrada constante a 333 K. Identificou-se um aumento do coeficiente de transferência de calor convectivo com o incremento da vazão mássica. Além disso, a adição de nanopartículas influencia de forma diretamente proporcional no coeficiente de transferência de calor convectivo. Para a maior concentração de nanopartículas e vazão mássica, foi encontrado o maior valor do coeficiente de transferência de calor convectivo.

Sahoo (2020a) avaliou a transferência de calor de nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -CNT-grafeno/água em um radiador automotivo de tubo plano em regime turbulento para as concentrações volumétricas de 1 – 3%. Foi identificado um aumento de até 22,34% na taxa de transferência de calor com o uso de nanofluidos com a concentração de 3 vol.% e vazão de 10 L/min. Sahoo (2020b) novamente analisou nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -CNT-grafeno/água em um radiador automotivo. Foram observados aumentos de até 18,45% na taxa de transferência de calor para a faixa de concentração volumétrica de 1 – 3%. Contudo, a queda de pressão apresentou aumento gradual com a inserção das nanopartículas, vazão e mudança na velocidade do ar, cujos aumentos correspondem a 50%, 60% e 25%, respectivamente.

Li *et al.* (2021) também avaliaram nanofluidos híbridos, porém, de SiC-MWCNTs como fluido refrigerante para radiadores automotivos. Os nanofluidos apresentaram um aumento

máximo de 32,01% na condutividade térmica em relação ao fluido base para uma concentração volumétrica de 0,4%. Destaca-se ainda que os fluidos apresentaram comportamento newtoniano. A viscosidade apresentou aumento com a adição de nanopartículas, conquanto, esse aumento diminuiu com o incremento da temperatura. Com relação ao coeficiente convectivo, foi identificado que o incremento máximo foi de 26% em comparação com o fluido base.

Faraj *et al.* (2021) apresentaram uma modelagem e um método semi-empírico do coeficiente de transferência de calor em função do número de Reynolds para números de Prandtl que não apresentem grandes variações em um radiador automotivo, utilizando água como fluido de arrefecimento. O método é uma técnica iterativa para uma ampla faixa de vazões que variam de 1500 a 9000 L/h. O método foi validado com dados experimentais de um trocador de calor automotivo, cujo erro relativo foi inferior a 1,6%.

Ponangi *et al.* (2021) analisaram o uso de nanofluidos de óxido de grafeno reduzido/EG-água em concentrações volumétricas ultrabaixas (0,002 – 0,006%) em um radiador automotivo em regime laminar (número de Reynolds de 80 - 170) e temperatura de entrada de 313 K a 333 K. Foi identificado um aumento de até 100,5% e 111% no coeficiente convectivo de transferência de calor e na efetividade do trocador de calor em relação ao fluido base. Além disso, observou-se uma redução de até 12% no fator de atrito ao utilizar o nanofluido com concentração de 0,002 vol.% em relação à mistura EG-água.

Zubair *et al.* (2021) verificaram o uso de nanofluidos de TiO<sub>2</sub>/água-EG (75:25) em um radiador automotivo de sessenta tubos sob a ação de um fluxo de ar promovido por um ventilador. Para um vazão volumétrica do líquido de arrefecimento de 30 - 180 L/h, pôde-se observar um aumento máximo de 29,5% na taxa de transferência de calor para a concentração volumétrica de 0,03% de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> e vazão volumétrica de 150 L/h em relação ao fluido base nas mesmas condições. Além disso, foi identificado a redução do desempenho térmico com o aumento da vazão após 150 L/h devido ao menor tempo para o líquido de arrefecimento realizar a troca de calor devido à alta vazão.

Kaladgi *et al.* (2021) investigaram a performance térmica de nanofluidos de ZnO/polietilenoglicol com concentrações volumétricas de 0,2 – 0,6% em um radiador automotivo em regime laminar (número de Reynolds de 400 - 1200) através das técnicas de Análise Relacional Grey (GRA, do inglês Grey Relational Analysis) e de Metodologia de Superfície de Resposta (RSM, do inglês Response Surface Methodology). Identificou-se um

aumento de até 24,93% no número de Nusselt ao utilizar o nanofluido com a maior concentração quando comparado à água. Conquanto, também foi observado um aumento na potência de bombeamento devido ao fato de que a inserção de nanopartículas aumenta a viscosidade do líquido de arrefecimento.

Kumar *et al.* (2021c) avaliaram o desempenho de nanofluidos de trióxido de tungstênio/água com concentrações volumétricas de 0,0167 – 0,00667% em um radiador automotivo em regime laminar, temperatura e vazão de 323 K e 0,2 – 0,5 m<sup>3</sup>/h, respectivamente. Foi identificado um aumento máximo de 4,18% na taxa de transferência de calor para o nanofluido com concentração volumétrica de 0,00667% quando comparado com o fluido base. Além disso, observou-se que o aumento da vazão tende a aumentar a temperatura de saída do nanofluido, pois o fluido refrigerante passa a ter menos tempo para trocar calor com o ar circundante, conforme também foi observado por Zubair *et al.* (2021).

Dhairiyasamy *et al.* (2021) realizaram um estudo experimental e estatístico sobre a adição de nanopartículas de prata em diferentes tamanhos (20 – 100 nm) em EG-água deionizada. Os nanofluidos foram preparados para avaliar o desempenho de um radiador automotivo de 42 tubos em regime laminar. Foi identificado que quanto menor o tamanho da nanopartícula, maiores são os incrementos nas propriedades termofísicas. Além disso, o número de Nusselt do nanofluido com nanopartículas do tamanho de 20 nm foi até 42% maior que o fluido base enquanto o nanofluido com nanopartículas de 100 nm foi até 14% maior.

Maghrabie e Mousa (2021) avaliaram o desempenho térmico de nanofluidos de SiO<sub>2</sub>/água e ZnO/água em um radiador automotivo de 33 tubos com concentração de 5 wt.% em regime turbulento. Esses nanofluidos foram testados para a faixa de vazão de 3,5 – 6,5 L/min e temperatura de entrada de 318 – 353 K. Foi identificado que, para a condição de trabalho analisada, a temperatura de entrada do líquido de arrefecimento apresenta maior influência na transferência de calor do que a vazão. Além disso, a efetividade do trocador de calor aumentou em até 13,9% e 16% com os nanofluidos de SiO<sub>2</sub>/água e ZnO/água, respectivamente, em relação ao fluido base.

Abbas *et al.* (2021) realizaram um estudo da aplicação de nanofluidos híbridos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>/água em um radiador automotivo de alumínio. Foram testadas amostras com concentrações de 0,005 - 0,009 vol.% de nanopartículas, temperaturas de entrada de 321 – 329 K e vazões de 11 – 15 L/min. Foi identificado o aumento da taxa de transferência de calor em até 26,7% em relação ao fluido base para a temperatura e vazão de entrada de 329 K e 15 L/min



e concentração de nanopartículas de 0,009 vol.%, além disso, ocorreu o incremento do número de Nusselt em até 20,03% para as mesmas condições de trabalho. Adicionalmente foram feitos testes de repetibilidade desses nanofluidos no mesmo trocador de calor após 12 horas. Foi observada diferença máxima de apenas 3% no desempenho térmico em relação ao teste inicial.

Efemwenkiewie *et al.* (2021) investigaram o desempenho de nanofluidos com nanopartículas de Mg, Al e Mg-Al em um radiador automotivo sob a vazão constante de 0,4 kg/s. Foram utilizados dois fluidos bases (água destilada e EG-água destilada) para a preparação dos nanofluidos, nos quais tiveram concentrações volumétricas de 0 – 1%, além da presença de extrato de maçã Malaia. Verificou-se um aumento máximo no número de Nusselt de 13,9%, 306,7% e 493,9% para os nanofluidos de Mg/água destilada, Mg-Al/água destilada e Al/EG-água destilada, respectivamente, em relação ao fluido base. Esses incrementos são superiores à maioria dos trabalhos que utilizaram o mesmo tipo de nanopartícula. Essa diferença pode estar intimamente ligada à presença do extrato de maçã Malaia.

Erdoğan *et al.* (2021) avaliaram o desempenho termohidráulico do nanofluido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /EG-água em um radiador automotivo de 34 tubos com a concentração volumétrica de 0,5%, vazão de 10 – 20 L/min e temperatura de entrada constante de 368 K, enquanto a velocidade do ar foi configurada para 4 e 5 m/s. Foi observado um aumento da taxa de transferência de calor em até 9,5% com a utilização do nanofluido com vazão de 10 L/min e velocidade do ar de 4 m/s. Apesar do aumento da potência de bombeamento com o incremento de nanopartículas, o coeficiente de desempenho termohidráulico apresentou um valor 18,8% superior ao fluido base.

Sundari *et al.* (2021) analisaram a aplicação de nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /glicerina em um trocador de calor automotivo sob a ação de fluxo de calor constante em concentrações volumétricas de até 0,3%. Foram observados aumentos de até 54,56% na transferência de calor para a maior concentração de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Além disso, a eficiência do trocador de calor diminuiu com o aumento do número de Reynolds, cujo valor máximo foi de 0,972. Mert *et al.* (2021) também analisaram nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em um radiador automotivo, porém, utilizando uma mistura binária de água e etilenoglicol como fluido base (50:50 vol.%) e com concentração volumétrica de nanopartículas de 0,5%. Para a temperatura de entrada e vazão do líquido de arrefecimento de 368 K e 10 – 25 L/min, temperatura e velocidade do ar variando de 296,4 – 301,6 K e 1,7 – 4,3 m/s, respectivamente, foi possível observar um aumento máximo

de 17,46% na taxa de transferência de calor para a menor vazão do líquido de arrefecimento e velocidade do ar.

Oliveira *et al.* (2021) avaliaram a condutividade térmica e viscosidade dinâmica de nanofluidos de nanotubos de paredes múltiplas (MWCNT) e de grafeno com concentrações volumétricas de 0,025 - 0,15% para aplicações em radiadores automotivos. Os autores identificaram a viabilidade do uso de nanofluidos como fluido refrigerante alternativo em trocadores de calor. Os resultados obtidos apresentaram um incremento da condutividade térmica do fluido base de até 5,9% quando foi dispersa a concentração de 0,1% de nanopartículas de grafeno. Contreras e Bandarra Filho (2022) realizaram o estudo do desempenho térmico de nanofluidos de MWCNT/água-EG como líquido de arrefecimento em um radiador automotivo de passo duplo. Foram analisadas amostras com concentrações volumétricas de 0,025 – 0,1%, vazões de 0,09 – 0,11 kg/s e temperatura de entrada de 358 – 378 K. Pôde-se observar ganhos de até 4,6% para a taxa de transferência de calor e de 4,4% para o coeficiente global de transferência de calor, ambos para a maior concentração volumétrica de MWCNT. Além disso, os autores reavaliaram a estabilidade dos nanofluidos após os testes, e identificaram alta aglomeração e sedimentação.

Sivalingam *et al.* (2022) aplicaram os métodos de avaliação da relação aditiva (ARAS, do inglês, Additive Ratio ASsessment) e Combinative Distance-based ASsessment (CODAS) para a predição do desempenho termohidráulico de nanofluidos de MWCNT/água-glicol em concentrações volumétricas de 0,2 – 0,6%, vazões de 30 – 90 g/s e temperatura de entrada de 323 – 343 K. As propriedades termofísicas dos fluidos refrigerantes (densidade, calor específico e viscosidade) foram medidas experimentalmente. Foi identificado que, para a concentração volumétrica de 0,2%, vazão de 90 g/s e temperatura de entrada de 343 K, apresenta melhor relação de ganhos no número de Nusselt e fator de atrito. Além disso, foi observado um aumento de até 18,39% no número de Nusselt para a concentração volumétrica de 0,6% de MWCNT, vazão de 90 g/s e temperatura de entrada de 343 K.

Shankara *et al.* (2022) analisaram a aplicabilidade de nanofluidos de óxido de grafeno/EG-água deionizada (60:40, 30:70 e 20:80) em um radiador automotivo, com a concentração de 0,1 wt.%, vazão de 180 – 420 L/h e temperatura de entrada de 363 K. O nanofluido com o fluido base na proporção 60:40 apresentou o melhor desempenho dentre as amostras analisadas. A transferência de calor apresentou aumento de até 71,1% para a vazão de 240 L/h, enquanto o número de Nusselt máximo alcançado foi de 192 para a maior vazão.

Elibol *et al.* (2022) realizaram um estudo experimental sobre a aplicação de nanofluidos de  $\text{TiO}_2/\text{água}$  em um radiador automotivo de um veículo pesado real com concentrações volumétricas de 0,025 – 0,2%, temperatura de entrada na faixa de 313 – 353 K e vazão de 5 – 11 L/min, enquanto o ar foi mantido a velocidade constante de 2,77 m/s. Identificou-se que, dentre as amostras analisadas, o nanofluido com concentração de 0,05 vol.%, vazão de 11 L/min e temperatura de entrada de 353 K apresentou o maior incremento na transferência de calor em relação ao fluido base. Foram observados aumentos máximos de 22,2%, 48,1% e 48,2% na taxa de transferência de calor, no número de Nusselt e no coeficiente convectivo de transferência de calor em relação ao fluido base.

Honnappa *et al.* (2022) investigaram a utilização de nanofluidos híbridos de grafeno-óxido de grafeno/água em um mini radiador automotivo com concentrações volumétricas de 0,2 – 0,4% e vazões de 700 – 900 mL/min para diferentes velocidades do ar. Para a maior concentração de nanopartículas e vazão, foi identificado o aumento do número de Nusselt de 25 para 52, representando um ganho de 108%. Além disso, observou-se que, para a faixa estudada, a velocidade do ar tem baixa influência na queda de pressão, contudo, tende a aumentar com a inserção de nanopartículas.

Kumar e Sahoo (2022a) avaliaram o desempenho de um radiador automotivo a 50% de carga no motor com a utilização de nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO-TiO}_2/\text{água}$  em concentrações volumétricas de 0,06 – 0,12% e faixa de vazão de 3 – 8 L/min em regime laminar, enquanto o ar foi mantido a uma velocidade que foi variada em 0,25 – 1,25 m/s. Verificou-se o aumento de até 17,6% na taxa de transferência de calor para o nanofluido com a maior concentração de nanopartículas e vazão de 6 L/min. Além disso, também foi observada a redução do consumo de combustível em até 13,54%. Kumar e Sahoo (2022b) novamente avaliaram os nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO-TiO}_2/\text{água}$  nas mesmas condições de trabalho, em que foi possível verificar que com concentração de 0,12% e vazão de 6 L/min, identificou-se o aumento de 14,2% na taxa de transferência de calor em relação ao fluido base, conquanto, o fator de atrito apresentou incremento de até 26% em relação à água. Além disso, observou-se que o coeficiente de desempenho termohidráulico foi sempre superior a 1, cujos valores ficaram na faixa de 1,0045 – 1,098, indicando resultados promissores na utilização em radiadores automotivos.

Chandrasekaran *et al.* (2022) produziram nanofluidos de óxido de cério/água com concentrações volumétricas de 1 - 2% para avaliar seus desempenhos em um radiador automotivo como líquido de arrefecimento, para vazões de 0,04 – 0,09 kg/s e temperatura de

entrada de 363 K. Foi identificado o aumento de até 6,2% na taxa de transferência de calor para o nanofluido com a maior concentração de nanopartículas e vazão mássica. Além disso, observou-se a redução na temperatura de saída do líquido de arrefecimento com o aumento da vazão mássica.

Ahmad *et al.* (2022) prepararam nanofluidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{água}$  e  $\text{ZnO}/\text{água}$  em um radiador automotivo de 40 tubos com as vazões de 7,8 – 13,8 L/min e concentrações volumétricas de nanopartículas de 0 – 0,2%. Observou-se que o coeficiente de desempenho termohidráulico do nanofluido de  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{água}$  é 34% maior do que o do nanofluidos de  $\text{ZnO}/\text{água}$  para a concentração máxima e vazão de 11,4 L/min. Além disso, identificou-se que o nanofluido de  $\text{ZnO}$  apresentou maior aumento na queda de pressão do que o nanofluido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  devido à da inserção das nanopartículas.

Dhairiyasamy *et al.* (2022) avaliaram o desempenho de nanofluidos híbridos de  $\text{SiC}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{água}$  e  $\text{SiC}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$  em concentrações volumétricas de 0,1 e 0,2% em um radiador automotivo de 42 tubos em regime laminar, vazão de 13 – 65 g/s e temperatura de entrada de 348 K, enquanto a velocidade do ar foi variada entre 1 – 5 m/s. Identificou-se que o nanofluido com concentração de 0,2 vol.% apresentou aumento de 2,8% no número de Nusselt, conquanto, a adição de nanopartículas na maior concentração resultou no incremento de até 12% no fator de atrito.

Yıldız *et al.* (2022) realizaram o estudo numérico do desempenho termohidráulico de nanofluidos com quatro nanopartículas diferentes ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ ) em um radiador automotivo para concentrações volumétricas de 0,1 – 1%, número de Reynolds de 9350 – 23000 e diferentes fluidos base (EG-água 20:80, 40:60, 60:40 e água). Foi observada melhoria de até 45,9% da transferência de calor, contudo, também foi observado o aumento da queda de pressão com a inserção de nanopartículas. Desta forma, o nanofluido de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  com a concentração volumétrica de 0,3% e número de Reynolds de 9350 apresentou-se como opção mais adequada considerando os ganhos térmicos e hidráulicos. Além disso, detectou-se que o radiador poderia ser reduzido em até 10,8% com a utilização de nanofluidos.

Shah *et al.* (2022) avaliaram o potencial de nanofluidos de  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{água}$  em um radiador automotivo com concentrações volumétricas de 0,003 – 0,007%, temperatura de entrada de 318 – 328 K e vazão de 10 e 14 L/min. Observou-se o aumento da taxa de transferência de calor em até 21,89% para a concentração volumétrica de 0,007% em relação ao fluido base. Para esta mesma concentração, também foram identificados aumentos de 20,65%, 18,24% e 19,51% no

coeficiente convectivo de transferência de calor, número de Nusselt e coeficiente global de transferência de calor, respectivamente.

Ong *et al.* (2022) analisaram o desempenho térmico de nanofluidos de dióxido de silício/EG-água em um radiador automotivo. Foram utilizadas amostras com concentrações volumétricas de até 1%. Os resultados apresentaram um aumento da transferência de calor com o aumento da concentração de nanopartículas. Além disso, observou-se que o nanofluido com a maior concentração volumétrica de nanopartículas apresenta melhor desempenho térmico, pois necessita de menos tempo para atingir e manter a temperatura ideal de trabalho em relação aos outros fluidos analisados.

Xian *et al.* (2022) analisaram o desempenho de nanofluidos híbridos de grafeno funcionalizadas com carboxil (CGNP) e  $\text{TiO}_2$ , em um radiador automotivo com o fluido base de água/EG. Foi verificada a influência da quantidade de nanopartículas, número de Reynolds e velocidade de entrada do ar na performance do trocador de calor. Para o nanofluido com concentração em massa de 0,1% de CGNP- $\text{TiO}_2$  (70:30), foram observados os maiores incrementos, cujos ganhos para o número de Nusselt, coeficiente global de transferência de calor e a efetividade correspondem a 4,94%, 35,87% e 20,48%, respectivamente.

Arbak *et al.* (2023) prepararam nanofluidos híbridos de CuO-ZnO/água com concentrações de 0,1 – 0,3% para testá-los em um radiador automotivo com vazões de 0,16 – 2 L/min. O nanofluido com a maior concentração de nanopartículas apresentou incremento de até 41,1% no coeficiente global de transferência de calor para a maior vazão, quando comparado ao fluido base. Além disso, os autores puderam identificar com os dados obtidos que um sistema com a adição de nanopartículas, tende a se pagar em um período de 3,5 anos, com uma vida útil de 20 anos.

Kalantari *et al.* (2023) analisaram um trocador de calor automotivo de 34 tubos com nanofluido de  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ /água como líquido refrigerante em regime turbulento. Os nanofluidos foram preparados em concentrações volumétricas de 0 – 0,9% e operaram sob a faixa de temperatura de entrada de 300 – 361 K. A velocidade do ventilador do radiador automotivo foi variada entre 1500 e 2500 rpm. Identificou-se que, apesar do aumento da condutividade térmica com a inserção de nanopartículas, o nanofluido com a concentração de 0,1 vol.% temperatura de entrada de 345 K e velocidade do ventilador de 1500 rpm, apresentou o maior aumento (92,3%) no coeficiente global de transferência de calor em relação ao fluido base. Além disso, observou-se que, para este mesmo caso, o ganho térmico é 44,46% superior ao hidrodinâmico.

Afolalu *et al.* (2023) avaliaram experimentalmente a dispersão de sílica produzida a partir de cinzas de sabugo de milho como fluido de arrefecimento de um radiador automotivo sob a ação de um vazão de ar constante em 5,3 m/s. Foi identificado que as espigas de milho são constituídas principalmente por sílica, oxigênio e cálcio. Para a temperatura de entrada de 333 K e vazão mássica de 58,79 kg/min, o nanofluido com concentração de 0,0015% apresentou aumento de até 238,60% na taxa de transferência de calor em relação ao fluido base.

Kumar *et al.* (2023a) realizaram o estudo experimental do nanofluido híbridos de MWCNT-SiO<sub>2</sub>/EG-água com a concentração volumétrica de 0,1% em um radiador automotivo de 49 tubos em regime laminar sob a ação de um fluxo de ar cruzado. O nanofluido foi testado em vazões de 5 – 20 L/min, enquanto o ar escoava na faixa de velocidade de 1 – 6 m/s. Observou-se que a temperatura da parede diminuiu linearmente quando não foi utilizado o ventilador, enquanto na presença do equipamento, a diminuição ocorre de forma assintótica. Além disso, observou-se o aumento da queda de pressão com a inserção das nanopartículas, cujo incremento máximo foi de 6,32% para a menor vazão.

Kumar *et al.* (2023b) avaliaram as propriedades termofísicas e o comportamento termohidráulico de nanofluidos de carvão ativado/água destilada em um radiador automotivo em concentrações volumétricas de 0,1 – 0,4%. Para a faixa de vazão de 20 – 100 g/s e temperatura de 323 – 343 K pode-se observar que a utilização do nanofluido com a maior concentração, o número de Nusselt apresentou aumento de até 21,76, 24,71 e 32,47% para as temperaturas de entrada de 323 K, 333 K e 343 K, respectivamente. Além disso, obteve-se o aumento de até 9,134% na condutividade térmica com o incremento das nanopartículas.

Kumar *et al.* (2023c) realizaram um estudo experimental sobre nanofluidos híbridos de grafeno-nanotubos de carbono em um radiador automotivo. Os nanofluidos foram preparados através do método de funcionalização não covalente para amostras com concentração volumétrica de nanopartículas de 0,05%, 0,1%, 0,15%, 0,3%, 0,4% e 0,5%. O teste dos nanofluidos foram realizados para vazões de 20 – 100 g/s, três temperaturas de entrada (303 K, 323 K e 343 K) e velocidade do ar entre 1-5 m/s. Foi identificado o aumento da condutividade térmica do fluido de arrefecimento em até 59% em relação ao fluido base. O coeficiente convectivo de transferência de calor apresentou o aumento de até 124% para o nanofluido com maior concentração volumétrica de nanopartículas e velocidade do ar de 5 m/s, enquanto a queda de pressão teve aumento de apenas 23,72%.

Nascimento *et al.* (2024) avaliaram numericamente o desempenho dos nanofluidos de MWCNT analisados experimentalmente no trabalho de Contreras e Bandarra Filho (2022) em um radiador automotivo para altas temperaturas de operação (353 – 378 K). A análise numérica considerou efeitos comumente desprezados como a influência da temperatura local nas propriedades termofísicas, a condução de calor na parede do tubo e das aletas, e foi assumido que a condição de contorno térmica na região de parede não é constante. Foi identificado que para temperaturas de entrada próximas a de um automóvel real os ganhos obtidos na transferência de calor com nanofluidos de MWCNT tendem a ser próximos à incerteza de medição. O ganho máximo obtido com os nanofluidos foi de 4,70% em relação ao fluido base.

Na Tab. 2.4, está descrito o estado da arte de trabalhos numéricos sobre desempenho térmico e hidráulico de nanofluidos em radiadores automotivos para diferentes tipos e concentrações de nanopartículas e condições de teste. Foi identificado que grande parte dos trabalhos experimentais e numéricos sobre a aplicação de nanofluidos são realizados em radiadores automotivos para temperaturas de entrada de até 343 K. Além disso, são raros os trabalhos que fazem uma comparação de dados experimentais com resultados numéricos. Na maioria dos trabalhos são utilizadas nanopartículas de óxidos devido ao baixo custo financeiro, contudo, geralmente são necessárias altas concentrações de nanopartículas para identificar variações no desempenho térmico.

Tabela 2.4 - Trabalhos numéricos utilizando nanopartículas em radiadores

Autoria	Nanofluido	Concentração	Temperatura de entrada	Regime	Descobertas
Hussein <i>et al.</i> (2017)	TiO <sub>2</sub> /água	1 – 4 vol.%	333 – 363 K	Turbulento	Nu ↑ 18%
Alosious <i>et al.</i> (2017)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e CuO/água	0 – 1 vol.%	363 K	Laminar	h ↑ 13,2% e 16,4%
Hatami <i>et al.</i> (2017)	CuO, TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /EG CuO, TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /água	0 – 6 vol.%	353 K	Laminar	Nu ↑ TiO <sub>2</sub> > CuO > Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> > Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Tijani e Sudirman (2018)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e CuO/EG- água	0 – 0,3 vol.%	368 K	Turbulento	Nu ↑ 27,04% e 5,42%
Ganesan e Kannan (2018)	MWCNT- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG-DW	0,03 – 0,12 vol.%	313 – 348 K	-	Q ↑ 35%
Habibian <i>et al.</i> (2018)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CuO/água, EG-água	0,10 – 0,40 vol.%	358 K	-	Q ↑ 29,2%
Bharadwaj <i>et al.</i> (2018)	Carboxil grafeno - óxido de grafeno/RO-EG	1 – 3 vol. de cada	323 K	Laminar	T <sub>out</sub> ↓ 10,93 K
Khan e Ahmad (2019)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , ZnO e SiO <sub>2</sub> /água	0 – 2 vol.%	370 K	Turbulento	Q ↑ ZnO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> e SiO <sub>2</sub>



Buonomo <i>et al.</i> (2019)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água	0 – 6 vol.%	346 – 362 K	Turbulento	Q ↑ 1,5%
Kumar <i>et al.</i> (2020)	Cu, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e ZnO/EG-água	0,05 – 5 vol.%	368 K	Turbulento	h ↑ 42,5%, 47,4% e 51,1%
Ijaz <i>et al.</i> (2020)	GO/água	0 – 10 vol.%	368 K	Laminar	T <sub>out</sub> ↓ 9,68 K, 10,89 K e 11,9 K
Deriszadeh e Monte (2020)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água	0 – 4 vol.%	343 K	Laminar	h ↑ 40%
Hafeez <i>et al.</i> (2021)	TiO <sub>2</sub> , CuO e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água	0 – 0,2 vol.%	-	-	Nu ↑ 13,67%
Bejjam <i>et al.</i> (2021)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG	0 – 0,2 vol.%	368 K	Turbulento	Nu ↑ 10,64%
Kristiawan <i>et al.</i> (2021)	TiO <sub>2</sub> /água	0 – 5 vol.%	-	Laminar	Nu ↑ 7%
Gamal <i>et al.</i> (2021)	MgO e ZnO/EG-água	0 – 3 vol.%	353 K	Laminar	h ↑ 17,1%
Sandhya <i>et al.</i> (2021)	Grafeno-CNC/EG-água	0,01 – 0,2 vol.%	348 K	Turbulento	Q ↑ 60%
Yıldız <i>et al.</i> (2022)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CuO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e SiO <sub>2</sub> /EG-água e água	0,1 – 1 vol.%	313 K	Turbulento	Q ↑ 45,9%
Ghimire <i>et al.</i> (2022)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG-água	0 – 3 vol.%	348 – 368 K	Laminar e turbulento	Nu ↑ 250%

Oyedepo <i>et al.</i> (2022)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água	0 – 4 vol.%	350 K	Turbulento	Q ↑ 12,03%
Kumar <i>et al.</i> (2022)	CuO-SiO <sub>2</sub> /DW	0 – 0,5 vol.%	358 K	Turbulento	Nu ↑ 48,24%
Neves <i>et al.</i> (2022)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água e TiO <sub>2</sub> /água	0 – 10 vol.%	363 K	Turbulento	Nu ↑ 32,7%
Yaw <i>et al.</i> (2023)	GNP-CNC/EG- água	0,2 vol.%	348 K	Turbulento	h ↑ 51,91%
Hajiakbari <i>et al.</i> (2024)	TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2 – 1 vol.%	358 K e 368 K	Turbulento	T <sub>out</sub> ↓ 6,8%
Nascimento <i>et al.</i> (2024)	MWCNT/EG-água	0 – 0,1 vol.%	353 – 378 K	Laminar	Q ↑ 4,7%
Presente trabalho	Grafeno/EG-água	0 – 0,5 vol.%	328 – 358 K	Laminar	Q ↑ 47,3%

---

## CAPÍTULO III

### ABORDAGEM NUMÉRICA

#### 3.1 Formulação do problema

O radiador modelado possui 31 tubos planos organizados em dois passos (15 e 16 no primeiro e segundo passo, respectivamente), cuja configuração está ilustrada na Fig. 3.1 e descrita na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros do radiador

Parâmetro	Valor
Espessura da aleta	0,08 mm
Espaço entre as aletas	1,1 mm
Número de aletas	364
Comprimento do tubo	429 mm
Material	Alumínio
Diâmetro hidráulico	4,1 mm
Espessura do tubo	0,35 mm
Número de tubos	31

Contudo, para simplificação do problema e redução do custo computacional, apenas um tubo para cada passo foi simulado. Esta abordagem foi baseada na metodologia descrita por Hussein *et al.* (2014), Khan e Ahmad (2019), Taler *et al.* (2020), Marinheiro *et al.* (2022) e

Nascimento *et al.* (2024). Desta forma, conforme pode ser observado na Fig. 3.2, foram criados três domínios para solucionar o problema, sendo um domínio para representar o líquido de arrefecimento que escoar nos tubos em regime laminar, outro para representar o ar que escoar sobre a região sólida dos tubos e das aletas, e um terceiro domínio que engloba as regiões sólidas mencionadas (tubos e aletas).

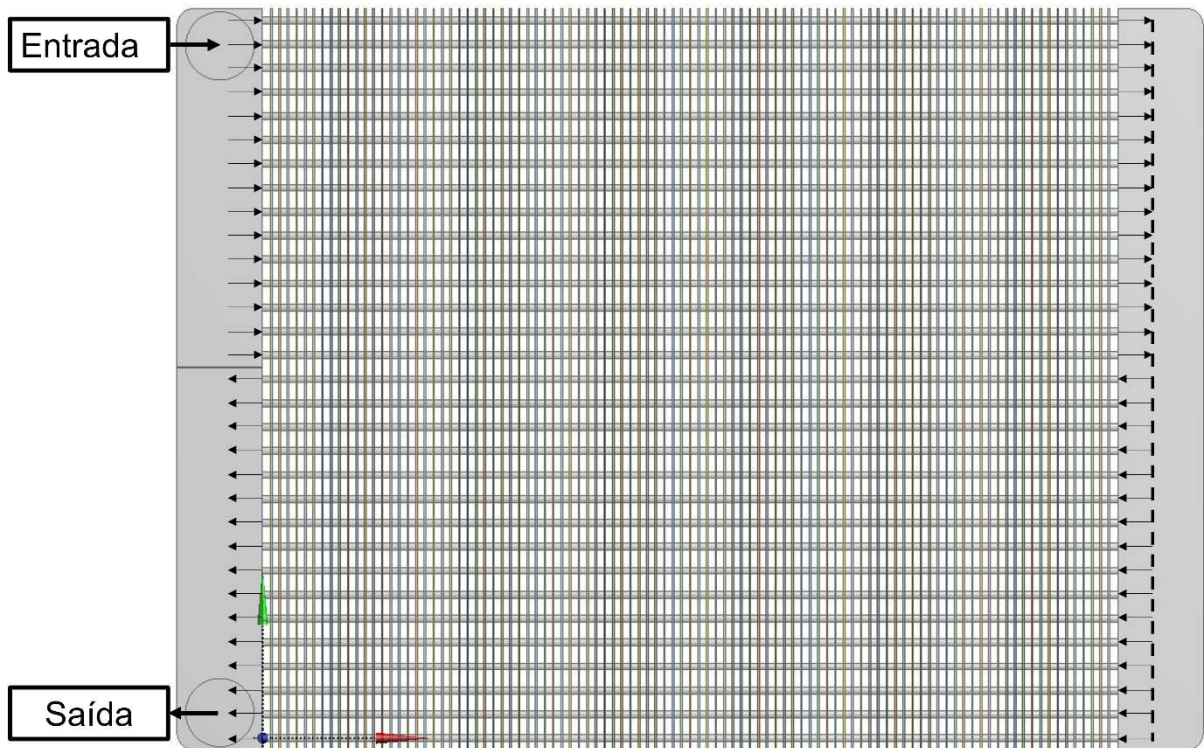


Figura 3.1 – Configuração do radiador automotivo simulado

Pelo fato de o trocador apresentar dois passos, simulou-se inicialmente o primeiro passo considerando a vazão constante dividida 15 (número de tubos do primeiro passo), a temperatura de entrada do líquido de arrefecimento e do ar constantes, assim como a velocidade do ar. Para o segundo passo, a temperatura e a velocidade do ar também foram mantidas constantes com o mesmo valor do primeiro passo. Contudo, a vazão do segundo passo é dividida por 16 (número de tubos do segundo passo), enquanto a temperatura de entrada do líquido de arrefecimento é o valor médio na saída do primeiro passo.

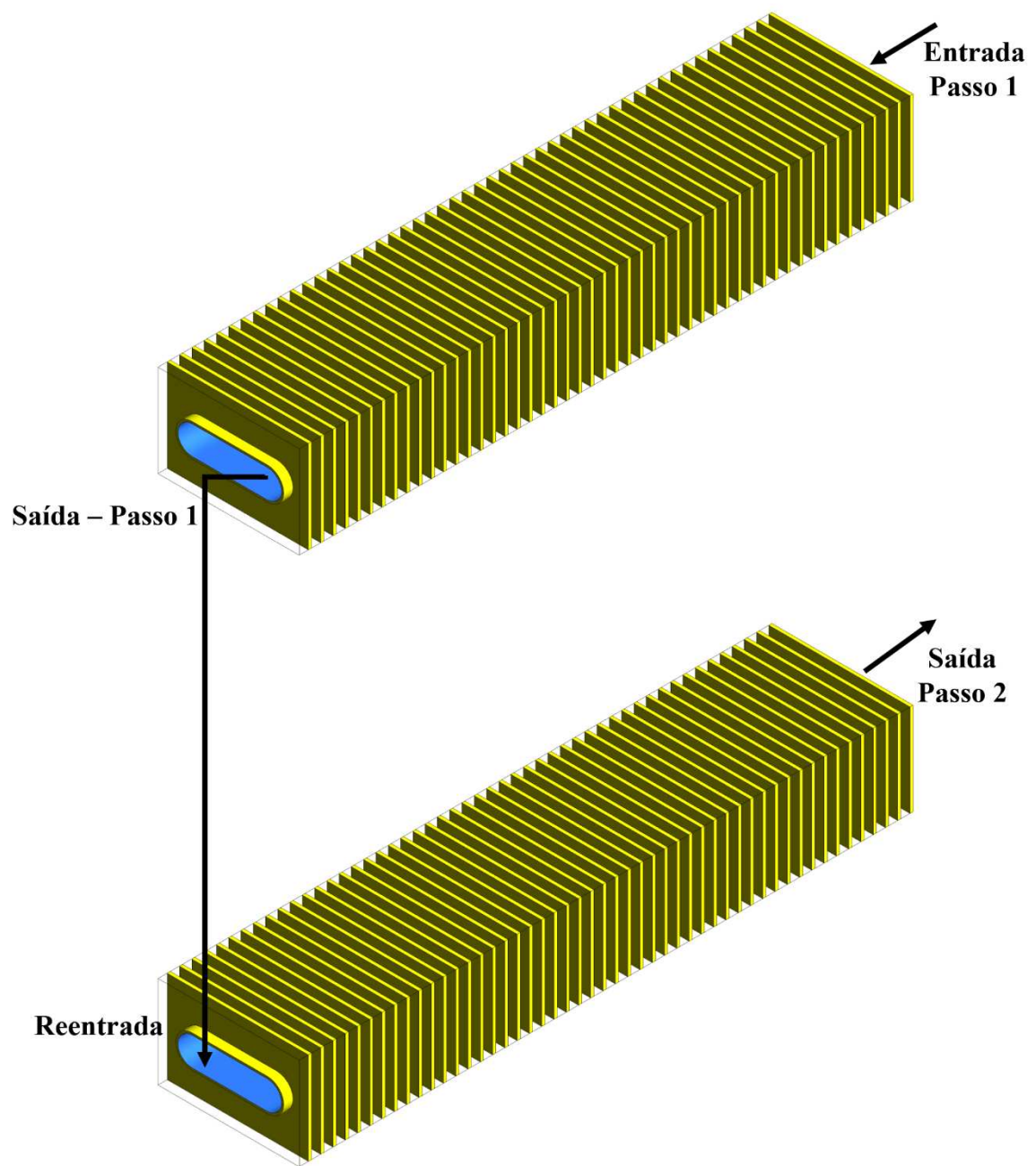


Figura 3.2 - Configuração do domínio computacional empregado nas simulações

### 3.2 Equações de balanço

Existem diversas abordagens numéricas para a predição do desempenho termohidráulico de nanofluidos em trocadores de calor. A metodologia mais comum entre os pesquisadores consiste na condição de escoamento monofásico, sem deslizamento, incompressível e em regime permanente, por meio do método de volumes finitos para discretização das equações de Navier-Stokes e da equação da energia (AJEEB; MURSHED, 2022).

Akbari *et al.* (2012) realizou o estudo do escoamento de nanofluidos em um tubo horizontal com fluxo de calor constante nas paredes, através de três modelos bifásicos diferentes (volume de fluido, mistura e Euleriano) e o monofásico, cujos resultados foram comparados com os obtidos experimentalmente. Observou-se que o modelo monofásico apresentou melhores resultados que os modelos bifásicos na predição do número de Nusselt. Além disso, o modelo monofásico apresenta facilidade implementação e requer menos memória e tempo computacional.

O processo de transferência de calor que acontece no domínio computacional mostrado na Fig. 3.2 é simulado considerando o escoamento do líquido de arrefecimento laminar e incompressível e sem dissipação viscosa, assumindo que o fluido é newtoniano. Devido à baixa concentração volumétrica de nanopartículas e considerando que as mesmas se movem com a mesma velocidade que o fluido base de arrefecimento, foram empregadas as equações da continuidade, quantidade de movimento linear e da energia Eq. (3.1-3) para modelar a transferência de calor e o escoamento em regime laminar (LIANG *et al.*, 2019).

$$\frac{\partial(\rho_{nf}u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_{nf}u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu_{nf} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_{nf}C_{p,nf}u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k_{nf} \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.3)$$

Já o escoamento do ar externo é turbulento. Para simular a turbulência do ar aplicou-se o modelo de turbulência  $\kappa - \omega$  SST (Shear-Stress Transport) proposto por Menter (1993). O modelo matemático empregado para o lado do ar se baseia na solução das Eq. da continuidade (3.4), da quantidade de movimento linear (3.5) e da energia (3.6).

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( k + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (3.6)$$

Nas Eqs. (3.1-6)  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $u_i$  é a componente do vetor velocidade,  $x_j$  é o vetor de coordenadas cartesianas,  $p$  é a pressão do fluido,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica,  $u_i'$  é a componente da flutuação instantânea da velocidade,  $k$  é a condutividade térmica,  $C_p$  refere-se ao calor específico,  $T$  é a temperatura, e  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker.  $E = c_p T - (p/\rho) + (u^2/2)$  é a energia total e  $(\tau_{ij})_{eff} = \mu \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$  é o tensor das tensões viscosas (EKICILER; ÇETINKAYA, 2021).

Apesar de o líquido de arrefecimento estar em regime laminar, faz-se necessário avaliar a turbulência do escoamento do ar na região externa do radiador. O escoamento turbulento pode ser caracterizado por flutuações instantâneas de velocidade, temperatura e outros escalares, os quais afetam diretamente no transporte da quantidade de movimento, de massa e de energia. Ao longo das décadas, houve o aumento dos estudos sobre a turbulência, que permitiu o surgimento de algumas abordagens para auxiliar na resolução das equações de Navier-Stokes, como as Equações Médias de Reynolds (RANS, do inglês Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Segundo Silveira Neto (2020), a turbulência é um fenômeno natural e possui alta complexidade e interesse prático como nas indústrias.

Devido ao baixo custo computacional e ao fato de que na maioria dos problemas a resolução dos detalhes das flutuações da turbulência é desnecessária, a abordagem RANS é a mais utilizada em problemas de engenharia em relação às outras abordagens. Nesta aproximação, se está interessado no fluxo médio e nos efeitos da turbulência nas propriedades do escoamento, em que, antes da utilização do método numérico, aplica-se a média temporal. Nesta aproximação surgem termos adicionais nas equações de escoamento médio temporal, devido às interações entre as flutuações, cuja modelagem é realizada por modelos de turbulência. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

O modelo selecionado para este trabalho foi  $\kappa - \omega$  SST que consiste na combinação dos modelos padrão  $\kappa - \omega$  e  $\kappa - \epsilon$ , os quais são descritos detalhadamente por Wilcox (2006). Segundo Fluent (2013), o modelo  $\kappa - \omega$  SST fornece vantagens semelhantes ao modelo  $\kappa - \omega$  padrão, porém não apresenta excessiva sensibilidade às condições de contorno. Além disso, este modelo de turbulência fornece um resultado mais preciso da separação do escoamento, em relação aos outros modelos RANS. Bahiraei *et al.* (2020) avaliaram a performance dos modelos de turbulência  $\kappa - \epsilon$  padrão,  $\kappa - \epsilon$  realizável,  $\kappa - \omega$  SST e  $\kappa - \omega$  padrão em relação aos dados experimentais de Saini e Verma (2008). Pôde-se observar que o modelo  $\kappa - \omega$  SST apresenta melhor predição do número de Nusselt em relação aos demais modelos.

O modelo  $\kappa - \omega$  SST possui as vantagens do modelo  $\kappa - \omega$  próximo à parede e em regiões de escoamento livre o modelo  $\kappa - \epsilon$  é ativado. Neste modelo, a taxa de energia cinética turbulenta ( $\kappa$ ) e a taxa de dissipação específica ( $\omega$ ) são escritas conforme as Eq. (3.7) e (3.8), respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\kappa \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_\kappa - Y_\kappa + S_\kappa \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3.8)$$

em que  $\tilde{G}_\kappa$  é a produção da energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade.  $\tilde{G}_\omega$  refere-se a geração de  $\omega$ .

$$\tilde{G}_\kappa = \min \left( G_\kappa = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, 10\beta^* \kappa \omega \right) \quad (3.9)$$

$$\tilde{G}_\omega = \frac{\alpha}{\nu_t} G_\kappa \quad (3.10)$$

em que  $\nu_t$  refere-se à viscosidade cinemática turbulenta e  $\beta^*$  é uma constante. A variável  $\alpha$  é definida conforme a Eq. (3.11).

$$\alpha = \alpha_\infty \frac{(\alpha_0^* + Re_t/R_\omega)}{(1 + Re_t/R_\omega)} \quad (3.11)$$

em que  $R_\omega = 2,95$ . O parâmetro  $\alpha_\infty$  é definido através da Eq. (3.12).



$$\alpha_{\infty} = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (3.12)$$

em que  $\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{k^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_{\infty}^*}}$ ,  $\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{k^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_{\infty}^*}}$  e  $k = 0,41$  e  $\beta_i = 0,072$ .

Nas Eq. (3.7) e (3.8) os termos  $Y_{\kappa}$  e  $Y_{\omega}$  referem-se à difusividade efetiva de  $\kappa$  e  $\omega$ , as quais são descritas nas Eq. (3.13) e (3.14), respectivamente.

$$\Gamma_{\kappa} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\kappa}} \quad (3.13)$$

$$\Gamma_{\omega} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega}} \quad (3.14)$$

em que  $\sigma_{\kappa}$  e  $\sigma_{\omega}$  são os números de Prandtl para  $\kappa$  e  $\omega$ , descritas conforme as Eq. (3.15) e (3.16), respectivamente.

$$\sigma_{\kappa} = \frac{1}{F_1/\sigma_{\kappa,1} + (1 - F_1)/\sigma_{\kappa,2}} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{\omega} = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1 - F_1)/\sigma_{\omega,2}} \quad (3.16)$$

A viscosidade turbulenta é calculada através da Eq. (3.17). O coeficiente  $\alpha^*$  amortece a viscosidade turbulenta e pode ser definido através da Eq. (3.18).

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho \kappa}{\omega} \quad (3.17)$$

$$\alpha^* = \alpha_{\infty}^* \frac{(\alpha_0^* + Re_t/R_{\kappa})}{(1 + Re_t/R_{\kappa})} \quad (3.18)$$

em que  $Re_t = \rho \kappa / \mu \omega$ ,  $R_{\kappa} = 6$ ,  $\alpha_0^* = \beta_i / 3$ . A variável  $F_1$  é definida através da Eq. (3.19).

$$F_1 = \tan(\Phi_1^4) \quad (3.19)$$

$$\Phi_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{\kappa}}{0,09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \kappa}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega}^+ y^2} \right] \quad (3.20)$$

$$D_{\omega}^+ = \max \left[ 2 \rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (3.21)$$

em que  $y$  refere-se a distância até à parede e  $D_{\omega}^+$  é a parte positiva do termo de difusão cruzada. Os parâmetros  $Y_{\kappa}$  e  $Y_{\omega}$  representam a dissipação de  $\kappa$  e  $\omega$  devido à turbulência, conforme as Eq. (3.22) e (3.23), respectivamente.

$$Y_{\kappa} = \rho\beta^*\kappa\omega \quad (3.22)$$

$$Y_{\omega} = \rho\beta\omega^2 \quad (3.23)$$

em que  $\beta$  e  $\beta^*$  são constantes.

$D_{\omega}$  representa a difusão cruzada definida através da Eq. (3.24), enquanto  $S_{\kappa}$  e  $S_{\omega}$  são possíveis termos fonte.

$$D_{\omega} = 2(1 - F_1)\rho\sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial\kappa}{\partial x_j} \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \quad (3.24)$$

As constantes do modelo  $\kappa - \omega$  SST são elencadas na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 - Constantes do modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST

$\sigma_{\kappa,1} = 1,176$	$\sigma_{\kappa,2} = 1$	$\sigma_{\omega,1} = 2$	$\sigma_{\omega,2} = 1,168$	$\alpha_1 = 0,31$	$\beta_{i,1} = 0,075$
$\beta_{i,2} = 0,0828$	$\alpha_{\infty}^* = 1$	$\alpha_{\infty} = 0,52$	$\beta_{\infty}^* = 0,09$	$\beta_i = 0,072$	$\alpha_0 = 1/9$
$R_{\beta} = 8$	$R_{\kappa} = 6$	$R_{\omega} = 2,95$	$\zeta^* = 1,5$	$\sigma_{\kappa} = 2$	$\sigma_{\omega} = 2$

A equação da energia para a região sólida é descrita na Eq. (3.25).

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (3.25)$$

### 3.3 Cálculo de propriedades dos nanofluidos

A análise numérica do desempenho termohidráulico de nanofluidos pode ser feita pela abordagem de monofásica ou com duas fases. Devido à baixa concentração volumétrica de nanopartículas, neste trabalho considerou-se que o nanofluido é um fluido monofásico, desta forma, faz-se necessária a utilização de correlações para predizer as propriedades termofísicas dos nanofluidos, dado que o coeficiente de transferência de calor, queda de pressão, número de Nusselt etc. de cada fluido refrigerante está diretamente relacionado as suas propriedades

termofísicas, como condutividade térmica, calor específico, viscosidade e densidade (VANAKI *et al.*, 2016).

Segundo Safaei *et al.* (2016) o modelo monofásico é eficiente, cujos erros inerentes à abordagem são reduzidos ao modelar as propriedades termofísicas como dependentes da temperatura pelo fato que os incrementos na condutividade térmica, na densidade, na viscosidade dinâmica e no calor específica serem dependentes da temperatura. A variação das propriedades termofísicas é extremamente relevante para a faixa de trabalho analisada no presente trabalho (298 – 358 K). Além disso, a consideração de que as propriedades do líquido de arrefecimento não são dependentes da temperatura local pode superestimar os verdadeiros ganhos térmicos e hidráulicos dos nanofluidos (SAID *et al.*, 2022). Para a faixa de temperatura analisada neste trabalho, podem ser observadas variações de até 8,33%, 80,83%, 4,89% e 9,36% nos valores da condutividade térmica, viscosidade dinâmica, densidade e calor específico, respectivamente.

Desta forma, assim como no trabalho de Contreras *et al.* (2019), neste trabalho, considera-se que os nanofluidos de grafeno à base de EG/água apresentam comportamento de um fluido monofásico newtoniano e incompressível. Considerou-se ainda o efeito da concentração e da temperatura nas propriedades termofísicas dos nanofluidos e do fluido base, as quais foram implementadas no programa Ansys Fluent, como Funções Definidas pelo Usuário (UDF, do inglês, User Defined Functions).

Conforme mencionado anteriormente, as propriedades termofísicas dos nanofluidos podem ser obtidas por meio de correlações ou modelos, considerando que as nanopartículas estão suficientemente dispersas no fluido base e com concentração constante, a ponto de considerá-los como monofásicos. Toh e Ting (2019) observaram que a densidade, a condutividade térmica e o calor específico possuem modelos que se aplicam aos nanofluidos de grafeno da ampla maioria dos trabalhos disponíveis na literatura.

Os mecanismos de incremento da condutividade térmica como movimento browniano, termoforese e osmoforese/difusioforese podem afetar significativamente na transferência de calor. Esses fenômenos ocorrem devido à interação partícula-partícula e partícula-fluido. Desta forma, foi feita uma análise para verificar a influência desses mecanismos na condutividade térmica. Para este procedimento foi feita uma análise quantitativa da condutividade térmica a partir dos modelos apresentados por Koo e Kleinstreuer (2005). Contudo, devido à ausência de modelos para partículas não-esféricas, foi utilizado o trabalho de Koo e Kleinstreuer (2005) para partículas esféricas com o intuito de se obter uma estimativa.

Tabela 3.3 - Influência do movimento browniano, termoforese e difusioforese

Concentração (vol.%)	Contreras <i>et al.</i> (2019)	Nan <i>et al.</i> (2003)	Com movimento browniano	Com termoforese	Com difusioforese
0,01	0,446	0,440	0,445	0,440	0,440
0,05	0,461	0,456	0,463	0,456	0,456
0,10	0,463	0,476	0,484	0,476	0,476
0,25	-	0,535	0,544	0,535	0,535
0,50	-	0,633	0,644	0,633	0,633

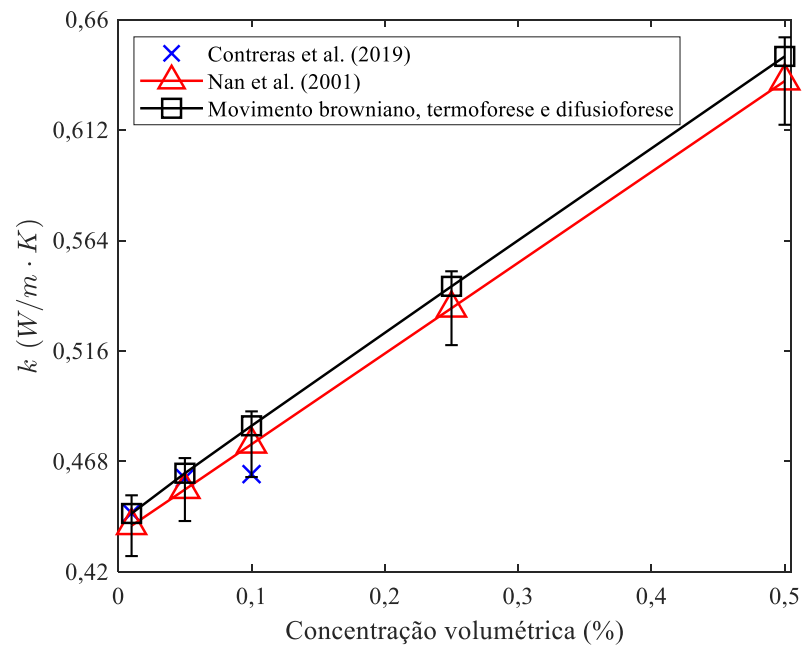


Figura 3.3 - Influência do movimento browniano, termoforese e difusioforese

Conforme está destacado na Tab. 3.3 e na Fig. 3.3, efeitos do movimento browniano, termoforese e osmoforese/difusioforese não apresentam influência significativa na condutividade térmica para a faixa estudada, cujos resultados apresentam concordância com os resultados de Koo e Kleinstreuer (2005), em que foi identificado que para concentrações volumétricas de até 0,5% esses efeitos apresentam baixa influência. A diferença encontrada variou entre 1,14% - 1,74% e tende a aumentar com a adição de nanopartículas. Desta forma, com o intuito de simplificar o problema e reduzir o custo computacional, os efeitos de

movimento browniano, termoforese e osmoforese/difusioforese não são considerados neste trabalho.

As correlações usuais para a densidade e o calor específico dos nanofluidos nos trabalhos experimentais e numéricos apresentam comportamento linear em relação à concentração volumétrica de nanopartículas, como nas Eq. (3.26) e (3.27) desenvolvidas por Pak e Cho (1988) e Xuan e Rotzel (2000) para estimar a densidade e o calor específico dos nanofluidos, respectivamente, cujas diferenças no cálculo foram inferiores a 3% aos resultados experimentais de Selvam *et al.* (2017c) para nanofluidos de grafeno/EG-água com concentrações volumétrica de 0,1 - 0,5 vol.%. Destaca-se que para estas duas propriedades existe uma baixa quantidade de estudos proponham novas correlações ou modelos, principalmente para nanopartículas não esféricas (SHHRUL *et al.*, 2014).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np} \quad (3.26)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_{np} \quad (3.27)$$

A densidade afeta diretamente o número de Reynolds, o fator de atrito, a queda de pressão, o coeficiente convectivo de transferência de calor etc. Esta propriedade tende a ser maior para o nanofluido do que o fluido base, devido a maior densidade das nanopartículas adicionadas. A adição de nanopartículas de grafeno resulta na diminuição do calor específico, e afeta diretamente a taxa de transferência de calor, o coeficiente convectivo, número de Nusselt etc. (SADRI *et al.*, 2018b; ELSAID *et al.*, 2021).

A viscosidade dinâmica e a condutividade térmica dependem significativamente de outras variáveis, além da concentração, como o tamanho da nanopartícula, método de preparação, tempo de sonicação, concentração de surfactantes, parâmetros geométricos da nanopartícula etc. Apesar de diversas pesquisas terem demonstrado experimentalmente o aumento da condutividade térmica da viscosidade dinâmica com a presença de nanopartículas, ainda não se tem uma correlação empírica geral ou modelo teórico sobre a influência desses parâmetros (AWAIS *et al.*, 2021).

A determinação da viscosidade dinâmica dos nanofluidos pode afetar a obtenção de parâmetros, como o número de Reynolds e de Prandtl, coeficiente convectivo, número de Nusselt, queda de pressão etc. (ARSHAD *et al.*, 2019). Pesquisadores observaram que a viscosidade dos nanofluidos depende da viscosidade do fluido base, concentração de

nanopartículas, taxa de cisalhamento, morfologia e tamanho da partícula, temperatura etc. (KLAZLY; BOGNÁR, 2022).

Destaca-se que na literatura, grande parte dos trabalhos numéricos utilizam o modelo de Einstein (1956) e de Brinkman (1952) para prever a viscosidade dinâmica quando não se tem um modelo ou correlação adequado para predição (SHEIKHOLESAMI, 2019). O modelo de Brinkman (1952) pode ser empregado para nanofluidos de cobre, ouro, nanotubos de carbono e grafeno para concentrações volumétricas de até 4% (RASHMI *et al.*, 2014; ALI *et al.*, 2021; PATEL *et al.*, 2023). Contreras *et al.* (2019) em seu estudo sobre nanofluidos de grafeno, puderam identificar que o modelo de Brinkman (Eq. (3.28)) consegue prever a viscosidade dinâmica dos nanofluidos de grafeno de forma satisfatória para baixas concentrações.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1 - \phi)^{2,5}} \quad (3.28)$$

A condutividade térmica dos nanofluidos depende de diversos fatores, como, tamanho e forma da partícula, temperatura, condutividade térmica do fluido base, aglomeração, surfactantes, pH etc. (ARSHAD *et al.*, 2019). Conforme pode ser observado na Fig. 3.4, a Eq. (3.29) de Nan *et al.* (2003) tem demonstrado previsão satisfatória da condutividade térmica de nanofluidos de grafeno produzidos por Contreras *et al.* (2019) e consoante a Yu *et al.* (2011) e Das *et al.* (2019).

$$k_{nf} = k_{bf} \cdot \left( \frac{3 + \phi k_{np}/k_{bf}}{3 - 2\phi} \right) \quad (3.29)$$

Além disso, organizações de mais de 30 países investigaram a condutividade térmica de nanofluidos, e os resultados obtidos estão em concordância aos previstos por Nan *et al.* (2003) (BUONGIORNO *et al.*, 2009).

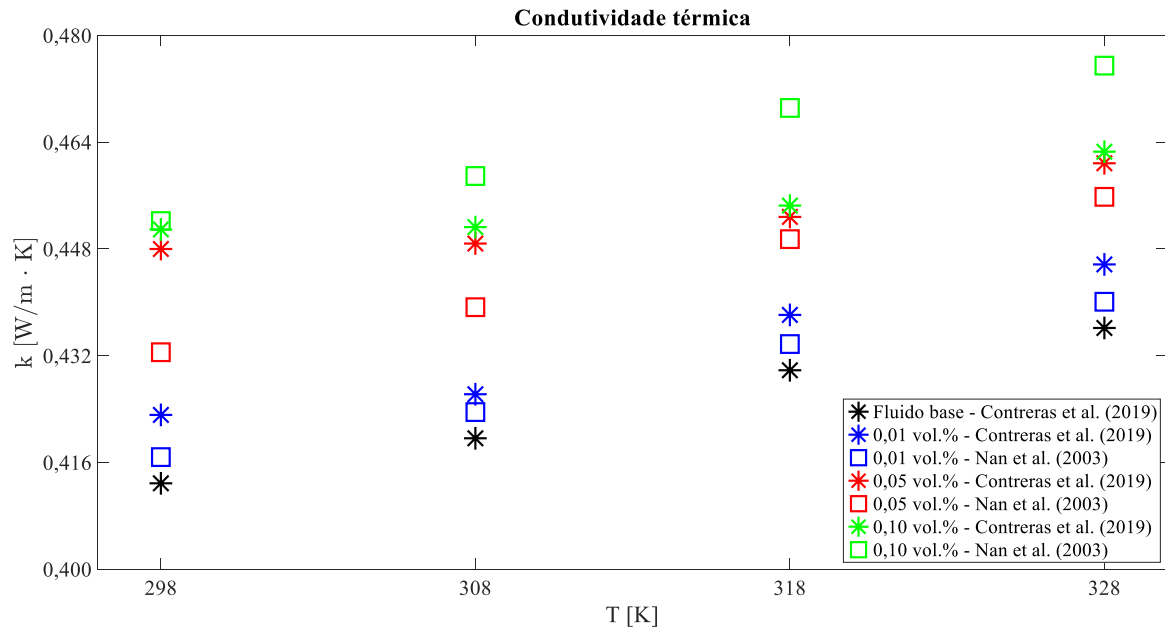


Figura 3.4 – Comparação da condutividade térmica obtida experimentalmente com a correlação de Nan *et al.* (2003). Fonte: Adaptado de Contreras *et al.* (2019)

Pelos motivos mencionados nesta subsecção, as Eq. (3.26-29) foram escolhidas para o cálculo da densidade, calor específico, viscosidade dinâmica e condutividade térmica dos nanofluidos de grafeno como líquido de arrefecimento do radiador automotivo.

### 3.4 Parâmetros termohidráulicos

A taxa de transferência de calor foi calculada através da equação de conservação da energia Eq. (3.30) para cada seção do tubo e é posteriormente somada.

$$\dot{Q} = \sum_{i=1}^{n-1} \dot{m} \cdot C_{p,nf} \cdot (T_i - T_{i+1}) \quad (3.30)$$

em que  $\dot{m}$  representa a vazão mássica,  $C_{p,nf}$  refere-se ao calor específico, e  $T_{in}$  e  $T_{out}$  são as temperaturas de entrada e saída de cada seção do tubo, respectivamente, e  $n$  é o número de secções.

O coeficiente convectivo de transferência de calor local e o médio podem ser determinados através das Eq. (3.31) e (3.32), respectivamente:

$$h_z = \frac{q''}{(T_w - T_f)_z} \quad (3.31)$$

$$h_{avg} = \frac{1}{L} \int_0^L h_z dz \quad (3.32)$$

em que  $q''$  é o valor local do fluxo de calor obtido através do Ansys Fluent, L se refere ao comprimento total do tubo.  $T_b$  representa a temperatura média local da parede obtida em cada lado do tubo para identificar possíveis gradientes de temperatura (conforme explicado por Morales et al., 2023), e  $T_f$  refere-se a temperatura média do fluido, respectivamente.

A potência de bombeamento foi calculada através da Eq. (3.33)

$$W = \frac{\dot{m} \cdot \Delta p}{\rho} \quad (3.33)$$

O coeficiente de desempenho termohidráulico é definido através da Eq. (3.34)

$$\eta = \frac{Q_{nf}/Q_{bf}}{W_{nf}/W_{bf}} \quad (3.34)$$

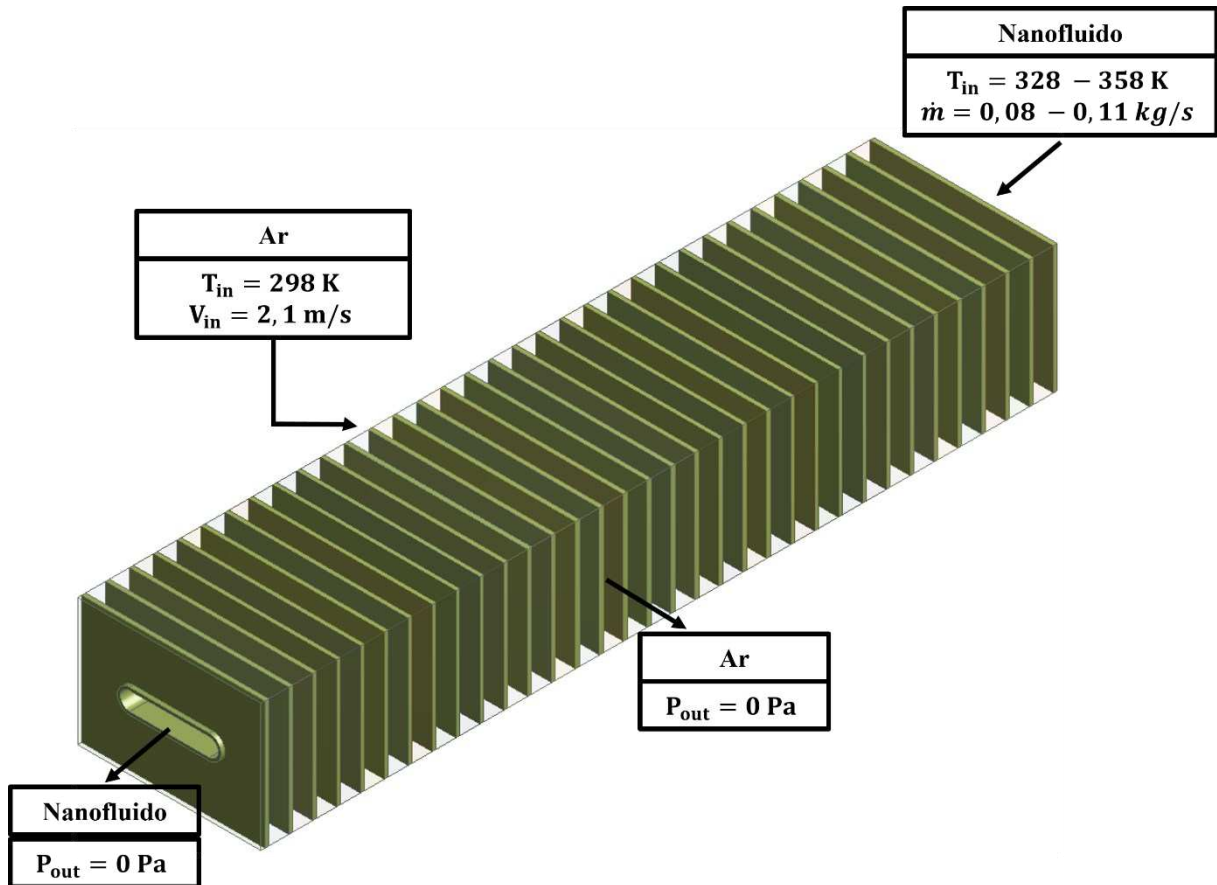
em que  $\Delta p$  refere-se a queda de pressão e o subscrito nf refere-se ao nanofluido (NASCIMENTO *et al.*, 2024).

### 3.5 Condições de contorno e simulação CFD

Assim como nos testes experimentais de Contreras *et al.* (2019) as simulações foram realizadas para o escoamento do fluido base EG-água (50:50) e dos nanofluidos de grafeno



(0,01 - 0,1 vol.%) em regime laminar com a vazão mássica e temperatura de entrada variando entre 0,08 - 0,11 kg/s e 328 - 358 K, respectivamente. Isto significa que como condições de entrada para o fluido se considera o valor da vazão mássica e da temperatura. Nas saídas foi empregada a condição de contorno denominada outlet, que significa a consideração de um valor nulo para a pressão estática e a consideração de um gradiente axial nulo para as outras variáveis.



No lado do ar, a temperatura e velocidade de entrada foram consideradas constantes em 298 e 2,1 m/s, respectivamente. Assume-se ainda que o escoamento na entrada é turbulento com uma intensidade turbulenta de 1%. Na região de saída também foi empregada a condição outlet (pressão estática nula e gradientes nulos das outras variáveis). A interface sólido-fluido é submetida a transferência de calor conjugada com a condição de não deslizamento, ou seja, a velocidade do escoamento é zero.

Foi empregado o método dos volumes finitos implementado no software Ansys Fluent para resolver as equações de conservação utilizando o esquema de acoplamento pressão-velocidade SIMPLE (do inglês, Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Os termos convectivos e difusivos foram discretizados com o método upwind de segunda ordem

(FLUENT, 2013). Os algoritmos de acoplamento de pressão-velocidade são utilizados para reescrever a equação da conservação da massa em termo da pressão, com o intuito de se obter o campo de pressão. O software Ansys Fluent permite a escolha entre os algoritmos SIMPLE, SIMPLEC, PISO, COUPLED e Fractional step. Todos os algoritmos mencionados (com exceção do COUPLED) são baseados na abordagem preditor-corretor.

O algoritmo SIMPLE foi originalmente desenvolvido por Patankar e Spalding (1972), no qual utiliza a relação entre as correções da velocidade e da pressão para garantir a conservação da massa e obter o campo de pressão. Quando a equação da quantidade de movimento linear é resolvida com um campo de pressão estimado, ela não é satisfeita pela equação da conservação da massa, por consequência é aplicada uma correção para o escoamento seja corrigido, até que a equação de conservação da massa seja satisfeita. Usualmente é utilizado um fator de subrelaxamento para a pressão com o intuito de não gerar correções exageradas e por consequência cause a divergência da solução. Os passos do algoritmo podem ser definidos da seguinte forma (PATANKAR, 2018):

1. Estimar o campo de pressão;
2. Resolver as equações da quantidade de movimento linear e obter os valores estimados;
3. Calcular a correção da pressão;
4. Calcular a pressão somando a correção da pressão com a pressão estimada anteriormente;
5. Resolve a equação da quantidade de movimento linear utilizando as equações de correção da velocidade;
6. Resolver a equação discretizada para outras variáveis (turbulência, temperatura etc.);
7. Retornar ao passo 2 e repetir até alcançar a convergência da solução.

O algoritmo SIMPLE é largamente empregado nas simulações envolvendo nanofluidos em trocadores de calor, tanto para regime laminar, quanto para turbulento, conforme pode ser observado na Tab. 3.4.

Tabela 3.4 - Trabalhos sobre a utilização do algoritmo SIMPLE

Autoria	Nanofluido	Trocador de calor	Regime de escoamento
Fadodun <i>et al.</i> (2019)	SWCNTs/água	Tubo plano	Turbulento
Al-Rashed <i>et al.</i> (2019)	Prata/água	Microcanal	Laminar
Shahsavar <i>et al.</i> (2019)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -CNT/água	Minicanal de tubo duplo	Laminar
Shahsavar <i>et al.</i> (2020)	Prata/água	Unidade de processamento	Laminar
Kaood e Hassan (2020)	GNP/água, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água e SiO <sub>2</sub> /água	Tubo ranhurado	Turbulento
Ijaz <i>et al.</i> (2020)	GO/água	Radiador automotivo	Laminar
Shahsavar <i>et al.</i> (2021)	Prata/água	Microcanal	Laminar
Khetib <i>et al.</i> (2021)	Grafite-SiO <sub>2</sub> /água	Tubo	Turbulento
Bejjam <i>et al.</i> (2021)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG	Radiador automotivo	Turbulento
Ba <i>et al.</i> (2022)	SiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> /EG-água	Duto circular	Turbulento
Gao <i>et al.</i> (2022)	Grafeno/água	Tubo circular	Turbulento
Ajeeb e Murshed (2022)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /DI e TiO <sub>2</sub> /DI	Placas	Turbulento
Yıldız <i>et al.</i> (2022)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CuO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e SiO <sub>2</sub> /EG-água e água	Radiador automotivo	Turbulento
Shajahan <i>et al.</i> (2023)	MWCNT/DI	Tubo com tiras cônicas	Laminar

Por padrão, o software Ansys Fluent, armazena os valores discretos dos escalares transportados nos centros dos volumes de controle. Contudo, os valores na face são necessários para os termos de convecção, os quais devem ser interpolados a partir dos dados no centro da célula. Este procedimento é realizado através de um esquema upwind. O software Ansys Fluent permite a escolha do esquema upwind entre as abordagens, upwind de primeira ordem, upwind de segunda ordem, lei de potência e QUICK (do inglês, Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics).

No método upwind de segunda ordem, as quantidades nas faces dos volumes de controle são calculadas através de uma abordagem de reconstrução linear multidimensional proposta por Barth e Jespersen (1989). Nesta metodologia, a precisão com alta ordem é obtida nas faces dos volumes de controle através de uma expansão em série de Taylor da solução centrada no volume de controle. A escolha deste método se dá pelo fato que quando o escoamento não está alinhado com o escoamento ou não se utiliza uma malha quadrilateral, ou hexaédrica, o método upwind de segunda ordem apresenta menor difusão numérica, obtendo-se resultados mais precisos, principalmente em escoamentos complexos (FLUENT, 2013).

### 3.6 Índice de convergência de malha

O índice de convergência de malha ou GCI (do inglês, Grid Convergence Index) é um procedimento de cinco passos para a mensuração da incerteza proveniente do refinamento da malha computacional. Conforme a malha é refinada, os erros da discretização espacial devem tender a zero, removendo os erros de arredondamento. Neste método, são necessárias três malhas com diferentes quantidades de volumes (mas, com células geometricamente semelhantes) para a metodologia ser eficaz. Os cinco passos do procedimento para aplicação do índice de convergência de malha são descritos abaixo e com mais detalhes em Asme (2009).

Passo 1: No primeiro passo, faz-se necessário definir o tamanho representativo  $h_{GCI}$ . Para malhas tridimensionais estruturadas ou não estruturadas, o valor do  $h_{GCI}$  é definido através das Eq. (3.35) e (3.36), respectivamente.

$$h_{GCI} = [(\Delta x_{max})(\Delta y_{max})(\Delta z_{max})]^{1/3} \quad (3.35)$$

$$h_{GCI} = \left[ \left( \sum_{i=1}^N \Delta V_i \right) / N \right]^{1/3} \quad (3.36)$$

em que N refere-se o número total de células utilizadas nos cálculos e  $\Delta V_i$  é o volume de cada célula que compõe o domínio computacional.

Passo 2: No segundo passo são selecionadas três malhas com diferentes refinamentos, as quais são utilizadas para simulações e obtenção dos valores importantes no estudo ( $\varphi$ ), como temperatura, velocidade etc. Define-se que a razão entre os valores de  $h_{GCI}$  (conforme as Eq.

(3.37) e (3.38)) deve ser pelo menos 1,3 vezes mais refinado que o anterior, conquanto, recomenda-se ainda que os valores de  $r_{32}$  e  $r_{21}$  sejam os mais próximos possíveis.

$$r_{32} = \frac{h_{GCI,3}}{h_{GCI,2}} \quad (3.37)$$

$$r_{21} = \frac{h_{GCI,2}}{h_{GCI,1}} \quad (3.38)$$

Paso 3: No passo 3 deve-se garantir que  $h_{GCI,1} < h_{GCI,2} < h_{GCI,3}$ . Posteriormente, deve-se calcular a ordem aparente (ou observada)  $P$  através da Eq. (3.39).

$$P = \left[ \frac{1}{\ln(r_{21})} \right] \left[ \ln \left| \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right| + q(p) \right] \quad (3.39)$$

em que  $q(p) = \ln \left( \frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right)$ ,  $s = 1 \cdot \text{sign} \left( \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right)$ ,  $\varepsilon_{32} = \varphi_3 - \varphi_2$  e  $\varepsilon_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$ , sendo  $\varphi_k$  a variável de interesse. Destaca-se que quando  $r$  for constante,  $q(p) = 0$ .

Passo 4: Calcula-se o valor extrapolado para a variável de interesse  $\varphi$  através da Eq. (3.40).

$$\varphi_{ext}^{21} = \frac{r_{21}^p - \varphi_2}{r_{21}^p - \varphi_1} \quad (3.40)$$

Passo 5: Calcula-se o erro relativo aproximado, o erro extrapolado e o valor do GCI, através das Eq. (3.41), (3.42) e (3.43), respectivamente.

$$e_a^{21} = \left| \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{\varphi_1} \right| \quad (3.41)$$

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{e_{ext}^{21} - \varphi_1}{e_{ext}^{21}} \right| \quad (3.42)$$

$$GCI_{fina}^{21} = \frac{Fs \cdot e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (3.43)$$

Conforme Roache (1998), recomenda-se que o fator de segurança  $Fs = 1,25$  para se obter um intervalo de confiança de 95%. Se obter o valor de GCI inferior a 5%, finaliza-se a

busca e utiliza-se a malha média, pois, qualquer refinamento adicional implicará apenas em custo computacional.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 Estudo de independência de malha

Geralmente, o uso de malhas numéricas mais refinadas, i.e., com um número maior de nós e volumes discretos, acarreta resultados mais exatos, conquanto, este incremento também promove adição de tempo computacional. Desta forma, faz-se necessário avaliar o equilíbrio entre a precisão dos resultados com o custo computacional através da avaliação da independência de malha para encontrar o tamanho de malha mais adequado. Utilizou-se três diferentes tamanhos de malhas para comparação sob as mesmas condições de operação de vazão mássica (0,11 kg/s) e temperatura de entrada do fluido base a 328 K. No lado do ar foi fixada a velocidade de 2,1 m/s e temperatura de 298 K na entrada. Os resultados para a taxa de transferência de calor do fluido base no radiador estão ilustrados na Fig. 4.1.

Com o acréscimo da quantidade de volumes de  $3,9 \cdot 10^6$  para  $5,1 \cdot 10^6$  volumes, a diferença da taxa de transferência de calor é de apenas 8,219 W. Além disso, a segunda malha apresenta uma diferença de 2,47% em relação ao valor experimental de Contreras *et al.* (2019), fornecendo uma solução satisfatória. Semelhantemente ao executado por Wen *et al.* (2021), o índice de convergência de malha (GCI) também foi analisado para avaliar a convergência da malha. Verificou-se que o valor de GCI entre as duas malhas mais refinadas é inferior a 1,46% o que indica que os resultados da taxa de transferência de calor no radiador estão na faixa assintótica de convergência. Desta forma, a malha número 2 com  $3,9 \cdot 10^6$  elementos foi selecionada para o presente trabalho.

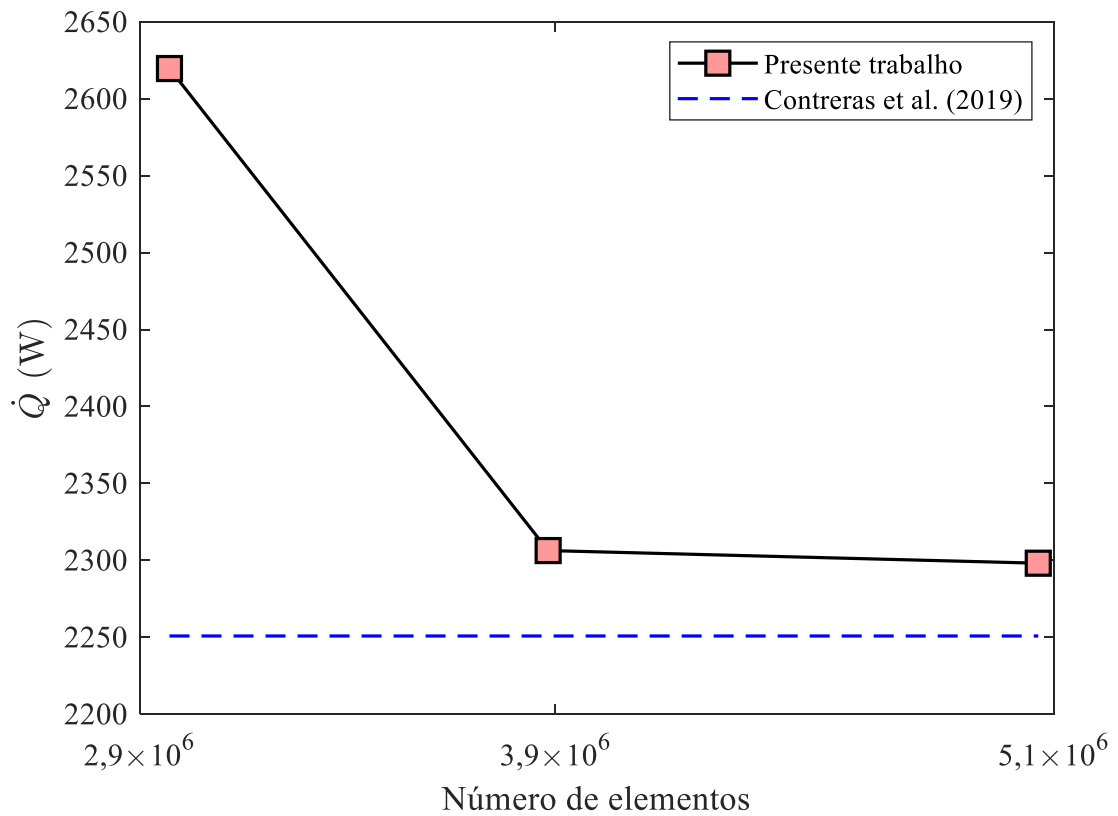


Figura 4.1 - Comparação da taxa de transferência de calor para diferentes malhas

A configuração da malha com  $3,9 \cdot 10^6$  elementos está disposta na Fig. 4.2 com o intuito de ilustrar a distribuição dos elementos, na qual se refere a uma malha não estruturada com refinamento nas regiões de parede no lado do ar. Para este procedimento foi feito um refinamento com elementos prismáticos com taxa de crescimento de 1,2, no qual foi destacado na Fig.4.2. Desta forma, os gradientes de velocidade e temperatura são calculados com maior confiabilidade, conforme descrito por de Fluent (2013) e Nascimento et al. (2024).



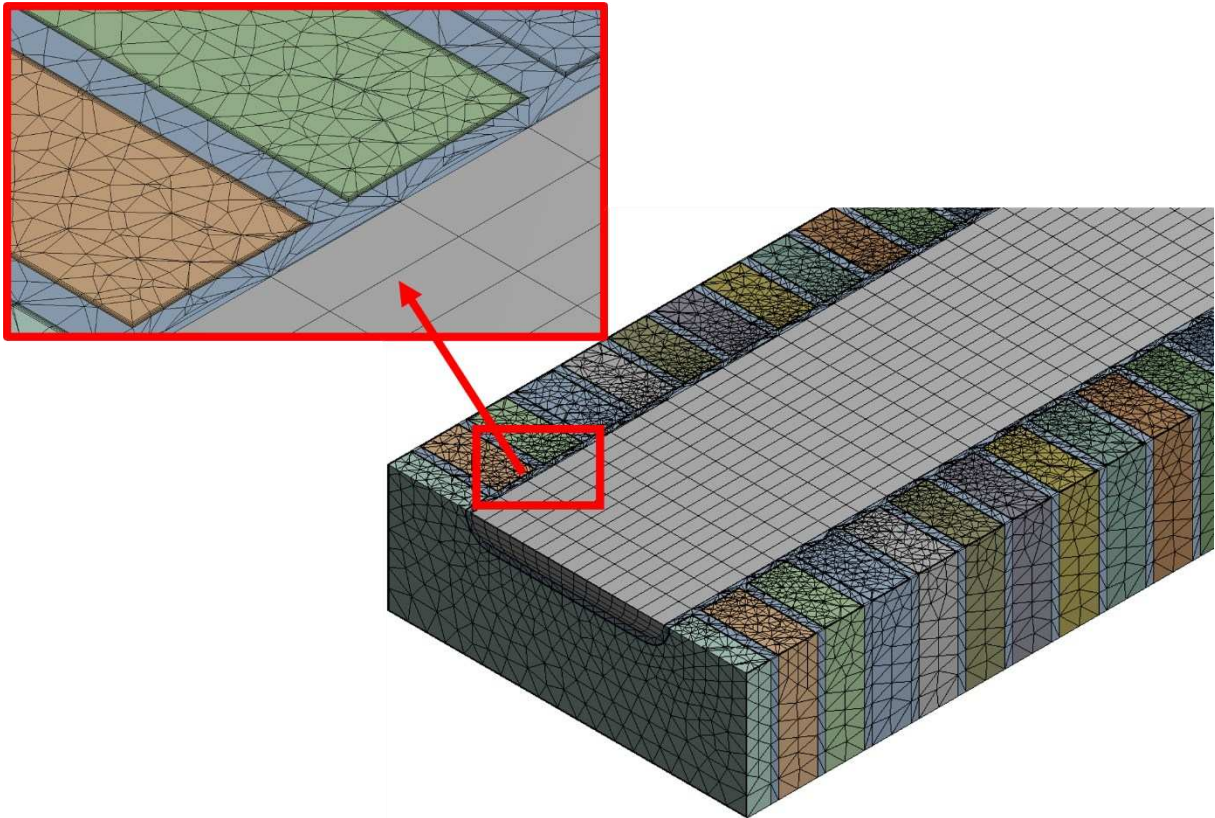


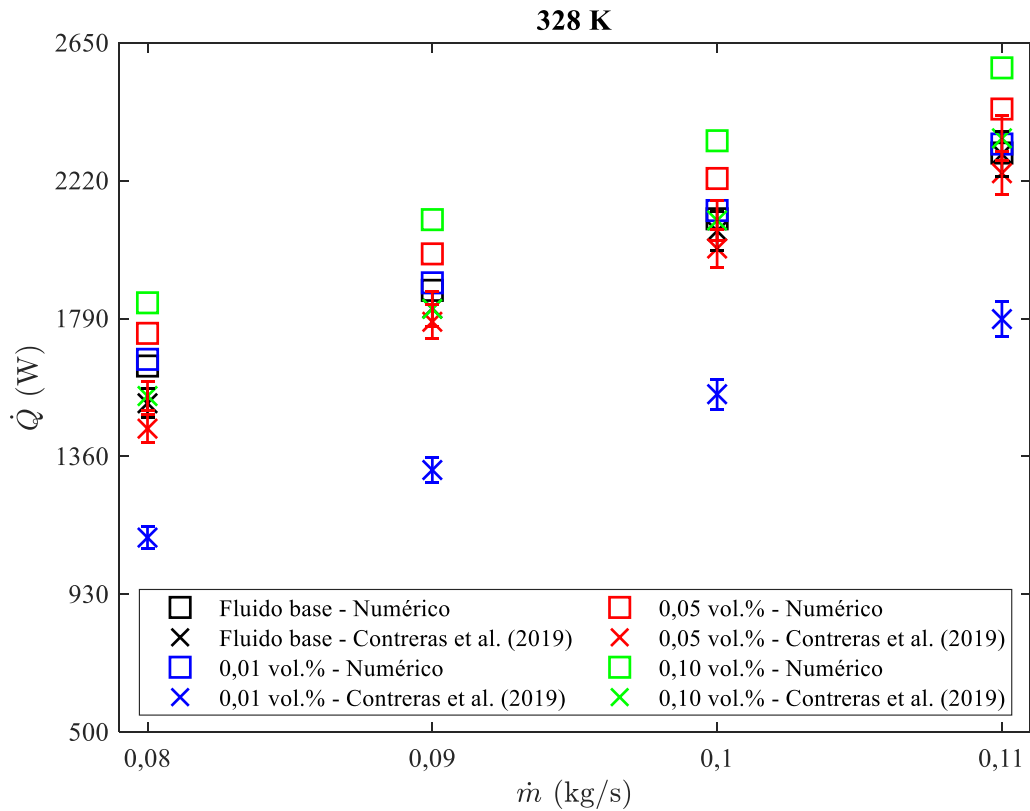
Figura 4.2 - Ilustração da configuração geométrica da malha utilizada

#### 4.2 Taxa de transferência de calor

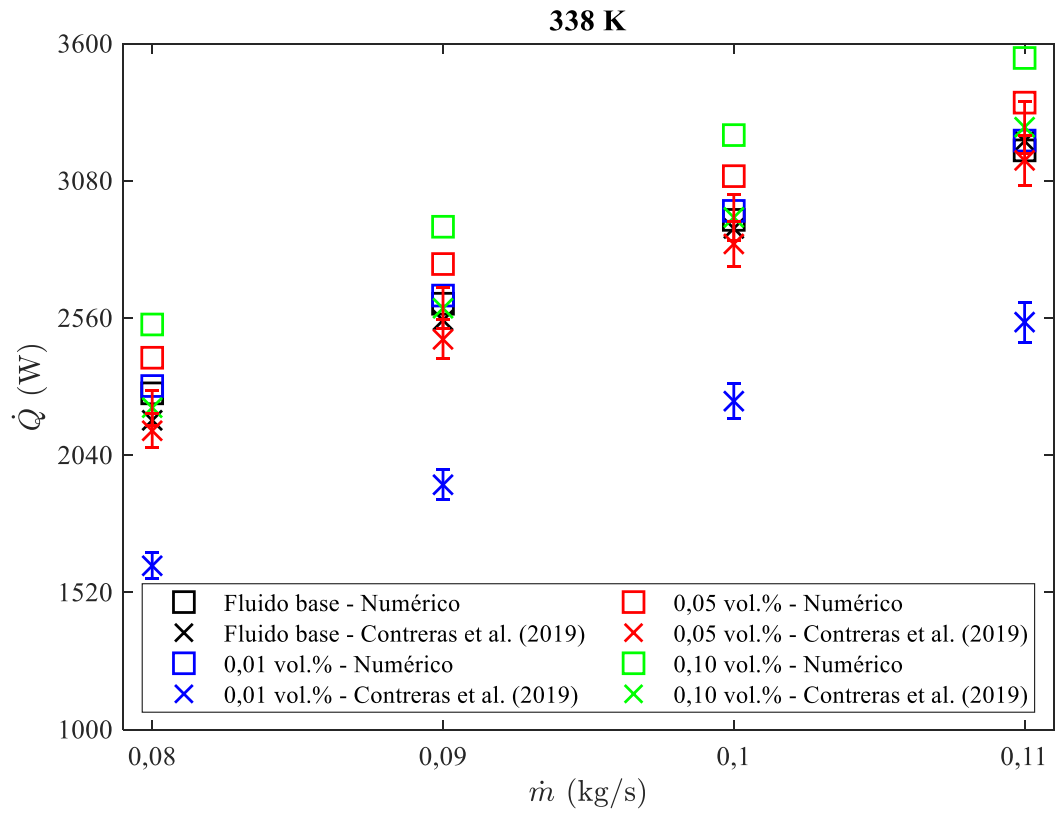
Na Fig. 4.3 se mostram os valores obtidos para a taxa de transferência de calor em função da vazão mássica (0,08 – 0,11 kg/s) para vários valores da concentração volumétrica de nanopartículas de grafeno (0 – 0,1%) na faixa de temperatura de 328 – 358 K. São considerados os valores determinados experimentalmente por Contreras *et al.* (2019) e os obtidos nas simulações numéricas.

A primeira informação que pode ser retirada da Fig. 4.3, é a redução da taxa de transferência de calor dos nanofluidos com as duas menores concentrações de Contreras *et al.* (2019) em relação ao fluido base. Uma das prováveis explicações está na possível aglomeração e sedimentação da amostra. Conforme Chakraborty e Panigrahi (2020) quando um nanofluido é submetido ao processo de aquecimento e resfriamento pode aumentar as chances de aglomeração das nanopartículas, pois durante o processo de aquecimento as partículas apresentam maior movimento browniano (o coeficiente de difusão das nanopartículas é diretamente proporcional à temperatura do fluido) implicando em mais colisão partícula-partícula ocasionando maiores chances de aglomeração de nanopartículas. Este comportamento

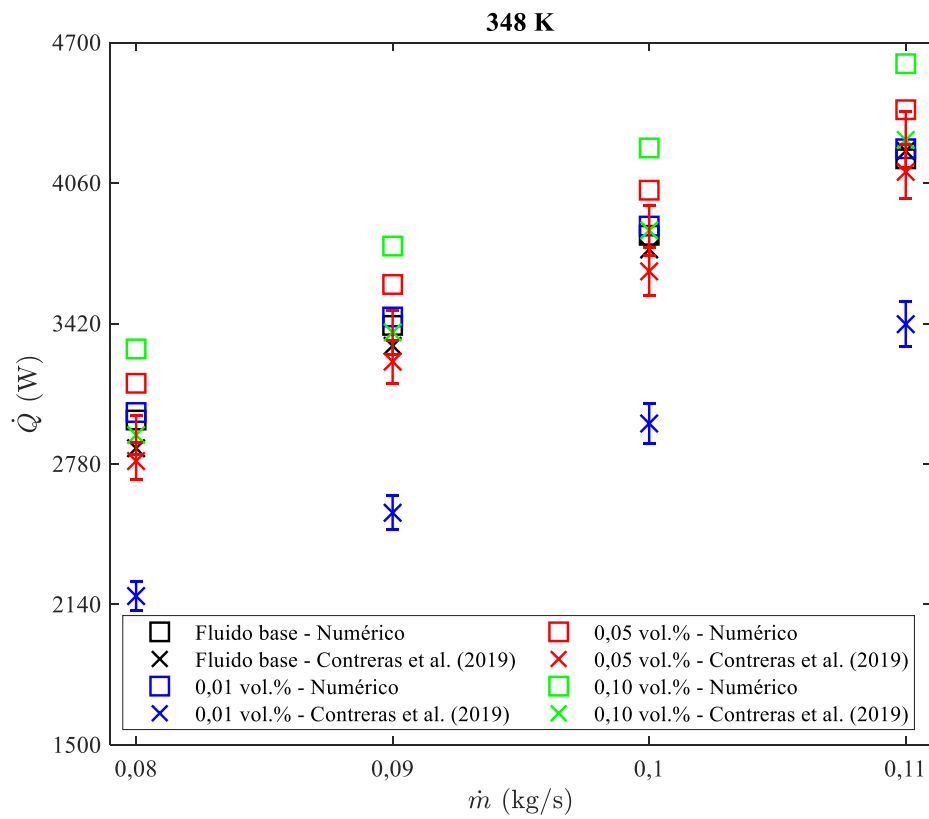
é observado na maior parte dos trabalhos sobre estabilidade em altas temperaturas, em que se observa a tendência de aglomeração e deterioração, conforme foi descrito por Contreras e Bandarra Filho (2022). Contudo, para a amostra com concentração volumétrica de 0,1%, observou-se desempenho superior ao do fluido base, com incremento de até 3,3%, indicando que o aumento da concentração volumétrica de nanopartículas tende a incrementar a taxa de transferência de calor. Outra provável explicação está no aumento da viscosidade dinâmica com o incremento de nanopartículas, o que tende a aumentar a espessura da camada limite térmica, deteriorando a transferência de calor (HUANG *et al.*, 2015). Além disso, Contreras *et al.* (2019) não utilizaram surfactantes, o que tende a aumentar a probabilidade de aglomeração e sedimentação das amostras analisadas (ALI; SALAM, 2020).



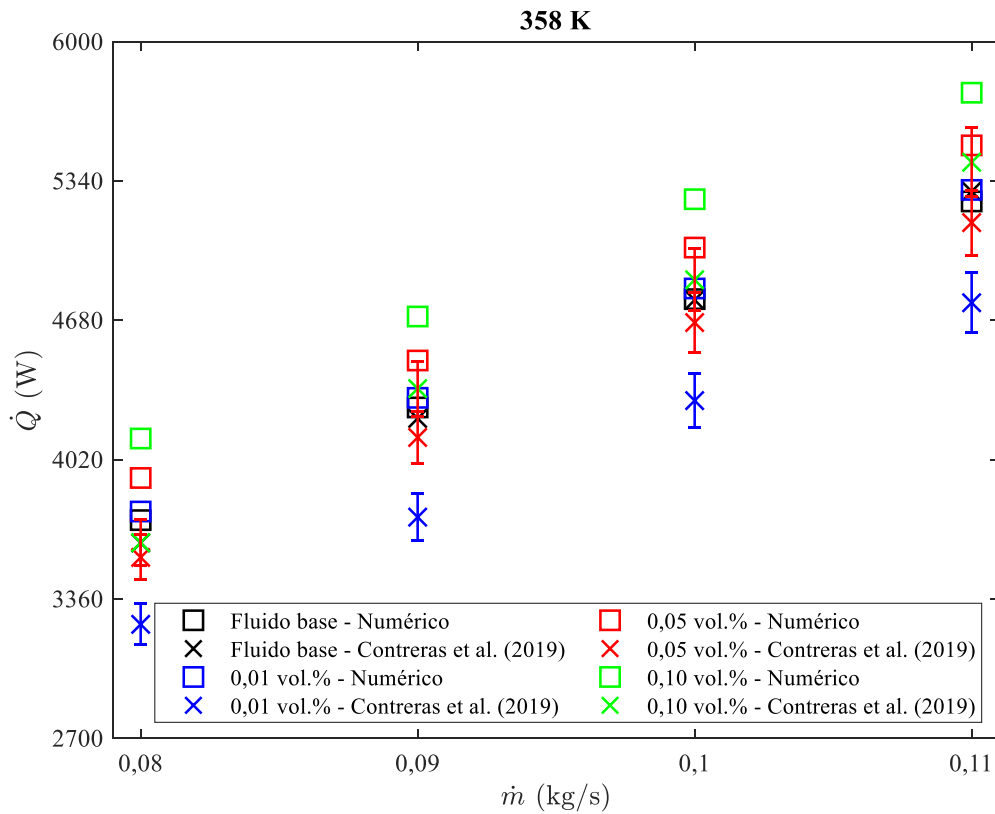
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3 - Taxa de transferência de calor em função vazão mássica

Nos resultados experimentais de Contreras *et al.* (2019) e nos numéricos obtidos neste trabalho, observou-se que o aumento da vazão mássica resulta num aumento da taxa de transferência de calor pelo aumento da energia transferida entre o ar e o fluido interno, devido ao incremento do processo de convecção no fluido interno. O aumento do coeficiente de convecção médio se mostra Fig. 4.5. O aumento da temperatura de entrada do fluido também provoca um aumento da taxa de calor transferida para o ar no trocador de calor, devido ao aumento das diferenças de temperatura entre os dois fluidos. Os resultados também mostram que a taxa de transferência de calor também aumenta com a concentração do nanofluido, resultado corroborado com os dados experimentais de Contreras *et al.* (2019) para a concentração volumétrica de 0,1%. Nesse caso, uma concentração maior implica no aumento da condutividade térmica do nanofluido e conseqüentemente no aumento da transferência de energia, mesmo com o provável problema de estabilidade dos nanofluidos.

Os resultados de simulação numérica permitem identificar um aumento máximo da taxa de transferência de calor em 12,13% em função do incremento da concentração volumétrica para a temperatura de 328 K, e um acréscimo de 40,50% para o aumento da vazão mássica para

a temperatura de 358 K. Isto pode ser explicado pelo fato que correlação para condutividade térmica ter ganhos maiores para temperaturas mais baixas (cujo comportamento apresenta concordância ao apresentado por Contreras e Bandarra Filho (2022)).

Para o fluido base a taxa de transferência de calor obtida numericamente apresenta concordância satisfatória quando comparada aos resultados experimentais, em que se observou uma diferença máxima de 4,56% para a temperatura de 328 K. Contudo, para os nanofluidos, foram encontradas discrepância de até 60,54% para amostra com concentração volumétrica de 0,01%, 23,09% para o nanofluido com 0,05 vol.% e de 22,80% para a concentração de 0,1 vol.%. As diferenças obtidas entre os resultados obtidos numericamente com os resultados experimentais de Contreras *et al.* (2019) podem ser explicadas por falta da modelagem de fenômenos como a aglomeração e sedimentação, pois, no presente trabalho, considera-se que as nanopartículas estão uniformemente dispersas (GUO, 2020).

Além disso, os ganhos obtidos com os nanofluidos na taxa de transferência de calor foi comparada com resultados experimentais de Contreras *et al.* (2019) e Naveen e Kishore (2020). Conforme pode ser observado na Tab. 4.1, os ganhos obtidos numericamente para a concentração de nanopartículas de 0,10 vol.% são inferiores ao obtido experimentalmente por Naveen e Kishore (2020). Este comportamento pode ser explicado pelo fato que nos resultados experimentais, Naveen e Kishore (2020) utilizaram o surfactante dodecil sulfato de sódio que permite uma melhor estabilidade dos nanofluidos, resultando em uma maior transferência de calor.

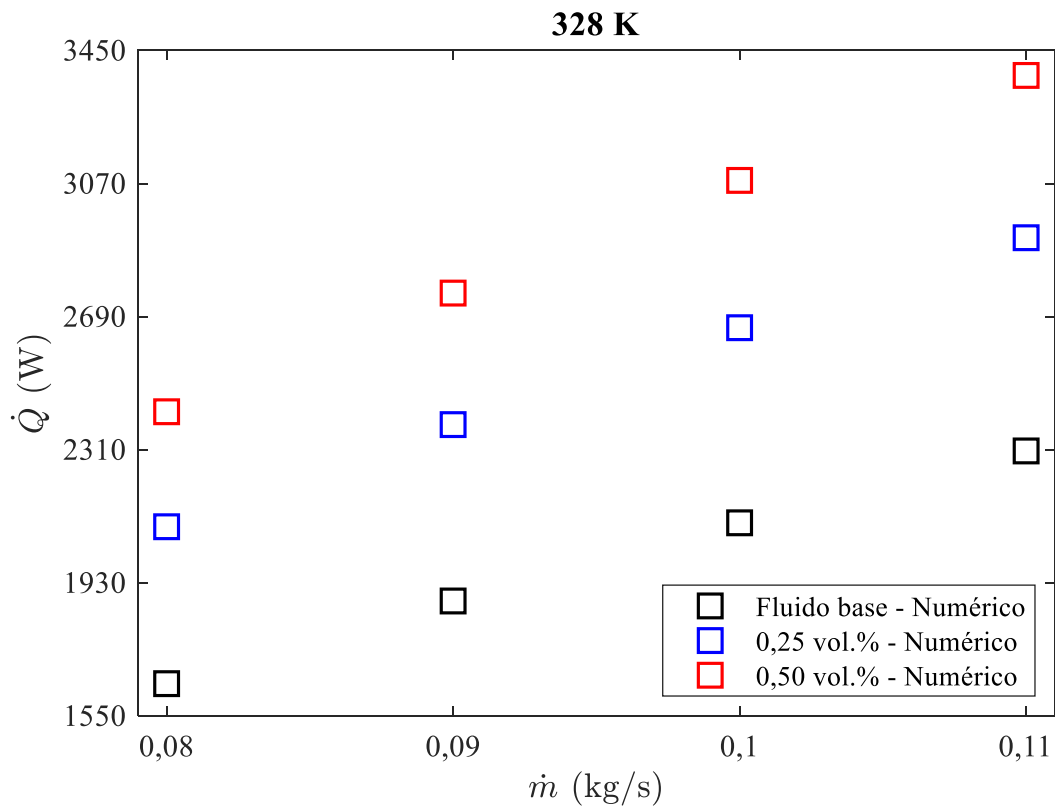
Tabela 4.1 – Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais

Parâmetro	Concentração	Número de Reynolds	Temperatura de entrada	Nanofluido	$Q_{nf}/Q_{bf}$
Presente trabalho	0,10 vol.%	1820	338 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,11
Contreras <i>et al.</i> (2019)	0,10 vol.%	1820	338 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	0,9332

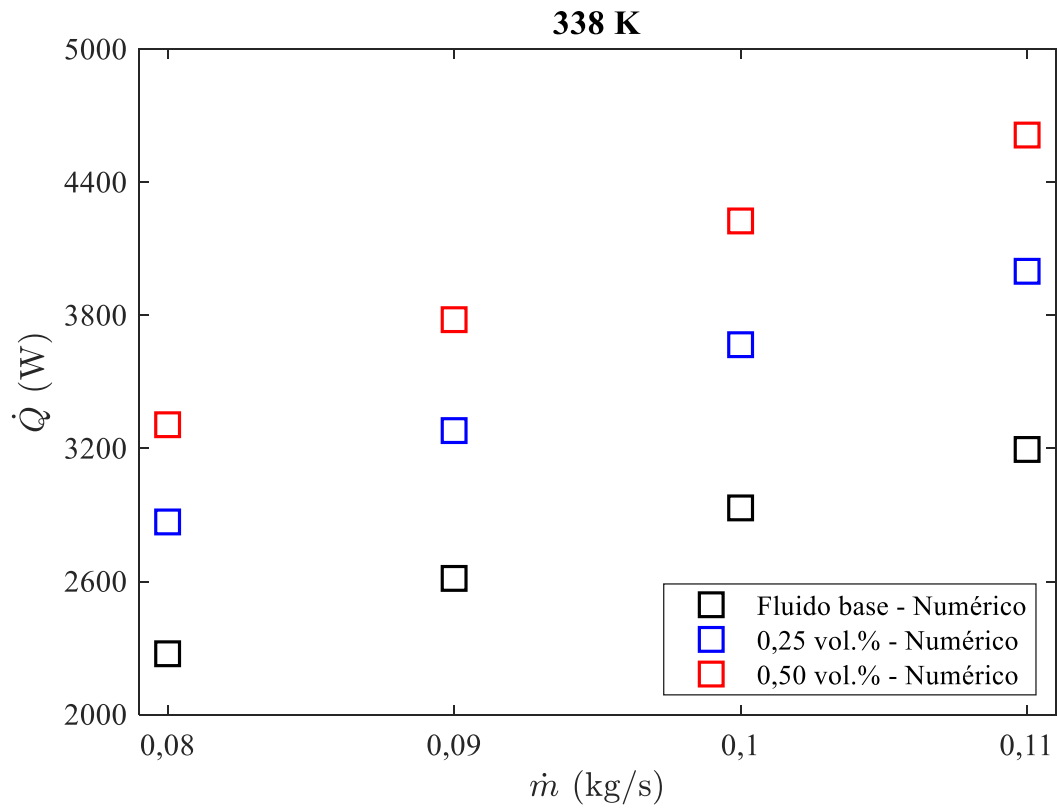
Naveen e Kishore (2020)	0,10 vol.%	1874	323 K	Grafeno/EG- água (30:70 vol.%)	2,10
----------------------------	------------	------	-------	--------------------------------------	------

#### 4.2.1 Taxa de transferência de calor para maiores concentrações de nanopartículas

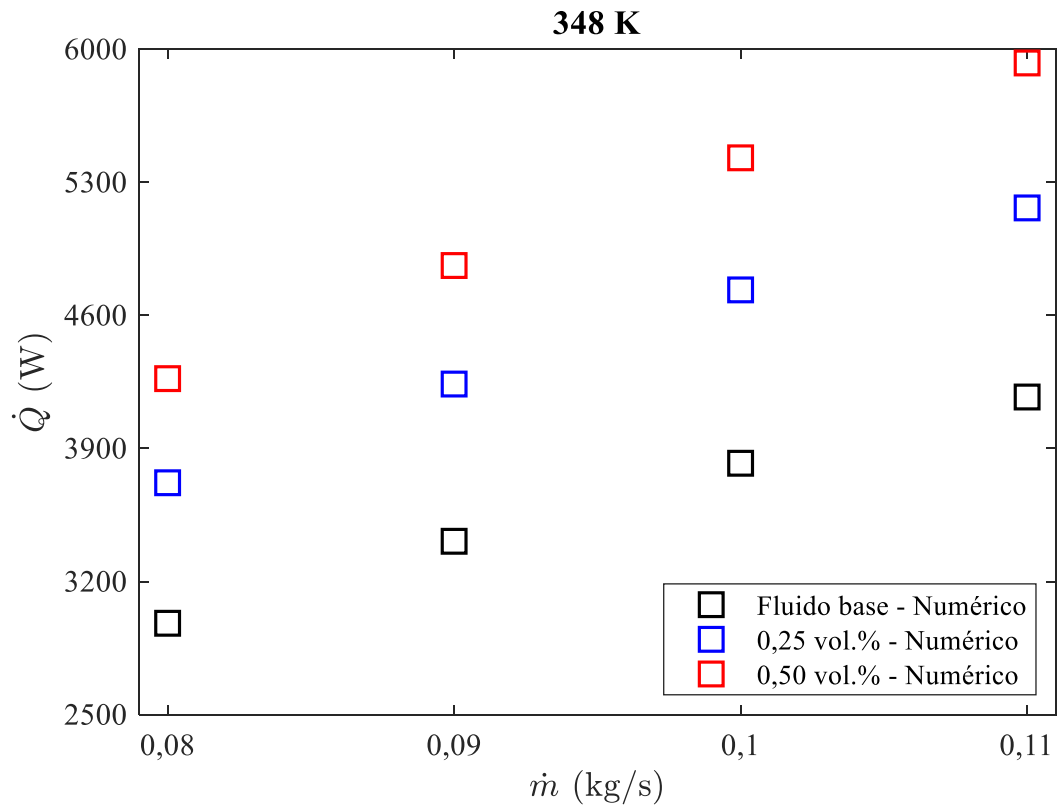
Na Fig. 4.4 está ilustrada a taxa de transferência de calor de nanofluidos de grafeno/água-EG para concentrações volumétricas superiores às realizadas experimentalmente por Contreras *et al.* (2019) sob as mesmas condições de contorno. Para esta análise foram consideradas as concentrações volumétricas de 0,25 e 0,50 vol.%. A escolha destas concentrações baseia-se no fato de o modelo monofásico adotado neste trabalho apresentar resultados satisfatórios para concentrações de até 0,50 vol.%, conforme adotado neste trabalho (KOO; KLEINSTREUER, 2005, SAIDUR *et al.*, 2011).



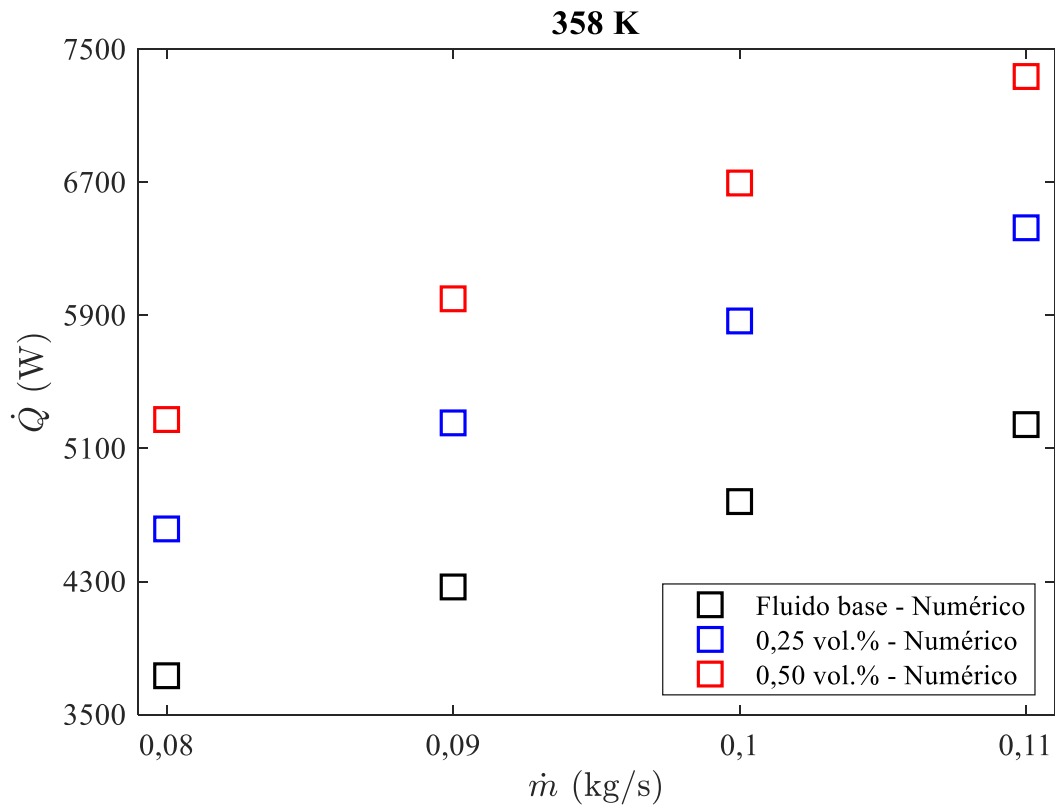
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.4 - Taxa de transferência de calor em função vazão mássica maiores concentrações

Dentre os nanofluidos analisados, foi identificado o aumento máximo de 27,79% e 47,3% da taxa de transferência de calor em relação ao fluido base para o nanofluido com concentração volumétrica de 0,25% e 0,50%, respectivamente. Assim como para concentrações de até 0,10 vol.%, a taxa de transferência de calor apresentou incremento com o aumento da concentração de nanopartículas e com a vazão mássica. Para a faixa de vazão mássica analisada neste trabalho, o aumento da  $\dot{m}$  não influenciou significativamente nos ganhos com a adição de nanopartículas.

Na Tab. 4.2 está disposta uma comparação dos ganhos obtidos na taxa de transferência de calor com os dados experimentais de Naveen e Kishore (2020) para as concentrações volumétricas de nanopartículas de 0,25% e 0,50%. Os ganhos obtidos numericamente neste trabalho são inferiores aos obtidos experimentalmente, cuja justificativa pode estar novamente relacionada a presença do surfactante dodecil sulfato de sódio. Conforme Borode *et al.* (2021a), nanofluidos de grafeno com dodecil sulfato de sódio apresenta melhor estabilidade que nanofluidos sem o surfactante. O potencial zeta do nanofluido sem o surfactante foi de



aproximadamente -30 mV, enquanto para o nanofluido com o dodecil sulfato de sódio, o potencial zeta foi de -48,8 mV.

Tabela 4.2 - Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais para maiores concentrações

Parâmetro	Concentração	Número de Reynolds	Temperatura de entrada	Nanofluido	$Q_{nf}/Q_{bf}$
Presente trabalho	0,25 vol.%	1995	348 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,25
Naveen e Kishore (2020)	0,20 vol.%	1905	323 K	Grafeno/EG-água (30:70 vol.%)	3,08
Naveen e Kishore (2020)	0,30 vol.%	2072	323 K	Grafeno/EG-água (30:70 vol.%)	3,96

Na Fig. 4.5 está ilustrada a taxa de transferência de calor em função da concentração volumétrica de nanopartículas de grafeno para todas as amostras analisadas neste trabalho. Pode ser observado que a taxa de transferência de calor tem comportamento quase linear, principalmente na região com concentração volumétrica de nanopartículas de até 0,1%. Após 0,1 vol.% pode ser observado o crescimento dos incrementos de forma menos acentuada. Este comportamento pode ser justificado por existir uma concentração de nanopartículas ótima, em que o aumento da concentração de nanopartículas tende a aglomerar e sedimentar as nanopartículas (HO *et al.*, 2023).

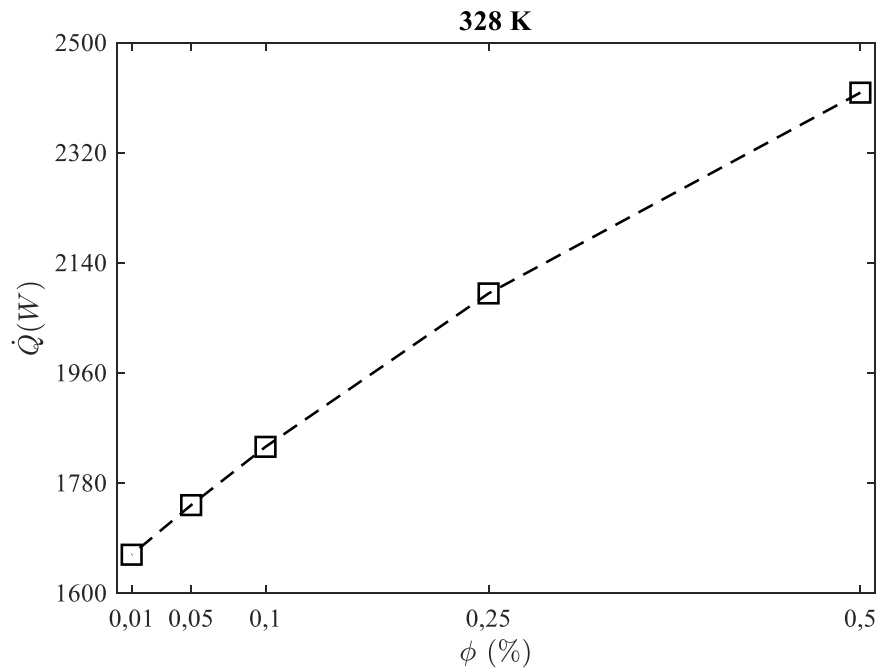
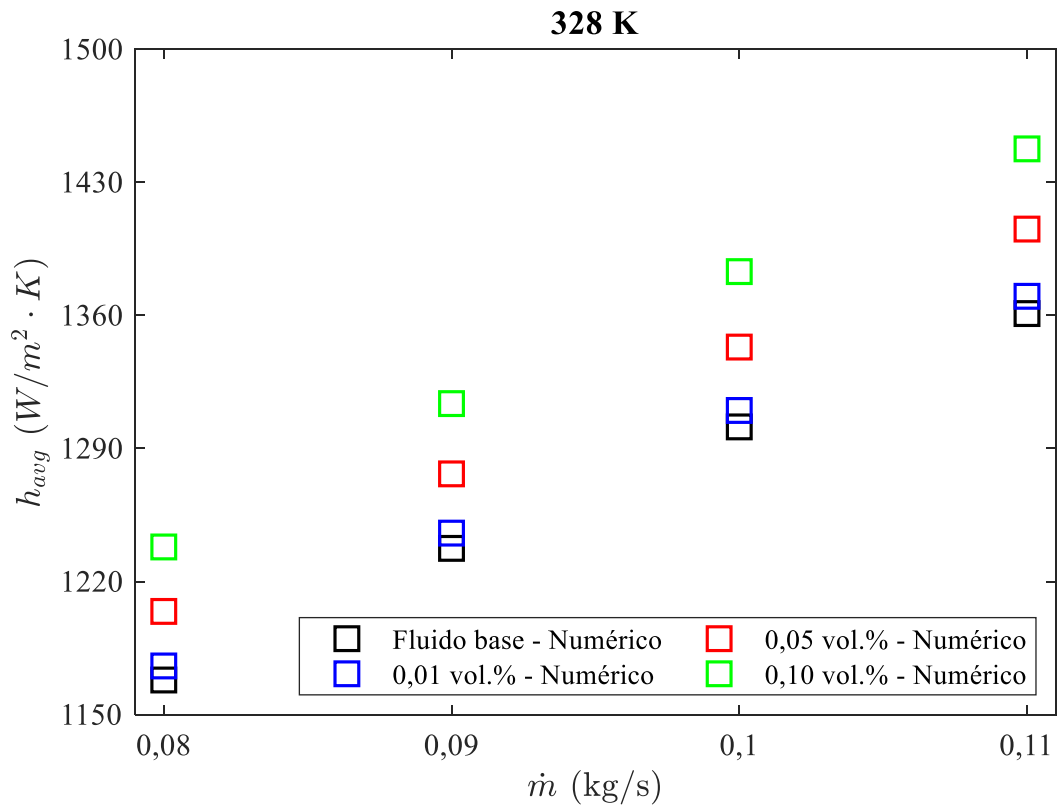


Figura 4.5 - Taxa de transferência de calor em função da concentração de nanopartículas

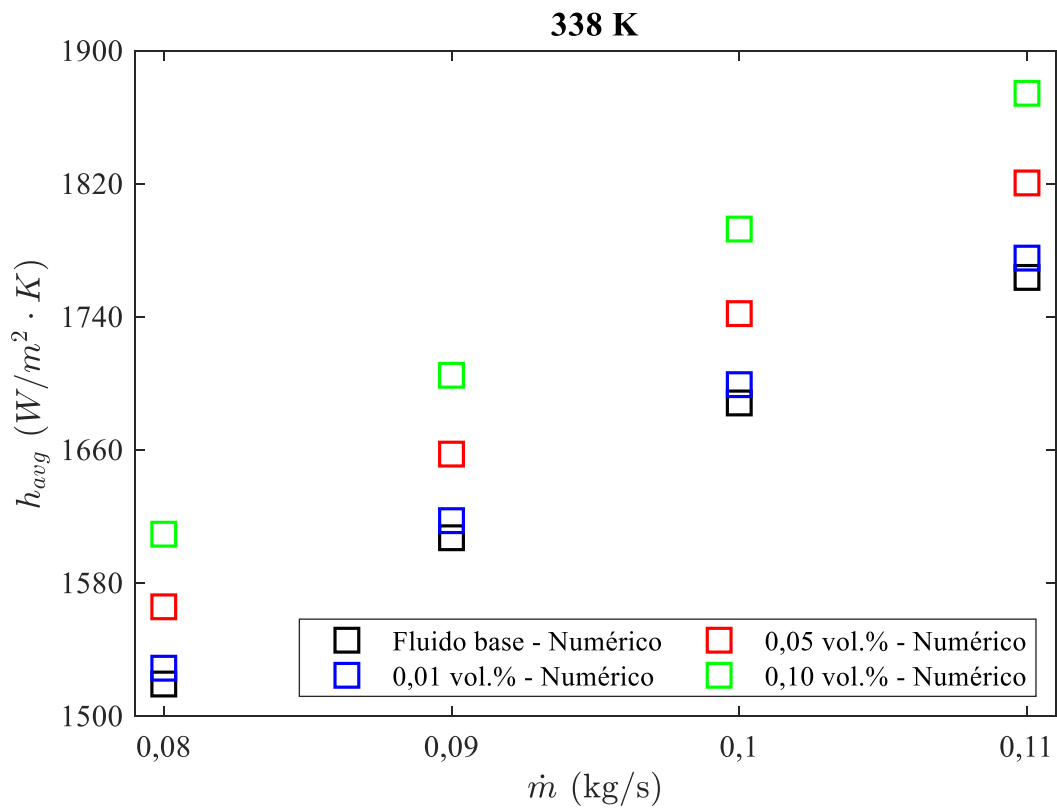
### 4.3 Coeficiente convectivo de transferência de calor médio

Os valores dos coeficientes convectivos de transferência de calor médio em todo comprimento do tubo para o fluido base água-EG (50:50) e os nanofluidos de grafeno em função da vazão mássica de 0,08 a 0,11 kg/s para as temperaturas de 328 – 358 K se mostram na Fig. 4.6. Segundo Zubair *et al.* (2021) este parâmetro indica a quantidade de remoção de calor para uma unidade de área que está em contato com o líquido de arrefecimento proporcionalmente à queda de temperatura, conforme a Eq. (3.31).

As simulações preveem um coeficiente maior que o fluido base para qualquer vazão mássica. Além disso, o  $h_{avg}$  aumenta com a vazão mássica. Considerando a vazão mássica constante, o coeficiente convectivo de transferência de calor aumenta com a concentração volumétrica de nanopartículas em até 6,3% em relação ao fluido base. Observou-se ainda que, o aumento do coeficiente de transferência de calor convectivo com o aumento da temperatura de entrada do líquido de arrefecimento em até 86,36%. O aumento da vazão mássica tende a aumentar o CCTC em até 16,91% para a mesma temperatura de entrada. Como esperado, esse comportamento do CCTC é similar ao mostrado para a taxa de transferência de calor na Fig. 4.3.



(a)



(b)

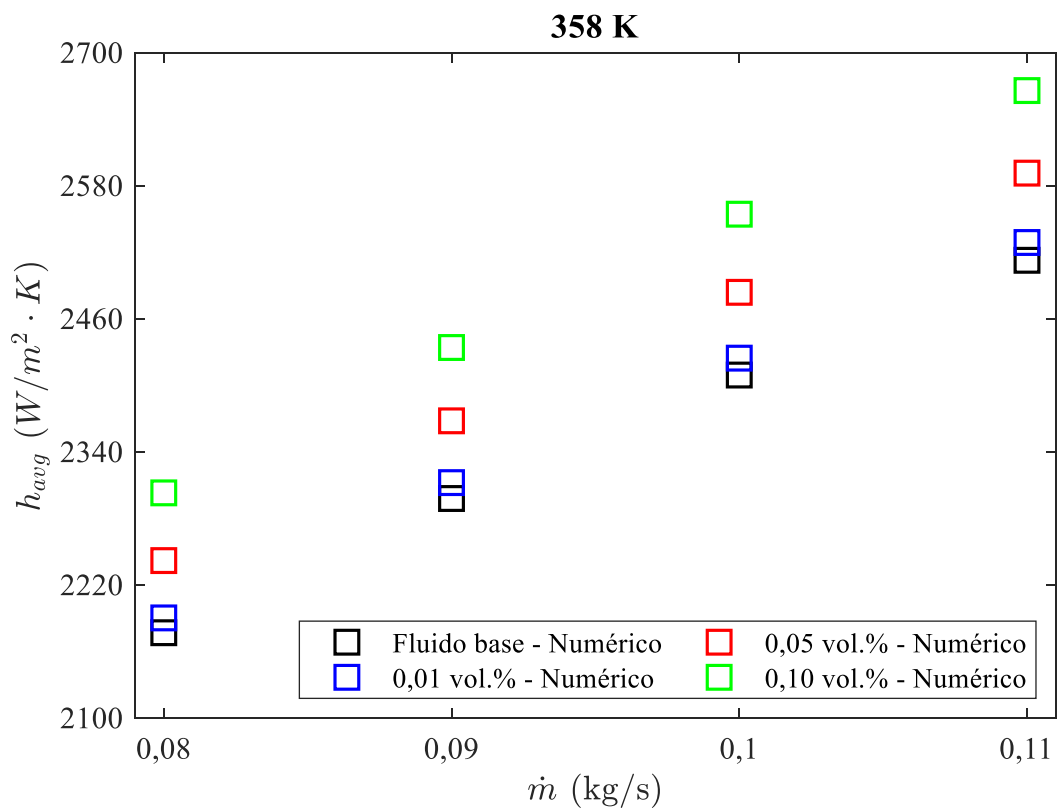
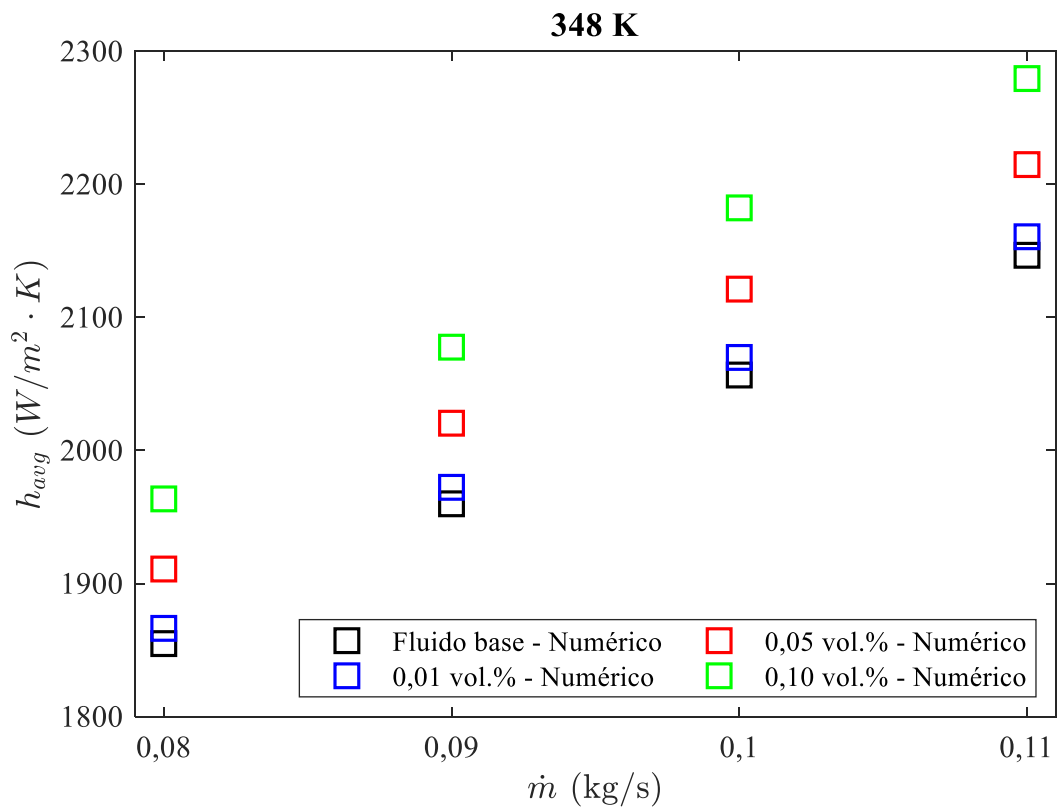


Figura 4.6 - Coeficiente convectivo de transferência de calor em função da vazão mássica

No caso do aumento da vazão mássica o CCTC aumenta devido ao aumento do número de Reynolds do escoamento de fluido. Já o aumento da concentração do nanofluido produz um aumento das propriedades termofísicas que causa o incremento do CCTC conforme foi demonstrado no trabalho de revisão de Abbas *et al.* (2020). A influência da temperatura de entrada produz um efeito global no trocador de calor pelo aumento das diferenças de temperatura entre os dois fluidos que produz um aumento do fluxo de calor local  $q''$ .

Na Tab. 4.3 estão dispostos os ganhos obtidos numericamente com adição de nanopartículas no coeficiente convectivo de transferência de calor, e uma comparação com resultados experimentais de Mehrali *et al.* (2015), Akhavan-Zanjani *et al.* (2016), Selvam *et al.* (2017a), Sarafraz *et al.* (2019) e Naveen e Kishore (2020). Conforme pode ser observado, os ganhos obtidos numericamente neste trabalho apresentam concordância satisfatória quando comparado com resultados experimentais.

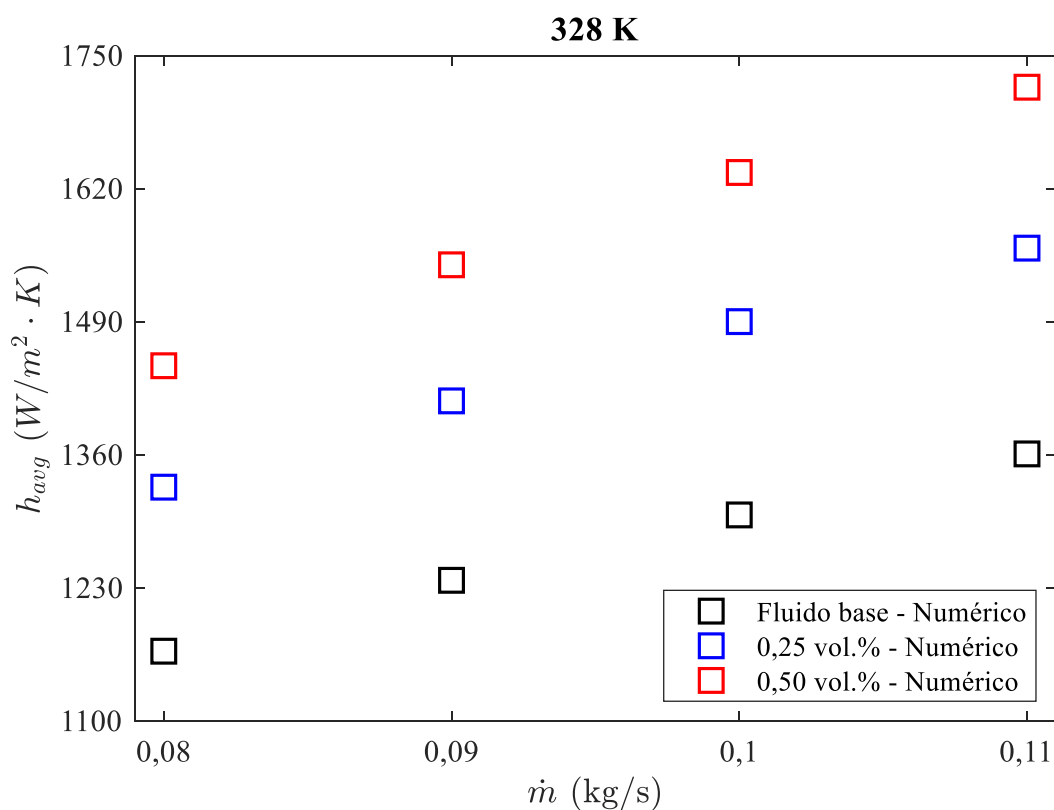
As diferenças obtidas podem ser explicadas pela diferença de metodologia na análise dos nanofluidos. No presente trabalho e no de Contreras *et al.* (2019), foi considerada a vazão mássica constante na entrada do radiador, enquanto no trabalho de Sarafraz *et al.* (2019) utilizaram o número de Reynolds fixo, ou seja, devido ao aumento da viscosidade dinâmica do fluido, teve-se de aumentar a velocidade do fluido para compensar e manter o valor do número de Reynolds. Naveen e Kishore (2020) e Selvam *et al.* (2017a) utilizaram nanofluidos com dodecil sulfato de sódio e desoxicolato de sódio como surfactante, o que tende a aumentar a estabilidade dos nanofluidos, resultando em uma menor aglomeração e sedimentação. Selvam *et al.* (2017a), por exemplo, utilizaram a concentração de surfactante de 0,75 vol.% e conseguiram nanofluidos visualmente estáveis por três meses. No trabalho de Akhavan-Zanjani *et al.* (2016) foi utilizada a água como fluido base, o que pode justificar o maior incremento no coeficiente convectivo de transferência de calor, consoante aos resultados obtidos experimentalmente por Ajeeb *et al.* (2023) em que para um trocador de calor compacto, foi identificado que o incremento da transferência de calor tende a ser maior para nanofluido a base de água do que para nanofluidos com a mistura de água-EG (15% e 30%).

Tabela 4.3- Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais

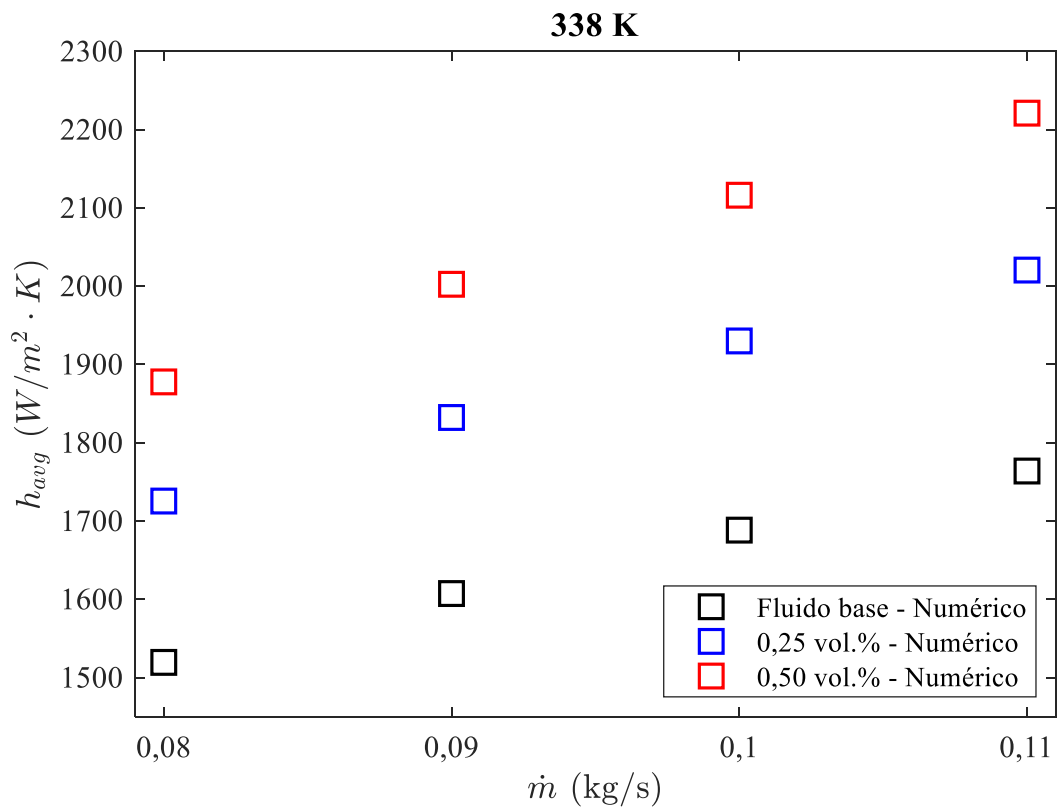
Parâmetro	Concentração	Número de Reynolds	Temperatura de entrada	Nanofluido	$h_{nf}/h_{bf}$
Presente trabalho	0,01 vol.%	1169	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,01
Akhavan-Zanjani <i>et al.</i> (2016)	0,01 vol.%	1162	-	Grafeno/água	1,05
Mehrali <i>et al.</i> (2015)	0,01 vol.%	1028	303 K	GNP/DW	1,01
Presente trabalho	0,05 vol.%	1463	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,04
Sarafraz <i>et al.</i> (2019)	0,05 vol.%	1500	-	GNP/EG-água (40:60 vol.%)	1,06
Mehrali <i>et al.</i> (2015)	0,05 vol.%	1313	303 K	GNP/DW	1,10
Presente trabalho	0,10 vol.%	1461	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,08
Sarafraz <i>et al.</i> (2019)	0,10 vol.%	1500	-	GNP/EG-água (40:60 vol.%)	1,20
Naveen e Kishore (2020)	0,10 vol.%	1877	323 K	Grafeno/EG-água (30:70 vol.%)	1,75
Selvam <i>et al.</i> (2017a)	0,10 vol.%	1788	318 K	GNP/EG-água (30:70 vol.%)	1,18

### 4.3.1 Coeficiente convectivo de transferência de calor para maiores concentrações de nanopartículas

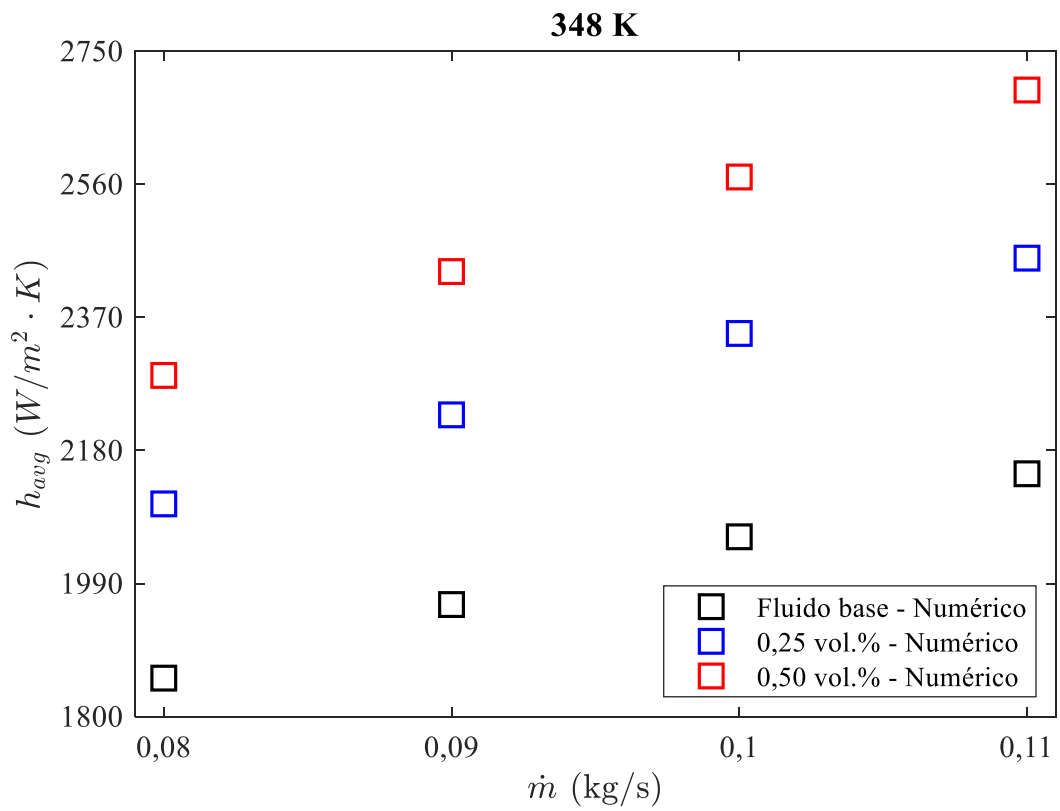
Na Fig. 4.7 está ilustrado o coeficiente convectivo de transferência de calor de nanofluidos de grafeno/água-EG para concentrações volumétricas superiores às realizadas experimentalmente por Contreras *et al.* (2019). Conforme pode ser observado, o coeficiente convectivo de transferência de calor tende a aumentar com a concentração volumétrica de nanopartículas de grafeno e com a vazão mássica. Foram identificados incrementos no coeficiente convectivo de transferência de calor devido à adição de nanopartículas em até 26,32% em relação ao fluido base, enquanto o aumento da vazão mássica tende a aumentar o CCTC em até 18,80% para a mesma temperatura de entrada. Para uma vazão mássica e concentração de nanopartículas fixas, foi identificado o aumento do coeficiente convectivo de transferência de calor em até 85,60% devido ao incremento da temperatura de entrada.



(a)

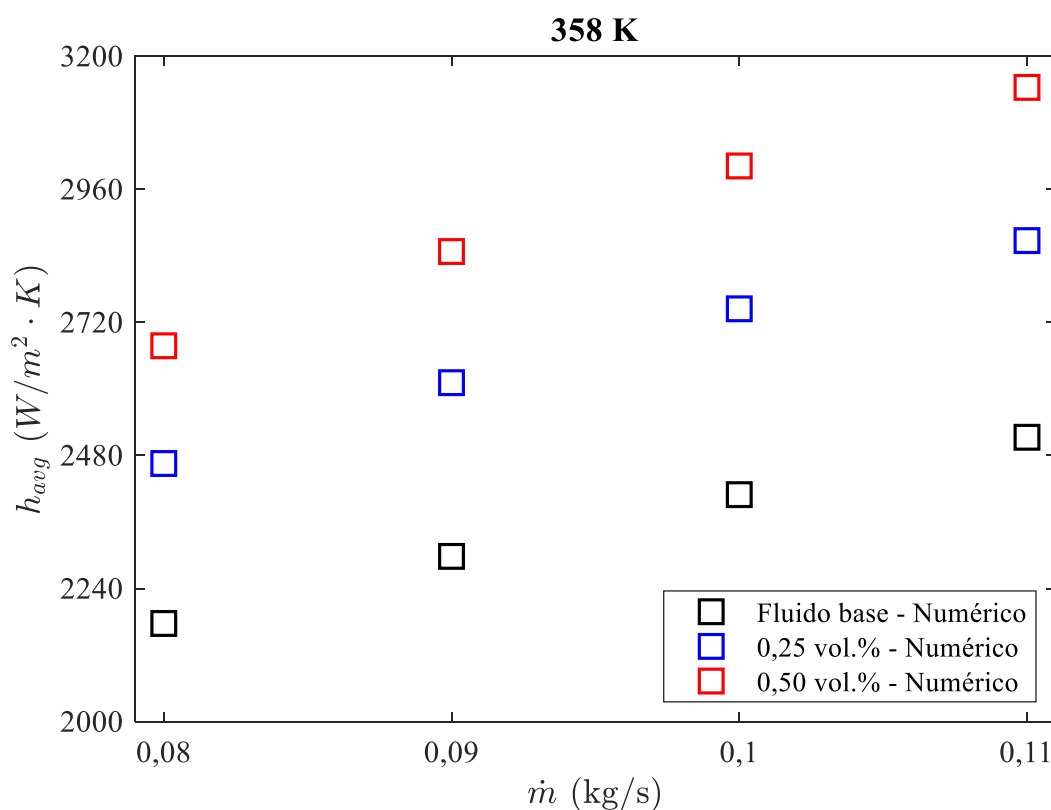


(b)



(c)





(d)

Figura 4.7 - Coeficiente convectivo de transferência de calor para maiores concentrações em função da vazão mássica

Ao comparar os ganhos obtidos com os nanofluidos com concentração de nanopartículas de 0,25 - 0,5 vol.% com os nanofluidos com concentração de 0,01 - 0,1 vol.%, foi identificado que os ganhos com o aumento da temperatura de entrada e da vazão mássica com os nanofluidos de maior concentração de nanopartículas são maiores que o dos nanofluidos com concentração volumétrica de até 0,1%. Além disso, como era esperado, quanto maior a concentração de nanopartículas, maior o incremento no coeficiente convectivo de transferência de calor. Contudo, assim como na taxa de transferência de calor, os incrementos no CCTC tendem a ser menores em relação à concentração inferior, reforçando que nanofluidos podem ter uma concentração ótima.

Na Tab. 4.4 está apresentada uma comparação dos ganhos obtidos numericamente no coeficiente convectivo de transferência de calor com resultados experimentais de Selvam *et al.* (2017a) e Naveen e Kishore (2020). Os resultados alcançados neste trabalho são inferiores aos dispostos na literatura, o que pode ser justificado novamente pelo uso dos surfactantes dodecil sulfato de sódio e desoxicolato de sódio como surfactante utilizados por Naveen e Kishore

(2020) e Selvam *et al.* (2017a) o que resulta em uma melhor estabilidade dos nanofluidos, ou seja, menor aglomeração e sedimentação. Além disso, quantidade de etilenoglicol no fluido base também pode interferir nos ganhos obtidos (AJEEB *et al.*, 2023).

Tabela 4.4 - Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais para maiores concentrações

Parâmetro	Concentração	Número de Reynolds	Temperatura de entrada	Nanofluido	$h_{nf}/h_{bf}$
Presente trabalho	0,25 vol.%	1601	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,18
Naveen e Kishore (2020)	0,20 vol.%	1912	323 K	Grafeno/EG-água (30:70 vol.%)	2,51
Naveen e Kishore (2020)	0,30 vol.%	2073	323 K	Grafeno/EG-água (30:70 vol.%)	2,99
Selvam <i>et al.</i> (2017a)	0,20 vol.%	1953	318 K	GNP/EG-água (30:70 vol.%)	1,66
Selvam <i>et al.</i> (2017a)	0,30 vol.%	1840	318 K	GNP/EG-água (30:70 vol.%)	1,75
Presente trabalho	0,50 vol.%	1591	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,34
Selvam <i>et al.</i> (2017a)	0,50 vol.%	1704	318 K	GNP/EG-água (30:70 vol.%)	1,84

#### 4.3.2 Nova correlação para o coeficiente convectivo de transferência de calor para trocadores de calor

A partir dos resultados obtidos numericamente neste trabalho, propõe-se uma nova correlação para o coeficiente convectivo de transferência de calor médio de nanofluidos de grafeno em trocadores de calor para regime laminar, conforme a Eq. (4.1). A correlação proposta atende a faixa do número de Reynolds 1035 – 2300 e do número de Prandtl de 6 – 13. Está ilustrado na Fig. 4.8 a comparação dos valores obtidos com a correlação proposta neste trabalho e os resultados experimentais de Selvam *et al.* (2017a) e Naveen e Kishore (2020).

$$h_{\text{avg}} = \frac{(0,002 \cdot Re_D^{1,137} \cdot Pr^{1/3})k}{D_h} \quad (4.1)$$

Pode-se observar a diferença máxima de 15,91% em relação ao nanofluido de Selvam *et al.* (2017a), enquanto para os dados de Naveen e Kishore tem-se a diferença máxima de 8,57%. Essas diferenças podem ser justificadas pela metodologia de preparo dos nanofluidos, pois Selvam *et al.* (2017a) e Naveen e Kishore (2020) utilizaram desoxicolato de sódio e dodecil sulfato de sódio, respectivamente, para aumentar a estabilidade dos nanofluidos e por consequência incrementar a transferência de calor. Como era esperado, as maiores diferenças são encontradas para os nanofluidos com maior concentração de nanopartículas.

Para a concentração volumétrica de nanopartículas de grafeno de até 0,1%, a simulação numérica consegue prever de forma satisfatória, cuja diferença máxima foi de 0,93%. Ao comparar os resultados do fluido base de Selvam *et al.* (2017a), tem-se a diferença de apenas 5,10%, ou seja, dentro da faixa de incerteza. Desta forma, pode-se afirmar que a correlação proposta neste trabalho consegue prever o comportamento do coeficiente convectivo de transferência de calor de nanofluidos de grafeno em trocadores de calor, contudo, o aumento da concentração de nanopartículas tende a diminuir a precisão, conforme foi observado ao comparar com os dados de Selvam *et al.* (2017a) e Naveen e Kishore (2020).

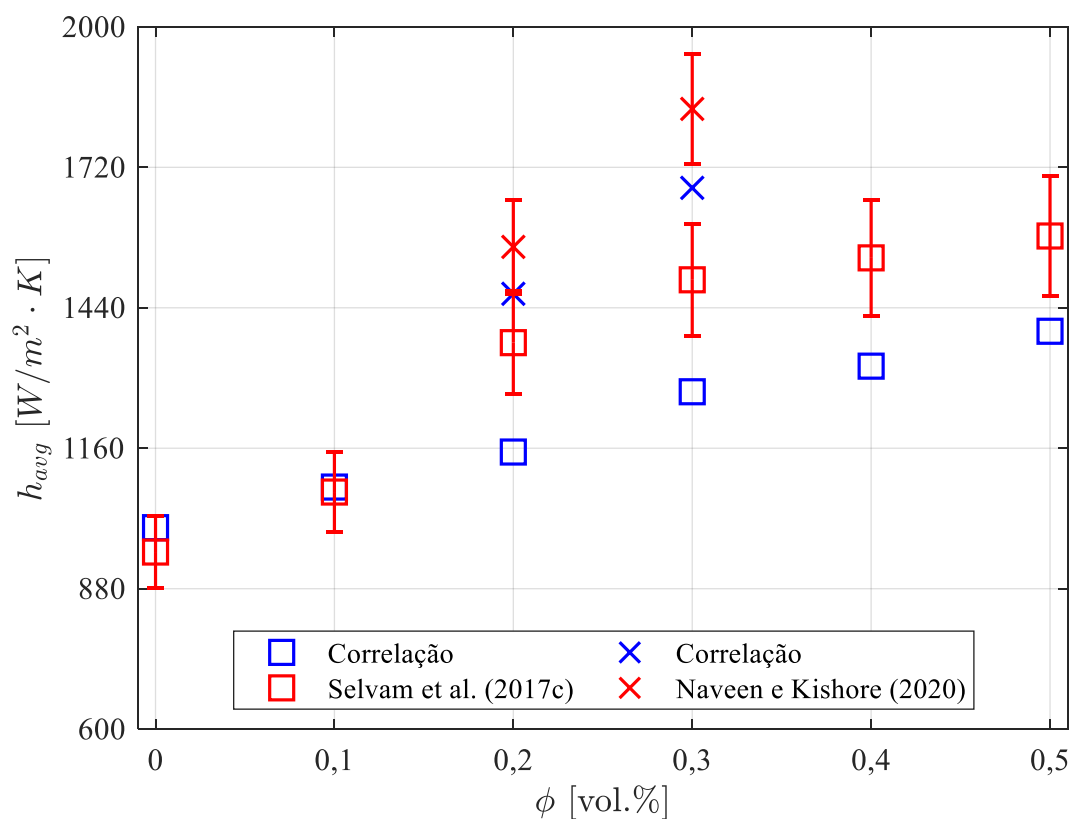


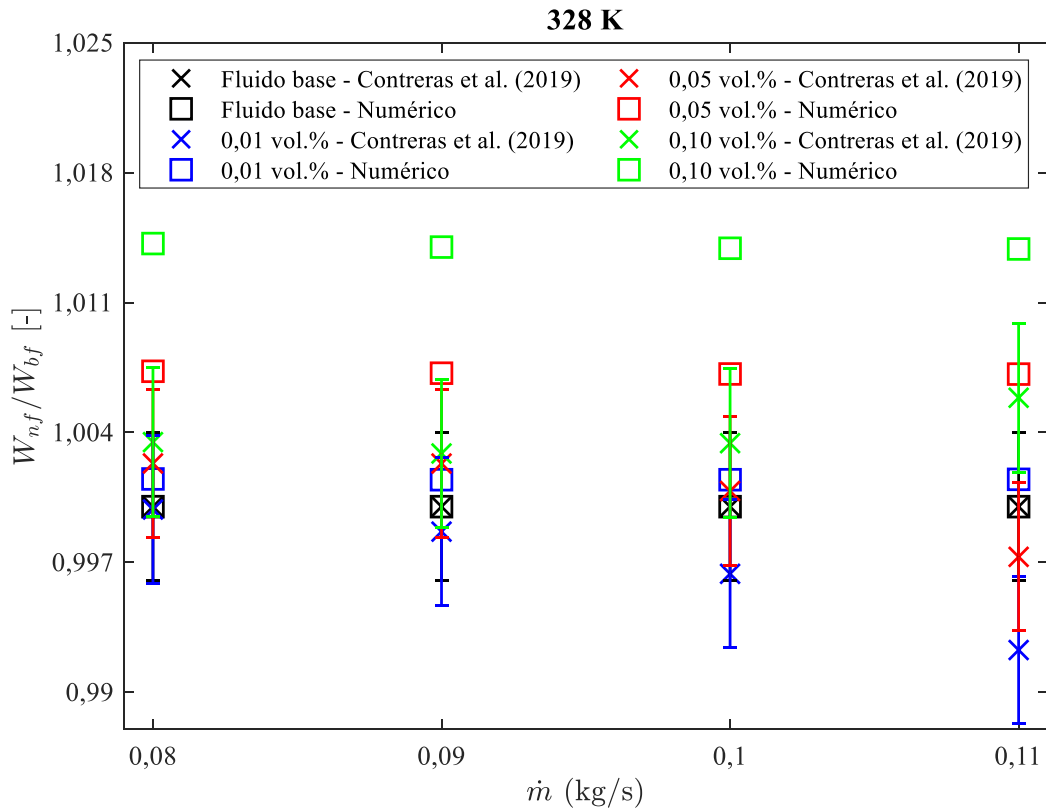
Figura 4.8 – Comparação de resultados experimentais com a correlação

Desta forma, a correlação foi considerada satisfatória, visto que as poucas correlações sobre nanofluidos de grafeno em trocadores de calor apresentam discrepâncias superiores, como no trabalho de Upadhyay *et al.* (2021) que obtiveram diferenças em superiores a 20% para concentração máxima de aproximadamente 0,05 vol.%.

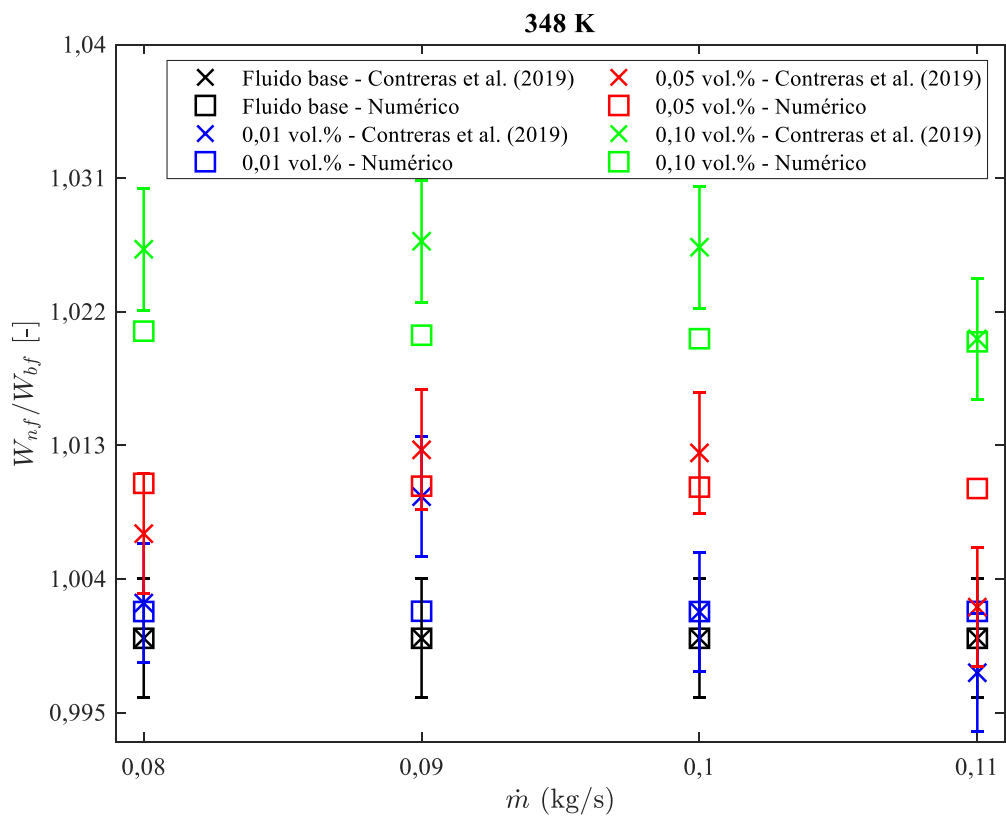
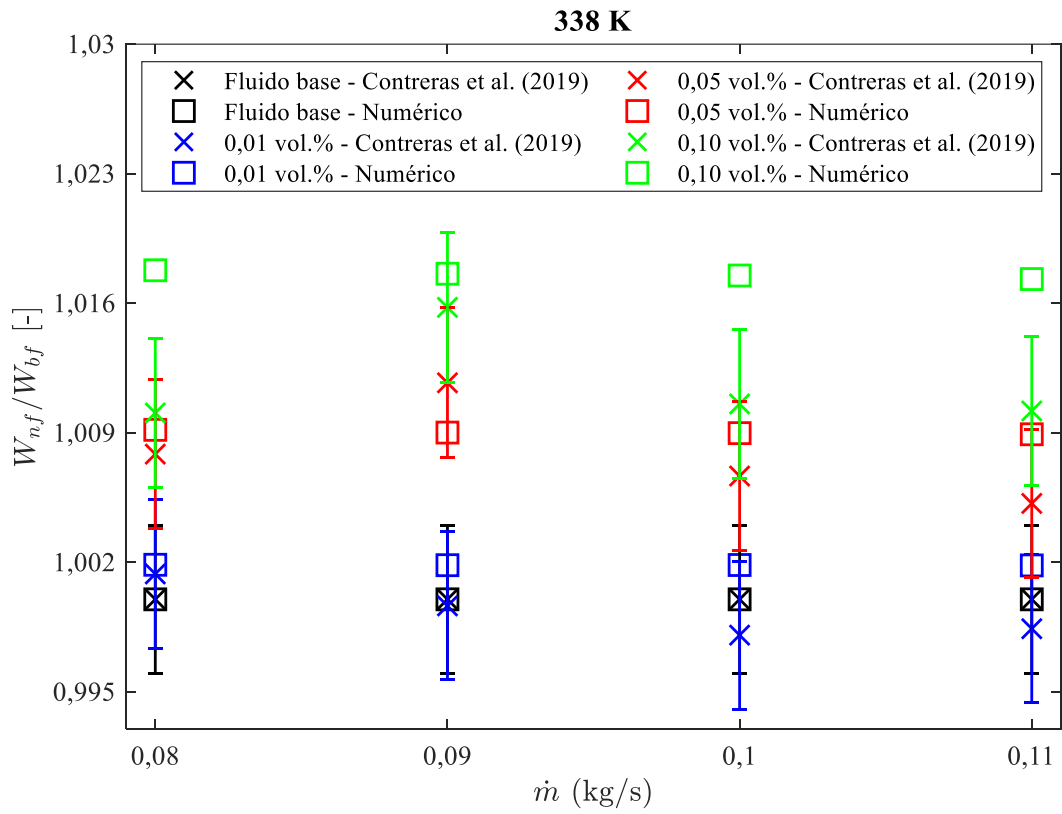
#### 4.4 Potência de bombeamento

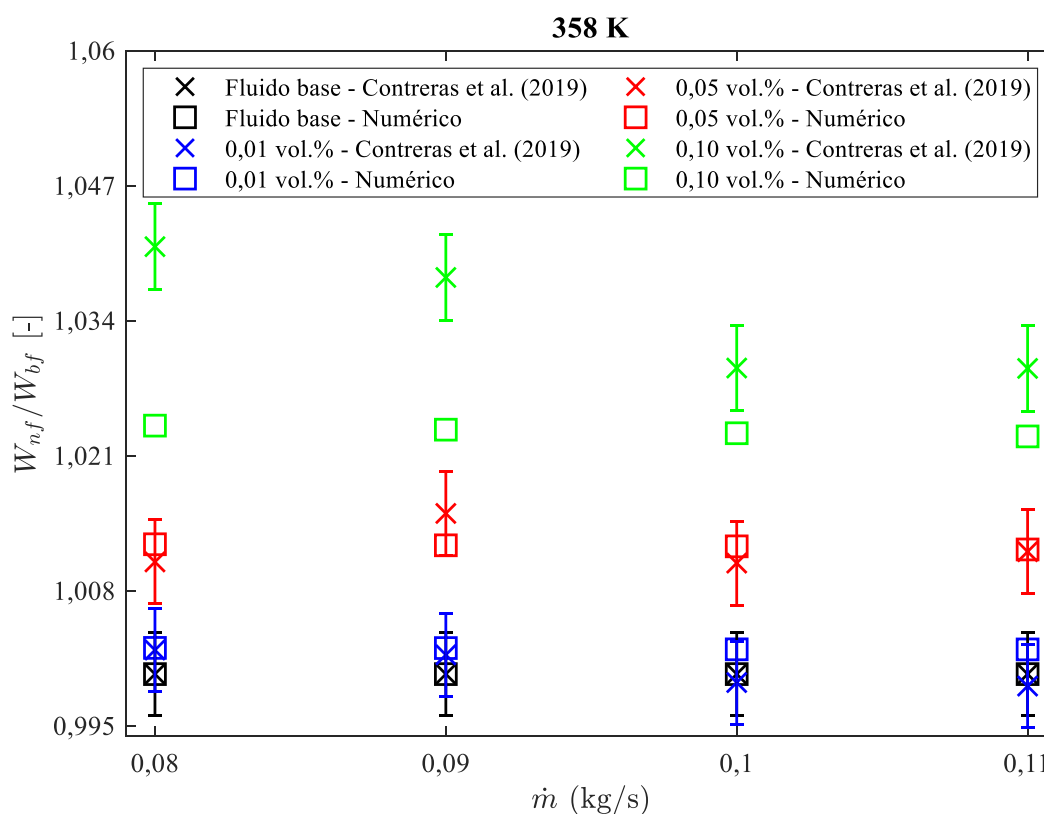
Para aplicações práticas dos nanofluidos em radiadores automotivos, além da transferência de calor, faz-se necessário avaliar o comportamento hidráulico do escoamento. Apesar da presença de nanopartículas aumentarem a transferência de calor, a viscosidade dinâmica do líquido de arrefecimento tende a aumentar, e por consequência o incremento da potência de bombeamento.

Conforme poder ser observado na Fig. 4.9, apesar da queda de pressão apresentar crescimento com o incremento da vazão (quanto maior o número de Reynolds, maior será a tensão de cisalhamento), os incrementos da potência de bombeamento em função do uso de nanopartículas tendem a ter um comportamento constante com o aumento da vazão mássica, assim como também foi observado por Contreras *et al.* (2019).



(a)





(d)

Figura 4.9 - Potência de bombeamento em função da vazão mássica

A partir dos resultados numéricos, foi identificado que a inserção de nanopartículas elevou a potência de bombeamento em até 2,39%, devido ao aumento da viscosidade dinâmica, ou seja, para todos os casos simulados a potência de bombeamento dos nanofluidos apresenta valores próximos ao fluido base. Este comportamento também foi observado nos resultados experimentais de Contreras *et al.* (2019). Isto pode ser explicado, pelo fato que o aumento da queda de pressão depender fracamente da concentração volumétrica para baixas concentrações de grafeno, dado o baixo incremento na viscosidade dinâmica (AKHAVAN-ZANJANI *et al.*, 2016; SELVAM *et al.*, 2017c; NADDAF *et al.*, 2019).

Além disso, quando a vazão mássica é mantida constante, e a concentração de nanopartículas aumenta, ocorre o aumento da viscosidade dinâmica, e por consequência promove a redução do número de Reynolds, reduzindo a queda de pressão. Em alguns trabalhos experimentais, como os de Naveen e Kishore (2020) e Bai *et al.* (2020), observou-se a redução do fator de atrito com a adição de nanoplaquetas de grafeno e óxido de grafeno quando comparado ao fluido base na mesma vazão de entrada.



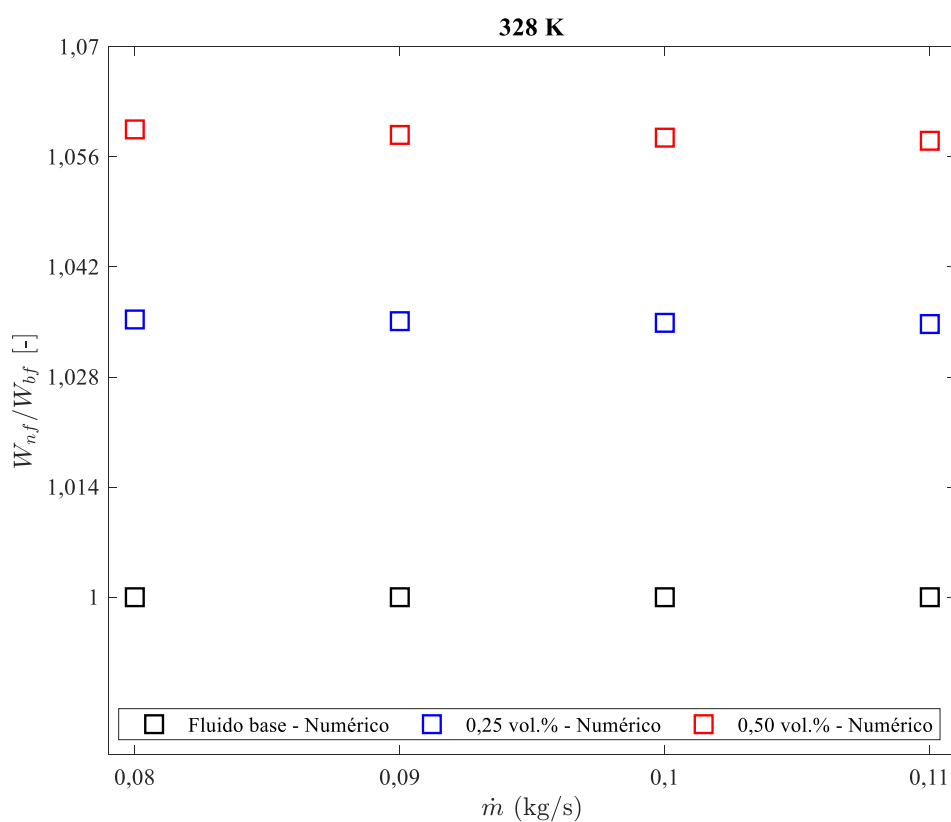
Na Tab. 4.5 estão dispostas as variações na queda de pressão obtidas numericamente com a adição de nanopartículas de grafeno. Além disso, foi feita a comparação desses resultados com os obtidos experimentalmente por Ranjbarzadeh *et al.* (2017), Selvam *et al.* (2017a), Ranjbarzadeh *et al.* (2017), Contreras *et al.* (2019) e Sarafraz *et al.* (2019). Foi identificado que as variações obtidas numericamente apresentam concordância satisfatória com os resultados experimentais, principalmente com os dados de Contreras *et al.* (2019). As diferenças podem ser explicadas pelo fato de Selvam *et al.* (2017a) e Naveen e Kishore (2020) surfactantes para aumentar a estabilidade dos nanofluidos. Ranjbarzadeh *et al.* (2017) e Sarafraz *et al.* (2019) utilizaram o número de Reynolds fixo, ou seja, foi necessário aumentar a vazão mássica para manter o número de Reynolds do fluido base, e por consequência tem-se um aumento da queda de pressão não apenas pela adição de nanopartículas.

Tabela 4.5 - Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais

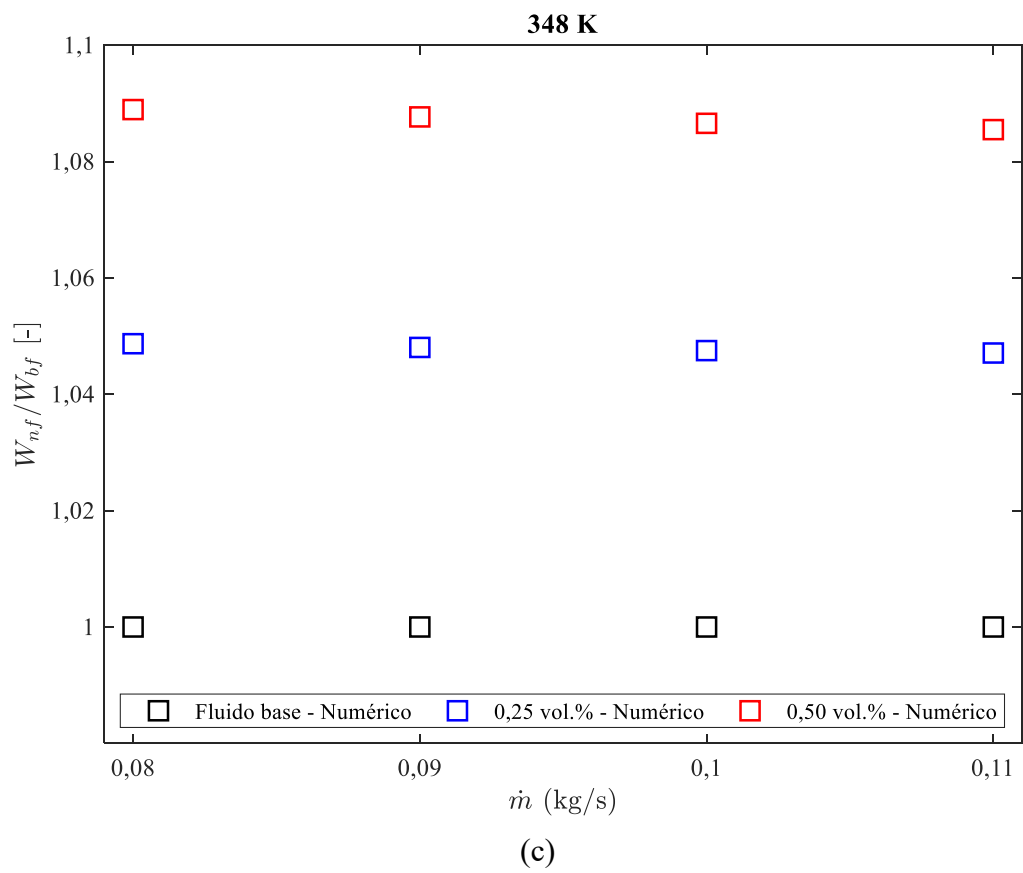
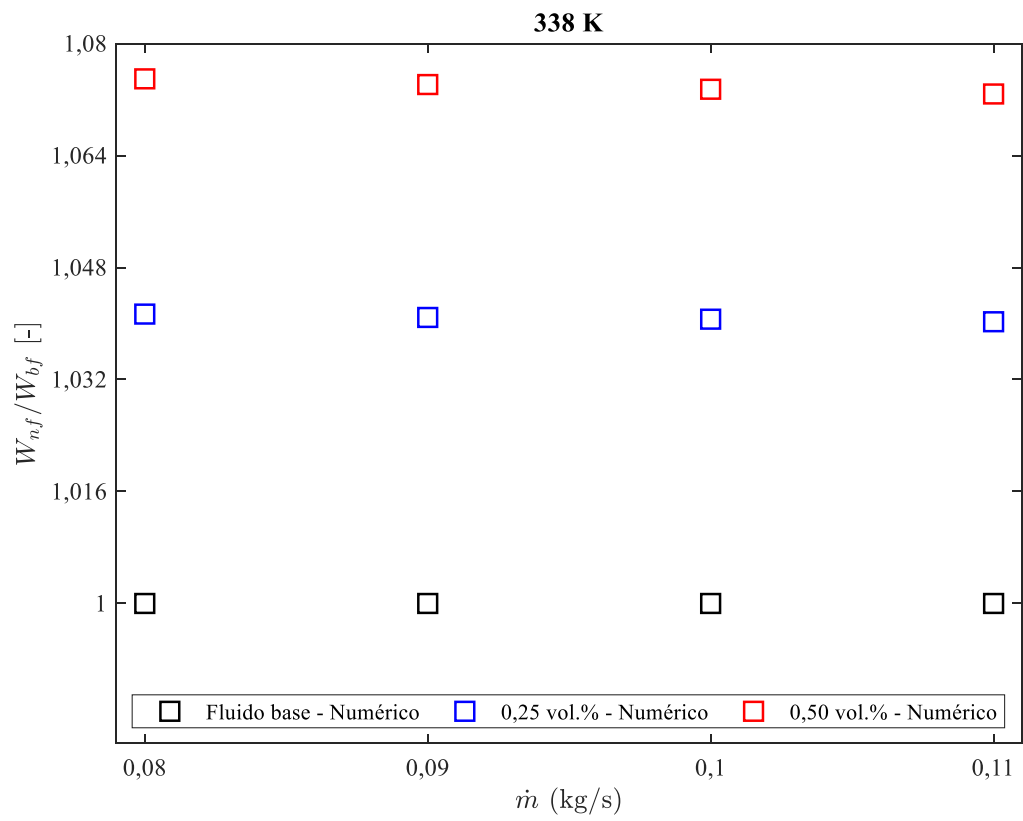
Parâmetro	Concentração	Número de Reynolds	Temperatura de entrada	Nanofluido	$\Delta p_{nf}/\Delta p_{bf}$
Presente trabalho	0,10 vol.%	1169	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,02
Contreras <i>et al.</i> (2019)	0,10 vol.%	1169	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,01
Sarafraz <i>et al.</i> (2019)	0,10 vol.%	1100	-	GNP/EG-água (40:60 vol.%)	1,07
Ranjbarzadeh <i>et al.</i> (2017)	0,10 vol.%	1250	-	GO/água	1,08
Presente trabalho	0,10 vol.%	1801	338 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,02
Contreras <i>et al.</i> (2019)	0,10 vol.%		328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,02
Selvam <i>et al.</i> (2017a)	0,10 vol.%	1704	318 K	GNP/EG-água (30:70 vol.%)	1,001
Presente trabalho	0,05 vol.%	1443	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,01
Contreras <i>et al.</i> (2019)	0,05 vol.%		328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,01
Sarafraz <i>et al.</i> (2019)	0,05 vol.%	1500	-	GNP/EG-água (40:60 vol.%)	1,06
Ranjbarzadeh <i>et al.</i> (2017)	0,05 vol.%	1250	-	GO/água	1,04

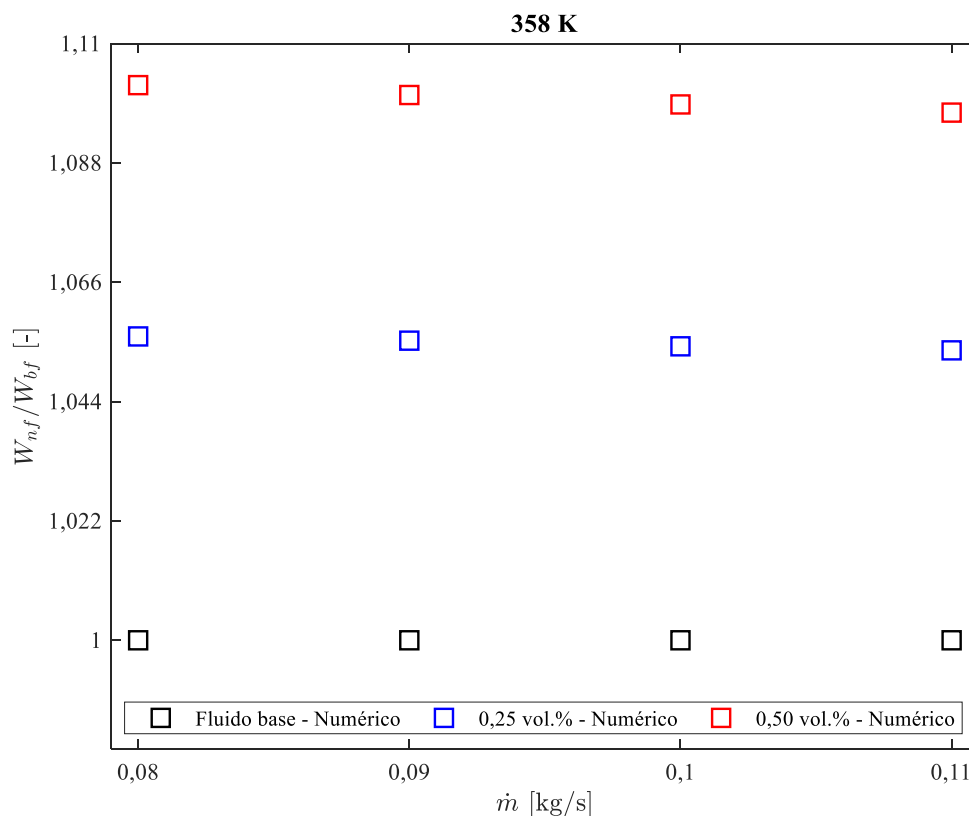
#### 4.4.1 Potência de bombeamento para maiores concentrações

Como era esperado, assim como em baixas em concentrações, a potência de bombeamento apresentou aumento com o incremento de nanopartículas de grafeno, conforme está disposto na Fig. 4.10. Foi identificado o aumento máximo da potência bombeamento de 10,23% em relação ao fluido base para a concentração volumétrica de nanopartículas de 0,5%. O aumento da vazão mássica não influenciou de forma significativa nos incrementos da potência de bombeamento, assim como foi observado para os nanofluidos com concentrações volumétricas de nanopartículas de grafeno de até 0,10%. Estes resultados são um indicativo dos resultados promissores dos nanofluidos de grafeno, pois, geralmente, os radiadores automotivos operam com vazões mássicas superiores às analisadas neste trabalho.



(a)





(d)

Figura 4.10 - Potência de bombeamento para maiores concentrações em função da vazão mássica

O aumento da temperatura de entrada do fluido de arrefecimento tem efeito positivo na potência de bombeamento em que foi observada a redução em até 19,21% para vazão e concentração de nanopartículas mantidas fixas. Ao se manter a concentração de nanopartículas e a temperatura de entrada fixas, foi identificado o incremento da potência de bombeamento em até 85,69% com o aumento da vazão mássica entre 0,08 - 0,11 kg/s.

Na Tab. 4.6 estão dispostas as variações na queda de pressão devido à adição de nanopartículas de grafeno de 0,25 vol.% e 0,50 vol.% em relação ao fluido base. Os dados são comparados com os resultados experimentais de Ranjbarzadeh *et al.* (2017) e Selvam *et al.* (2017a). Os resultados são considerados satisfatórios e a diferença encontradas em relação ao trabalho de Ranjbarzadeh *et al.* (2017) pode ser explicada pelo fato de no trabalho experimental terem utilizado o número de Reynolds fixo, o que tendem a aumentar a vazão mássica, e por consequência o aumento da queda de pressão não apenas pela adição de nanopartículas. Singh *et al.* (2021) obtiveram experimentalmente um incremento médio na queda de pressão de

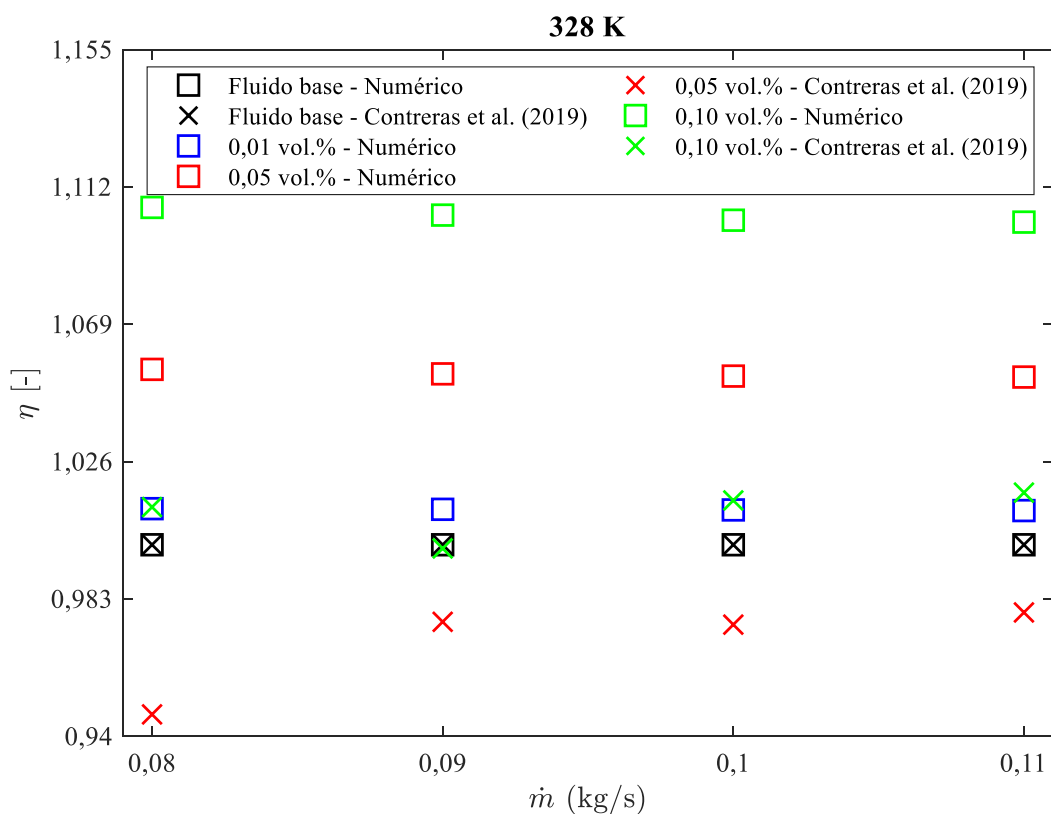
aproximadamente 30% para um nanofluido com concentração volumétrica de 1% em regime turbulento.

Tabela 4.6- Comparação dos ganhos obtidos para maiores concentrações com resultados experimentais

Parâmetro	Concentração	Número de Reynolds	Temperatura de entrada	Nanofluido	$\Delta p_{nf}/\Delta p_{bf}$
Presente trabalho	0,25 vol.%	1310	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,04
Ranjbarzadeh <i>et al.</i> (2017)	0,20 vol.%	1250	-	GO/água	1,10
Presente trabalho	0,25 vol.%	1981	338 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,04
Selvam <i>et al.</i> (2017a)	0,20 vol.%	1953	318 K	GNP/EG-água (30:70 vol.%)	1,23
Selvam <i>et al.</i> (2017a)	0,30 vol.%	1840	318 K	GNP/EG-água (30:70)	1,29
Presente trabalho	0,50 vol.%	1621	338 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,08
Selvam <i>et al.</i> (2017a)	0,50 vol.%	1704	318 K	GNP/EG-água (30:70 vol.%)	1,49

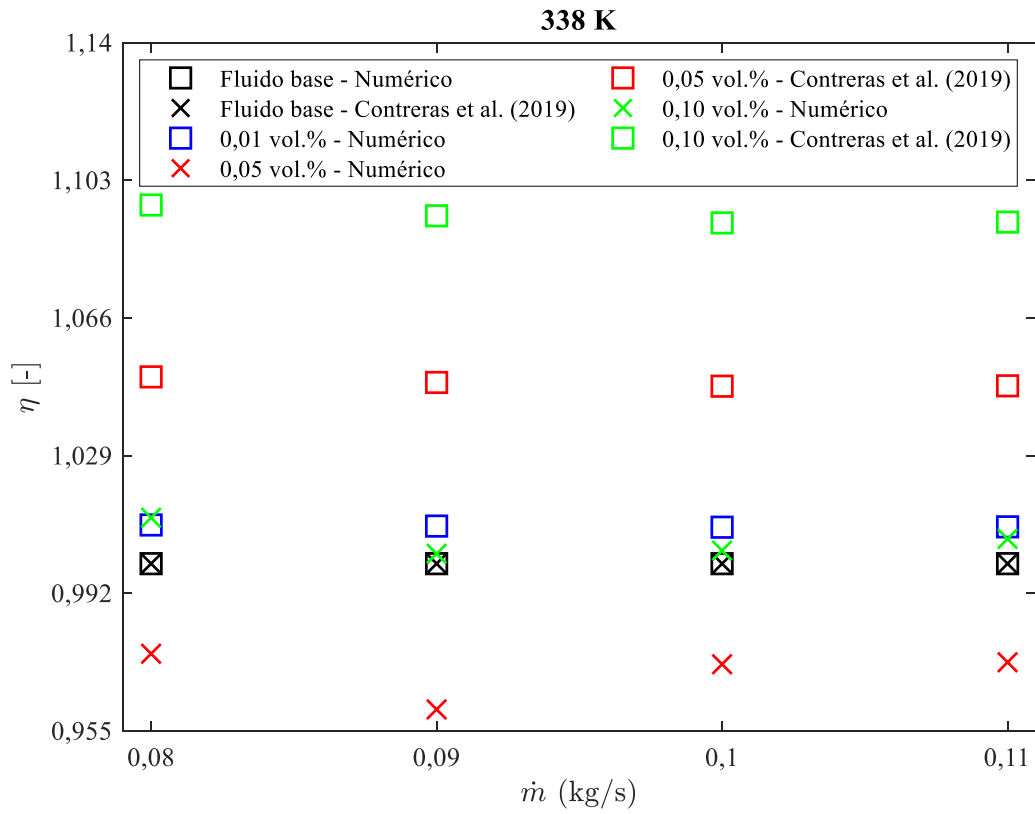
#### 4.5 Coeficiente de desempenho termohidráulico

O coeficiente de desempenho termohidráulico (CDT) pode ser definido como a razão entre as variações da taxa de transferência de calor e da queda de pressão entre o nanofluido e o fluido base (AMIRI *et al.*, 2015). O CDT dos nanofluidos em função da vazão volumétrica para a faixa de temperatura de 328 – 358 K se mostra na Fig. 4.11. Os dados obtidos numericamente são sempre maiores que 1, ou seja, todos os nanofluidos estudados têm melhor desempenho que o fluido base. Desta forma, a transferência de calor melhora numa taxa maior do que a queda de pressão, que aumenta em função do incremento da viscosidade (pela inserção de nanopartículas).

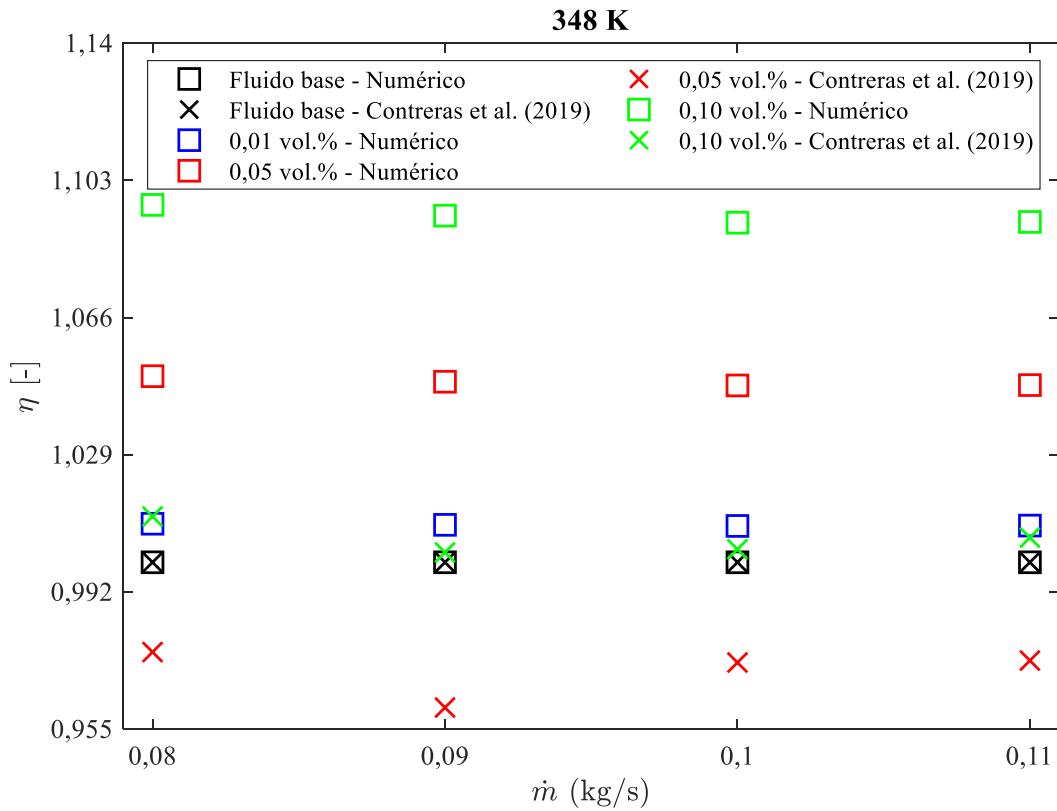


(a)

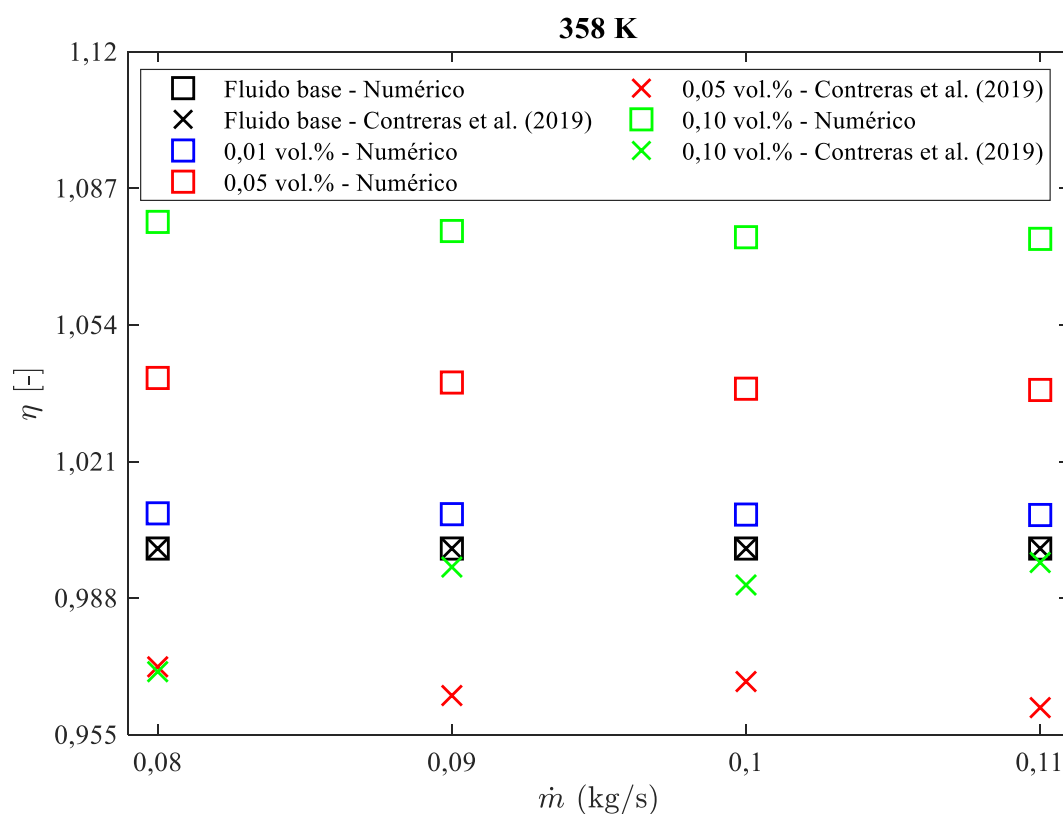




(b)



(c)



(d)

Figura 4.11 - Coeficiente de desempenho termohidráulico em função da vazão mássica

Na Fig. 4.11 ainda se observa que numericamente o CDT aumenta com a concentração volumétrica de grafeno, e o CDT se mantém quase constante com o aumento da vazão mássica. O valor máximo foi de 1,1033 para a maior concentração volumétrica de grafeno e menor vazão volumétrica. Este comportamento se deve ao fato de que as variações da taxa de transferência de calor e a queda de pressão (devido à adição de nanopartículas) não terem influência significativa da vazão mássica. Além disso, foi observada a diminuição do CDT em função do aumento da temperatura de entrada do líquido de arrefecimento, assim como nos resultados encontrados por Contreras *et al.* (2019), Contreras e Bandarra Filho (2022) e Nascimento *et al.* (2024).

Na Tab. 4.7 está disposta uma comparação do desempenho termohidráulico dos nanofluidos grafeno obtidos numericamente neste trabalho, e com os resultados experimentais de Contreras *et al.* (2019) e Sarafraz *et al.* (2019). Foi identificado que o CDT obtido numericamente apresenta concordância satisfatória com resultados experimentais de Sarafraz *et al.* (2019). Em relação aos dados de Contreras *et al.* (2019), os resultados apresentam

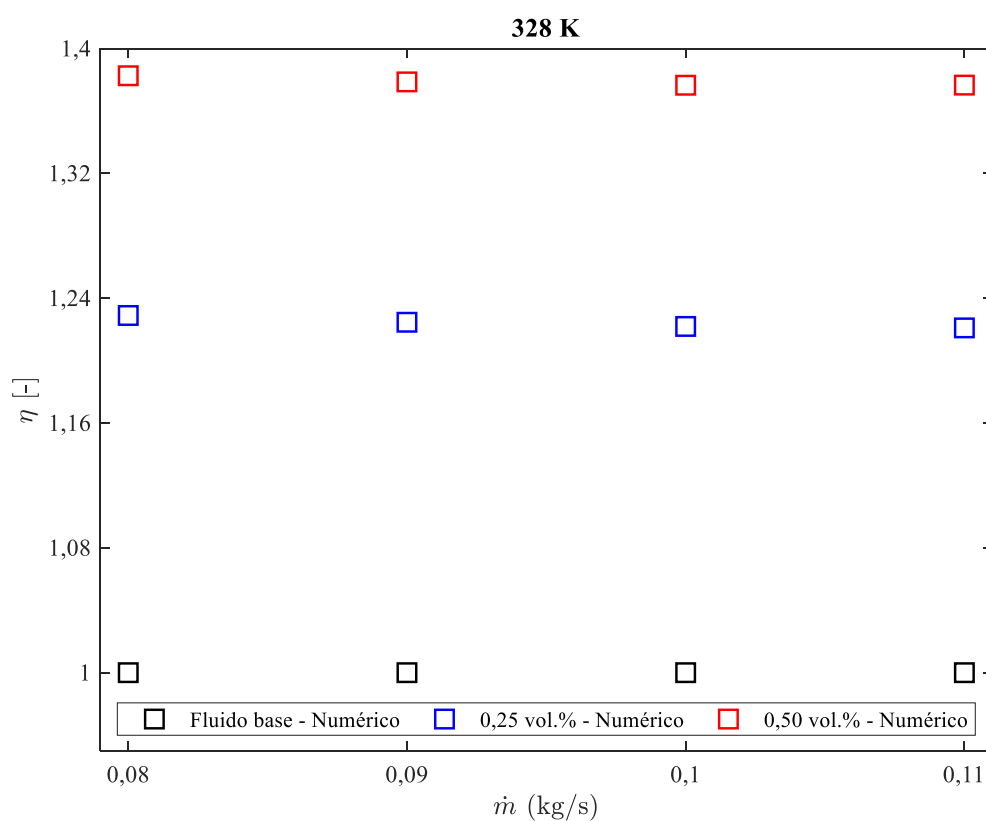
diferenças consideráveis que podem ser explicadas pela taxa de transferência de calor para os nanofluidos.

Tabela 4.7 - Comparação dos ganhos obtidos com resultados experimentais

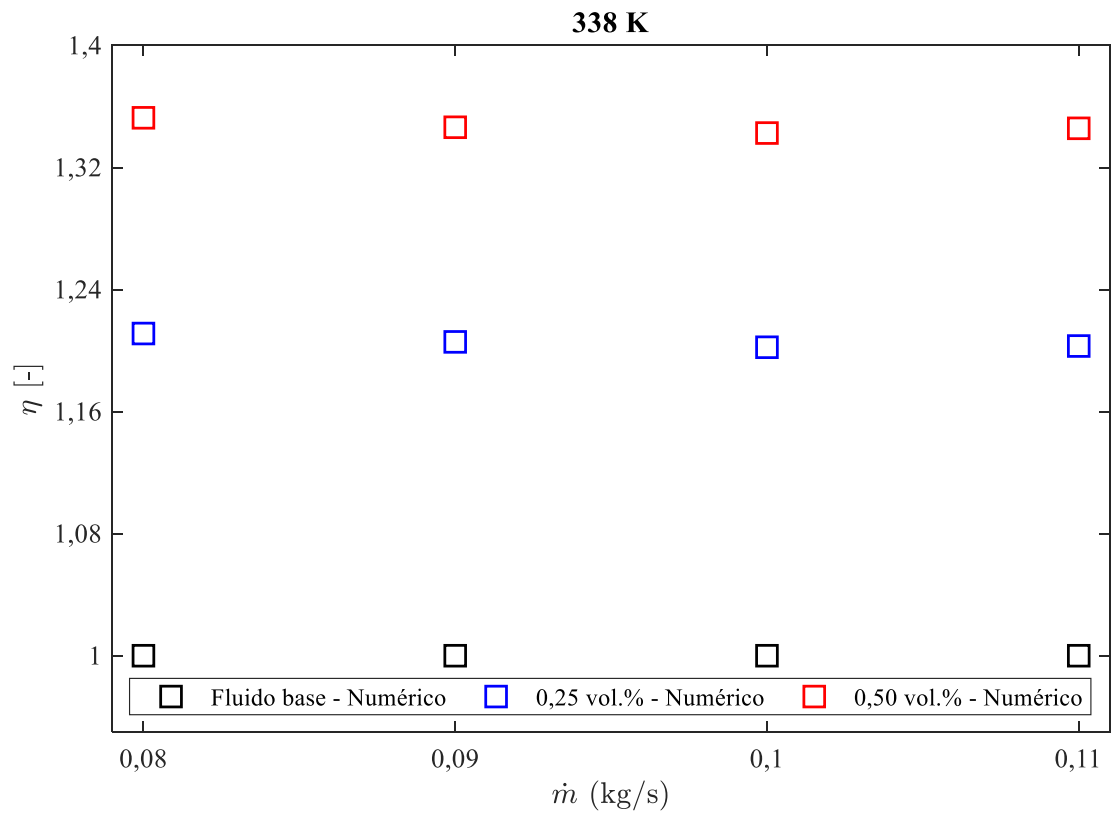
Parâmetro	Concentração	Número de Reynolds	Temperatura de entrada	Nanofluido	$\eta$
Presente trabalho	0,10 vol.%	1607	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,10
Contreras <i>et al.</i> (2019)	0,10 vol.%	1607	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,02
Sarafraz <i>et al.</i> (2019)	0,10 vol.%	1500	-	GNP/EG-água (40:60 vol.%)	1,10
Presente trabalho	0,05 vol.%	1609	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	1,05
Contreras <i>et al.</i> (2019)	0,05 vol.%	1609	328 K	Grafeno/EG-água (50:50 vol.%)	0,98
Sarafraz <i>et al.</i> (2019)	0,05 vol.%	1500	-	GNP/EG-água (40:60 vol.%)	1,06

#### 4.5.1 Coeficiente de desempenho termohidráulico para maiores concentrações

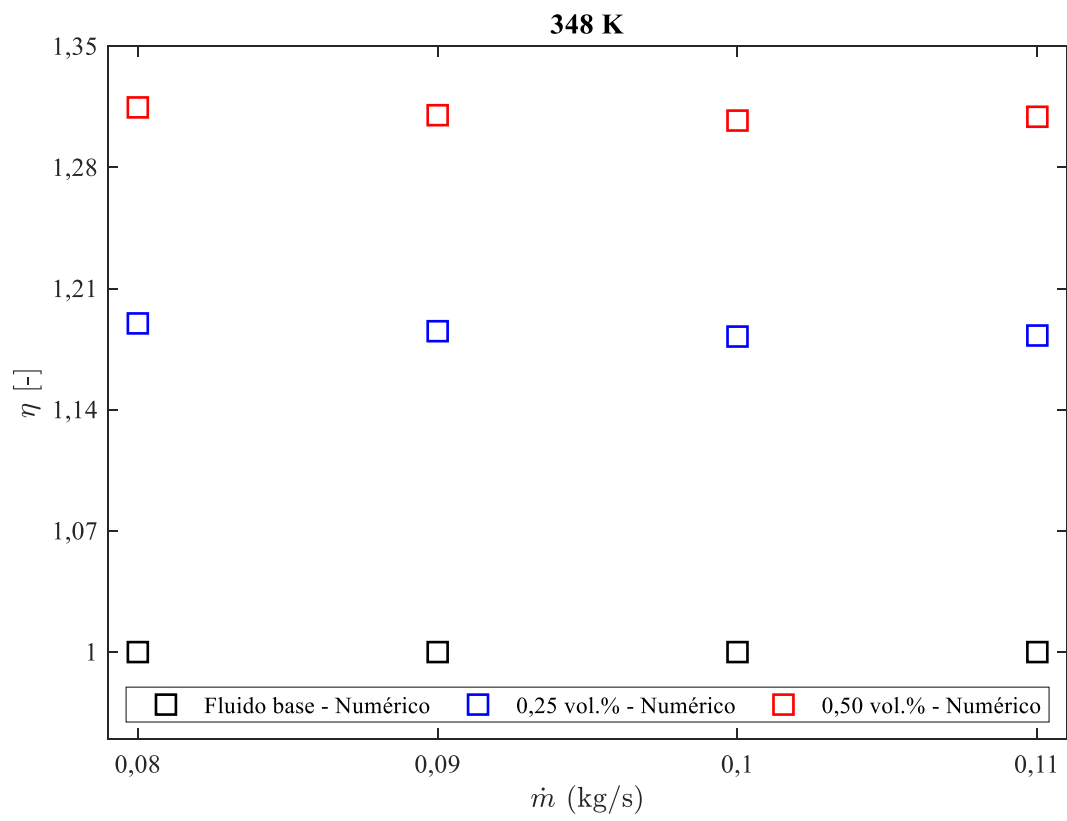
Na Fig. 4.12 estão ilustrados os resultados do coeficiente de desempenho termohidráulico obtidos numericamente neste trabalho para as concentrações volumétricas de nanopartículas de grafeno de 0,25% e 0,50%. Foi identificado que o melhor CDT foi para o nanofluido com concentração volumétrica de 0,5% com o valor de 1,38. Assim como para os nanofluidos com concentração de até 0,10 vol.%, foi observado que o coeficiente de desempenho termohidráulico não apresenta influência significativa da vazão mássica.



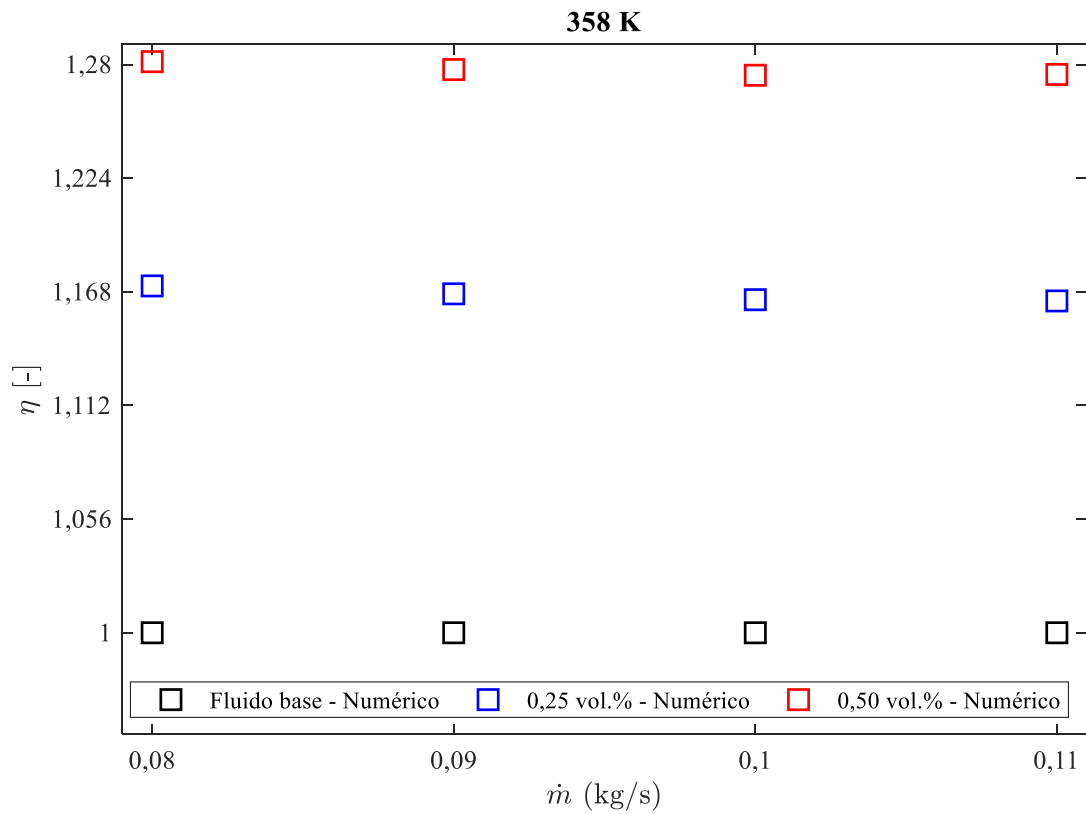
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.12 - Coeficiente de desempenho termohidráulico maiores concentrações em função da vazão mássica

Desta forma, pode-se afirmar que os nanofluidos de grafeno analisados apresentam potencial para a aplicação em radiadores automotivos. Os ganhos na taxa de transferência de calor superam os aumentos da queda de pressão proveniente da adição de nanopartículas de grafeno.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, pode-se ter como conclusões que o desempenho termohidráulico de nanofluidos de grafeno/EG-água em um radiador automotivo foram investigados numericamente e comparados com resultados experimentais disponíveis na literatura. Os efeitos da concentração volumétrica, vazão mássica e temperatura de entrada sobre a transferência de calor e a potência de bombeamento foram examinadas. As principais descobertas podem ser resumidas da seguinte forma:

- A taxa de transferência de calor é dependente da vazão mássica, temperatura de entrada e da concentração volumétrica de nanopartículas. Por exemplo, foram observados incrementos de até 47,3% para a maior concentração de nanopartículas de grafeno.

- O coeficiente convectivo de transferência de calor médio aumenta com a vazão mássica, temperatura de entrada e com a concentração de nanopartículas para a faixa estudada. Considerando a vazão mássica constante, o  $h_{avg}$  aumentou em até 26,32% para a maior concentração volumétrica de grafeno.

- A potência de bombeamento aumentou tanto com a vazão mássica, quanto com a concentração volumétrica de nanopartículas de grafeno. Para a maior concentração de nanopartículas foi observado o aumento de 10,23% na potência de bombeamento. Mas o aumento da temperatura de entrada acarreta redução da queda de pressão.

- O coeficiente de performance termohidráulico dos nanofluidos demonstrou que todos os nanofluidos analisados numericamente neste trabalho apresentam resultados promissores para aplicações em radiadores automotivos.



- A escolha da metodologia para avaliação do desempenho térmico de nanofluidos deve ser feita com a vazão mássica constante ao invés do número de Reynolds fixo. O número de Reynolds fixo tende a mascarar a real influência das nanopartículas.

### **5.1 Recomendações para trabalhos futuros**

Neste trabalho, apresentou-se uma análise numérica sobre o desempenho termohidráulico de nanofluidos de grafeno/EG-água em um radiador automotivo. Entretanto, alguns aspectos não foram explorados ou não foram aprofundados. Desta forma, a seguir são destacadas algumas recomendações para trabalhos futuros.

- Avaliar o desempenho dos nanofluidos para velocidades do ar próximas às condições reais;

- Avaliar o desempenho dos nanofluidos em vazões e temperaturas de entrada maiores, pois, os radiadores automotivos trabalham principalmente nestas condições;

- Propor modelos numéricos para a modelagem do escoamento e a transferência de calor de nanofluidos com nanopartículas não esféricas;

- Definir uma metodologia robusta para produção de nanofluidos, pois, a maioria dos trabalhos baseia-se apenas em outros trabalhos disponíveis na literatura;

- São necessários mais estudos que consigam capturar de forma detalhada os possíveis efeitos erosivos e de abrasão dos nanofluidos de grafeno nos trocadores de calor;

- Propor uma metodologia para produção de nanofluidos que reduza os custos com a compra de equipamentos sofisticados.

## REFERÊNCIAS

ABBAS, F.; ALI, H.M.; SHABAN, M.; JANJUA, M.M.; SHAH, T.R.; DORANEHGARD, M.H.; AHMADLOUYDARAB, M.; FARUKH, F. Towards convective heat transfer optimization in aluminum tube automotive radiators: potential assessment of novel Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>/water hybrid nanofluid. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 124, p. 424-436, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.02.002>

ABBAS, F.; ALI, H. M.; SHAH, T. R.; BABAR, H.; JANJUA, M. M.; SAJJAD, U.; AMER, M. Nanofluid: potential evaluation in automotive radiator. **Journal of Molecular Liquids**, v. 297, p. 112014-112039, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112014>

ABDRABBUH, O. A.; OON, C. S.; KAZI, S. N.; ABDELRAZEK, A. H.; AHMED, W.; MALLAH, A. R.; BADARUDIN, A.; BADRUDDIN, I.A.; KAMANGAR, Sarfaraz. An experimental investigation of eco-friendly treated GNP heat transfer growth: circular and square conduit comparison. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 145, n. 1, p. 139-151, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09652-5>

AFOLALU, S.A.; IKUMAPAYI, O.M.; OGEDENGBE, T.S.; EMETERE, M.E.; JEN, T.; AKINLABI, E.T. Experimental approach to bio-waste nanoparticles suitable for radiator coolant. **Advances in Materials and Processing Technologies**, p. 1-15, 2023. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2192388>

AGROMAYOR, R.; CABALEIRO, D.; PARDINAS, A.; VALLEJO, J.; FERNANDEZ-SEARA, J.; LUGO, L. Heat transfer Performance of functionalized graphene nanoplatelet Aqueous Nanofluids. **Materials**, v. 9, n. 6, p. 455, 2016. <https://doi.org/10.3390/ma9060455>

AHMAD, H.; AL-KHALED, K.; SOWAYAN, A.S.; ABDULLAH, M.; HUSSAIN, M.; HAMMAD, A.; KHAN, S.U.; TLILI, I. Experimental investigation for automotive radiator heat transfer performance with ZnO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water-based hybrid nanoparticles: an improved thermal model. **International Journal of Modern Physics B**, v. 37, n. 05, 2022. <https://doi.org/10.1142/S0217979223500509>

AHMED, S.A.; OZKAYMAK, M.; SÖZEN, A.; MENLIK, T.; FAHED, A. Improving car radiator performance by using TiO<sub>2</sub>-water nanofluid. **Engineering Science and Technology**,

an **International Journal**, v. 21, n. 5, p. 996-1005, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.07.008>

AICH, W.; KHLISSA, F.; ALSHAMMARI, B.M.; KOLSI, L. Experimental study of graphene-based nanofluid dispersions stability for efficient heat transmission within a concentric tube heat exchanger. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 59, p. 104523, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104523>

AJEEB, W.; SILVA, R.R.S.T.; MURSHED, S.M.S. Experimental investigation of heat transfer performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in a compact plate heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, v. 218, p. 119321, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119321>

AJEEB, W.; MURSHED, S.M.S. Nanofluids in compact heat exchangers for thermal applications: a state-of-the-art review. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 30, p. 101276, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101276>

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, 2019a. <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, 2019b. <https://doi.org/10.1615/JEnhHeatTransf.2019028304>

AKBARI, M.; GALANIS, N.; BEHZADMEHR, A. Comparative assessment of single and two-phase models for numerical studies of nanofluid turbulent forced convection. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 37, p. 136-146, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2012.05.005>

AKHAVAN-ZANJANI, H.; SAFFAR-AVVAL, M.; MANSOURKIAEI, M.; SHARIF, F.; AHADI, M. Experimental investigation of laminar forced convective heat transfer of Graphene–water nanofluid inside a circular tube. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 100, p. 316-323, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.10.003>

AKRAM, N.; MONTAZER, E.; KAZI, S.N.; SOUDAGAR, M.E.M.; AHMED, W.; ZUBIR, M.N.M.; AFZAL, A.; MUHAMMAD, M.R.; ALI, H.M.; MÁRQUEZ, F.P.G. Experimental investigations of the performance of a flat-plate solar collector using carbon and metal oxides based nanofluids. **Energy**, v. 227, p. 120452, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120452>

AL-RASHED, A.A.A.A.; SHAHSAVAR, A.; RASOOLI, O.; MOGHIMI, M.A.; KARIMIPOUR, A.; TRAN, M.D. Numerical assessment into the hydrothermal and entropy generation characteristics of biological water-silver nano-fluid in a wavy walled microchannel heat sink. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 104, p. 118-126, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.03.007>

ALAWI, O.A.; KAMAR, H.M.; MOHAMMED, H.A.; MALLAH, A.R.; HUSSEIN, O.A. Energy efficiency of a flat-plate solar collector using thermally treated graphene-based nanofluids: experimental study. **Nanomaterials and Nanotechnology**, v. 10, p. 184798042096461, 2020. <https://doi.org/10.1177/1847980420964618>

ALBOJAMAL, A.; VAFAI, K. Analysis of single phase, discrete and mixture models, in predicting nanofluid transport. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 114, p. 225-237, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.030>

ALI, N. Graphene-Based Nanofluids: production parameter effects on thermophysical properties and dispersion stability. **Nanomaterials**, v. 12, n. 3, p. 357, 2022. <https://doi.org/10.3390/nano12030357>

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, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03427-1>

ALI, N.; BAHMAN, A.M.; ALJUWAYHEL, N.F.; EBRAHIM, S.A.; MUKHERJEE, S.; ALSAYEGH, A. Carbon-Based Nanofluids and Their Advances towards Heat Transfer Applications—A Review. **Nanomaterials**, v. 11, n. 6, p. 1628, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11061628>

ALOSIOUS, S.; R, S.S.; NAIR, A.R; KRISHNAKUMAR, K. Experimental and numerical study on heat transfer enhancement of flat tube radiator using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanofluids. **Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 12, p. 3545-3563, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2061-0>

American Society of Mechanical Engineers (ASME). Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer. American Society of Mechanical Engineers, 2009.

AMIRI, A.; SADRI, R.; SHANBEDI, M.; AHMADI, G.; KAZI, S.N.; CHEW, B.T.; ZUBIR, M.N.M. Synthesis of ethylene glycol-treated Graphene Nanoplatelets with one-pot, microwave-assisted functionalization for use as a high performance engine coolant. **Energy Conversion and Management**, v. 101, p. 767-777, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.019>

ARBAK, A.; ATTAR, A.; YAPAOZ, M.A.; ARMAĞAN, M.; BULBUL, Y.; DEMIR, E.K.; KARAGÖZ, Y. Experimental investigation of bimetallic nanoparticles heat transfer characteristics in automotive radiators. **Case Studies in Thermal Engineering**, p. 102763, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102763>

ARIF, M.; KUMAM, P.; KUMAM, W.; MOSTAFA, Z. Heat transfer analysis of radiator using different shaped nanoparticles water-based ternary hybrid nanofluid with applications: a fractional model. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 31, p. 101837, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101837>

ARORA, N.; GUPTA, M. An updated review on application of nanofluids in flat tubes radiators for improving cooling performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110242, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110242>

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, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.153>

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Handbook Fundamentals, 2013.

ASOKAN, N.; GUNNASEGARAN, P.; WANATASANAPPAN, V.V. Experimental investigation on the thermal performance of compact heat exchanger and the rheological properties of low concentration mono and hybrid nanofluids containing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanoparticles. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 20, p. 100727, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100727>

AWAIS, M.; BHUIYAN, A.A.; SALEHIN, S.; EHSAN, M.M.; KHAN, B.; RAHMAN, M. Hamidur. Synthesis, heat transport mechanisms and thermophysical properties of nanofluids: a critical overview. **International Journal of Thermofluids**, v. 10, p. 100086, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100086>

BA, T.L.; GRÓF, G.; ODHIAMBO, V.O.; WONGWISES, S.; SZILÁGYI, I.M. A CFD Study on Heat Transfer Performance of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> Nanofluids under Turbulent Flow. **Nanomaterials**, v. 12, n. 3, p. 299, 2022. <https://doi.org/10.3390/nano12030299>

BAE, S.; KIM, H.; LEE, Y.; XU, X.; PARK, J.; ZHENG, Y.; BALAKRISHNAN, J.; LEI, T.; KIM, H.R.; SONG, Y.I. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. **Nature Nanotechnology**, v. 5, n. 8, p. 574-578, 2010. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.132>

BAHIRAEI, M.; MONAVARI, A.; MOAYEDI, H. Second law assessment of nanofluid flow in a channel fitted with conical ribs for utilization in solar thermal applications: effect of

nanoparticle shape. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 151, p. 119387, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119387>

BAI, M.; LIU, J.; HE, J.; LI, W; WEI, J; CHEN, L; MIAO, J; LI, C. Heat transfer and mechanical friction reduction properties of graphene oxide nanofluids. **Diamond and Related Materials**, v. 108, p. 107982, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107982>

BALAJI, T.; SELVAM, C.; LAL, D. M.; HARISH, S. Enhanced heat transport behavior of micro channel heat sink with graphene based nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 117, p. 104716, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104716>

BARAI, D.P.; BHANVASE, B.A.; SAHARAN, V.K. Reduced Graphene Oxide-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposite Based Nanofluids: study on ultrasonic assisted synthesis, thermal conductivity, rheology, and convective heat transfer. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 58, n. 19, p. 8349-8369, 16 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05733>

BARTH, T.; JESPERSEN, D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. **27Th Aerospace Sciences Meeting**, 1989. <https://doi.org/10.2514/6.1989-366>

BEJJAM, R.B.; NIGUSIE, K.; WONDATIR, T.; WORKU, S. Numerical analysis of water, ethylene glycol and nanofluid based radiator using CFD. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 2431-2435, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.503>

BENEDICT, F.; KUMAR, A.; KADIRGAMA, K.; MOHAMMED, H.A.; RAMASAMY, D.; SAMYKANO, M.; SAIDUR, R. Thermal Performance of Hybrid-Inspired Coolant for Radiator Application. **Nanomaterials**, v. 10, n. 6, p. 1100, 2020. <https://doi.org/10.3390/nano10061100>

BHARADWAJ, B.R.; MOGERAYA, K S.; MANJUNATH, D.M.; PONANGI, B.R.; PRASAD, K.R.; KRISHNA, V. CFD analysis of heat transfer performance of graphene based hybrid nanofluid in radiators. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 346, p. 012084, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/346/1/012084>

BOLOTIN, K.I.; SIKES, K.J.; JIANG, Z.; KLIMA, M.; FUDENBERG, G.; HONE, J.; KIM, P.; STORMER, H.L. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. **Solid State Communications**, v. 146, n. 9-10, p. 351-355, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2008.02.024>

BORODE, A.O.; AHMED, N.A.; OLUBAMBI, P.A. A review of heat transfer application of carbon-based nanofluid in heat exchangers. **Nano-Structures & Nano-Objects**, v. 20, p. 100394, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100394>

BORODE, A.O.; AHMED, N.A.; OLUBAMBI, P.A. Electrochemical corrosion behavior of copper in graphene-based thermal fluid with different surfactants. **Heliyon**, v. 7, n. 1, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05949>

BORODE, A.O.; AHMED, N.A.; OLUBAMBI, P.A.; SHARIFPUR, M.; MEYER, J.P. Investigation of the Thermal Conductivity, Viscosity, and Thermal Performance of Graphene Nanoplatelet-Alumina Hybrid Nanofluid in a Differentially Heated Cavity. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, 20 2021b. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.737915>

BRINKMAN, H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. **The Journal of Chemical Physics**, v. 20, n. 4, p. 571-571, 1952. <https://doi.org/10.1063/1.1700493>

BUBBICO, R.; CELATA, G.P.; D'ANNIBALE, F.; MAZZAROTTA, B.; MENALE, C. Experimental analysis of corrosion and erosion phenomena on metal surfaces by nanofluids. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 104, p. 605-614, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.004>

BUONGIORNO, J.; VENERUS, D.C.; PRABHAT, N.; MCKRELL, T.; TOWNSEND, J.; CHRISTIANSON, R.; TOLMACHEV, Y.V.; KEBLINSKI, P.; HU, L.; ALVARADO, J.L. A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 106, n. 9, p. 094312, 2009. <https://doi.org/10.1063/1.3245330>

BUONOMO, B.; CIRILLO, L.; MANCA, O.; NARDINI, S. Effect of nanofluids on heat transfer enhancement in automotive cooling circuits. **Second International Conference on Material Science, Smart Structures and Applications: ICMSS-2019**, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5138764>

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

CHANDRASEKARAN, M.; PRAKASH, K.B.; SUBRAMANIYAN, C.; SANTHOSH, N.; TAMILARASAN, V.D. Experimental investigation on heavy duty engine radiator using cerium oxide nano fluid. **Materials Today: Proceedings**, v. 66, p. 1497-1500, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.284>

CHAURASIA, P.; KUMAR, A.; YADAV, A.; RAI, P.K.; KUMAR, V.; PRASAD, L. Heat transfer augmentation in automobile radiator using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water based nanofluid. **Sn Applied Sciences**, v. 1, n. 3, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0260-7>

CHOI, S.U.S.; EASTMAN, J.A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION. San Francisco, p. 1-8, 1995.

CIEŚLIŃSKI, J.T.; KOZAK, P. Experimental investigations of forced convection of nanofluids in smooth, horizontal, round tubes: a review. **Energies**, v. 16, n. 11, p. 4415, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16114415>

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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.014>

CONTRERAS, E.M.C.; BANDARRA FILHO, E.P. Heat transfer performance of an automotive radiator with MWCNT nanofluid cooling in a high operating temperature range. **Applied Thermal Engineering**, v. 207, p. 118149, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118149>

DHAIRIYASAMY, R.; AHMED, M.; ABDELRHMAN, Y.; AFZAL, A.; ESSA, F.; ALSEHLI, M.; ALY, A.; SALEH, B. Experimental investigation of thermophysical properties and heat transfer characteristics of hybrid nanofluids based on particle size. **Thermal Science**, v. 26, n. 5, p. 4193-4206, 2022. <https://doi.org/10.2298/TSCI210706005D>

DHAIRIYASAMY, R.; SALEH, B.; GOVINDASAMY, M.; ALY, A.A.; AFZAL, A.; ABDELRHMAN, Y. Effect of particle size on thermophysical and heat transfer properties of Ag nanofluid in a radiator – an experimental investigation. **Inorganic and Nano-Metal Chemistry**, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1080/24701556.2021.1980041>

DAS, S.K.; CHOI, S.U.; YU, W.; PRADEEP, T. **Nanofluids: Science and Technology**. John Wiley & Sons, 2007. <https://doi.org/10.1002/9780470180693>

DAS, S.; GIRI, A.; SAMANTA, S.; KANAGARAJ, S. Role of graphene nanofluids on heat transfer enhancement in thermosyphon. **Journal of Science: Advanced Materials and Devices**, v. 4, n. 1, p. 163-169, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2019.01.005>

DAYOU, S.; TING, T.W.; VIGOLO, B. Comparison of heat transfer performance of water-based graphene nanoplatelet- and multi-walled carbon nanotube-nanofluids in a concentric tube heat exchanger. **Diamond and Related Materials**, v. 125, p. 108976, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.108976>

DERISZADEH, A.; MONTE, F. On heat transfer performance of cooling systems using nanofluid for electric motor applications. **Entropy**, v. 22, n. 1, p. 99, 2020. <https://doi.org/10.3390/e22010099>

EFEMWENKIEKIE, K.U.; OYEDEPO, S.O.; GIWA, S.O.; SHARIFPUR, M.; OWOEYE, T.F.; AKINLABU, K.D.; MEYER, J.P. Experimental investigation of heat transfer



performance of novel bio-extract doped mono and hybrid nanofluids in a radiator. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 28, p. 101494, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101494>

EINSTEIN, A.; FURTH, R. **Investigations on the theory of the Brownian movement**. Nova York: Dover Publications, 1956.

EKICILER, R.; ÇETINKAYA, M.S.A. A comparative heat transfer study between monotype and hybrid nanofluid in a duct with various shapes of ribs. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 23, p. 100913, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100913>

ELIBOL, E.A.; TURGUT, O.; AKTAS, F.; SENOL, H.; CELIK, A.F. Experimental investigation on heat transfer and flow characteristics of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid in a heavy vehicle radiator. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11817-3>

ELOMAA, O.; SINGH, V.K.; IYER, A.; HAKALA, T.J.; KOSKINEN, J. Graphene oxide in water lubrication on diamond-like carbon vs. stainless steel high-load contacts. **Diamond and Related Materials**, v. 52, p. 43-48, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2014.12.003>

ELSAID, A.M. Experimental study on the heat transfer performance and friction factor characteristics of Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based H<sub>2</sub>O/(CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub> nanofluids in a vehicle engine radiator. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 108, p. 104263, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.05.009>

ELSAID, K.; ABDELKAREEM, M.A.; MAGHRABIE, H.M.; SAYED, E.T.; WILBERFORCE, T.; BAROUTAJI, A.; OLABI, A.G. Thermophysical properties of graphene-based nanofluids. **International Journal of Thermofluids**, v. 10, p. 100073, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100073>

ERDOĞAN, B.; ZENGİN, İ.; MERT, S.; TOPUZ, A.; ENGIN, T. The experimental study of the entropy generation and energy performance of nano-fluid flow for automotive radiators. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 24, n. 3, p. 655-664, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.10.007>

FADODUN, O.G.; AMOSUN, A.A.; SALAU, A.O.; OGUNDEJI, J.A. Numerical investigation of thermal performance of single-walled carbon nanotube nanofluid under turbulent flow conditions. **Engineering Reports**, v. 1, n. 1, 2019. <https://doi.org/10.1002/eng2.12024>

FARAJ, A.; FARAJ, J.; HARIKA, E.; HACHEM, F.; KHALED, M. Development of a new method for estimating the overall heat transfer coefficient of heat exchangers – Validation in automotive applications. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 28, p. 101434, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101434>

FARES, M.; AL-MAYYAH, M.; AL-SAAD, M. Heat transfer analysis of a shell and tube heat exchanger operated with graphene nanofluids. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 18, p. 100584, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100584>

FLUENT, A. User's Guide. **Ansys Fluent Theory Guide**. ANSYS Inc., USA, v. 15317, p. 724-46, 2013.

FUJIMOTO, K.; SHIBATA, A.; TORII, S. Numerical investigation of heat transfer enhancement of graphene nanofluid in turbulent flow conditions using the Lagrangian two-phase model. **Materials Today: Proceedings**, v. 66, p. 1591-1597, 2022a. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.245>

FUJIMOTO, K.; SHIBATA, A.; TORII, S. An experimental and numerical study of turbulent heat transfer enhancement for graphene nanofluids produced by pulsed discharge. **International Journal of Thermofluids**, v. 16, p. 100219, 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100219>

GAMAL, M.; RADWAN, M.S.; ELGIZAWY, I.G.; SHEDID, M.H. Heat transfer performance and exergy analyses of MgO and ZnO nanofluids using water/ethylene glycol mixture as base fluid. **Numerical Heat Transfer, Part A: Applications**, v. 80, n. 12, p. 597-616, 2021. <https://doi.org/10.1080/10407782.2021.1962631>

GANESAN, T.; KANNAN, P.S. Heat-transfer enhancement of nanofluids in a car radiator. **Materiali in Tehnologije**, v. 52, n. 4, p. 507-512, 2018. <https://doi.org/10.17222/mit.2017.171>

GAO, Y.; NING, Y.; XU, M.; WU, C.; MUJUMDAR, A.S.; SASMITO, A.P. Numerical investigation of aqueous graphene nanofluid ice slurry passing through a horizontal circular pipe: heat transfer and fluid flow characteristics. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 134, p. 106022, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106022>

GHIMIRE, R.; MEHTA, P.; ARYAL, N.; SAH, D.R.; ADHIKARI, S.P. Thermal Performance of Car Radiator Operated by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ethylene Glycol/Water-Based Nanofluids: a computational fluid dynamics study. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, v. 15, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.1115/1.4055652>

GOENKA, S.; SANT, V.; SANT, S. Graphene-based nanomaterials for drug delivery and tissue engineering. **Journal of Controlled Release**, v. 173, p. 75-88, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2013.10.017>

GULHANE, A.; CHINCHOLKAR, S.P. Experimental investigation of convective heat transfer coefficient of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid at lower concentrations in a car radiator. **Heat Transfer-Asian Research**, v. 46, n. 8, p. 1119-1129, 2017. <https://doi.org/10.1002/htj.21264>

GUO, Z. A review on heat transfer enhancement with nanofluids. **Journal of Enhanced Heat Transfer**, v. 27, n. 1, p. 1-70, 2020. <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, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.073>

GUPTA, M.; SINGH, V.; KUMAR, S.; KUMAR, S.; DILBAGHI, N.; SAID, Z. Up to date review on the synthesis and thermophysical properties of hybrid nanofluids. **Journal of Cleaner Production**, v. 190, p. 169-192, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.146>

HABIBIAN, S.H.; ABOLMAALI, A.M.; AFSHIN, H. Numerical investigation of the effects of fin shape, antifreeze and nanoparticles on the performance of compact finned-tube heat exchangers for automobile radiator. **Applied Thermal Engineering**, v. 133, p. 248-260, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.032>

HAFEEZ, M.B.; AMIN, R.; NISAR, K.S.; JAMSHED, W.; ABDEL-ATY, A.; KHASHAN, M. M. Heat transfer enhancement through nanofluids with applications in automobile radiator. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 27, p. 101192, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101192>

HAJIAKBARI, M.; NEJAD, A.M.; HOUSHFAR, E. Enhancing diesel engine cooling efficiency: a comprehensive numerical study on nanofluid coolants with exergy and economic analysis. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 56, p. 104217, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104217>

HATAMI, M.; JAFARYAR, M.; ZHOU, J.; JING, D. Investigation of engines radiator heat recovery using different shapes of nanoparticles in H<sub>2</sub>O/(CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub> based nanofluids. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 16, p. 10891-10900, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.196>

HO, M.L.G.; OON, C.S.; TAN, L.-L.; WANG, Y.; HUNG, Y.M. A review on nanofluids coupled with extended surfaces for heat transfer enhancement. **Results in Engineering**, v. 17, p. 100957, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100957>

HONNAPPA; AKTHAR, F.; RATHNAKUMAR, P.; BASHA, I.; ALI, Z.; NAGARAL, M. Enhancement of heat transfer using nano fluids in a mini-radiator. **Materials Today: Proceedings**, v. 52, p. 1749-1755, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.413>

HUANG, D.; WU, Z.; SUNDEN, B. Pressure drop and convective heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water and MWCNT/water nanofluids in a chevron plate heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 89, p. 620-626, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.082>

HUHEMANDULA; BAI, J.; KADIR, D.H.; FAGIRY, M.A.; TLILI, I. Numerical analysis and two-phase modeling of water Graphene Oxide nanofluid flow in the riser condensing tubes of the solar collector heat exchanger. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 53, p. 102408, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102408>

HUQ, T.; ONG, H.C.; CHEW, B.T.; LEONG, K.Y.; KAZI, S.N. Review on aqueous graphene nanoplatelet Nanofluids: preparation, stability, thermophysical properties, and applications in heat exchangers and solar thermal collectors. **Applied Thermal Engineering**, v. 210, p. 118342, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118342>

HUSSEIN, A.M.; BAKAR, R.A.; KADIRGAMA, K. Study of forced convection nanofluid heat transfer in the automotive cooling system. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 2, p. 50-61, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2013.12.001>

HUSSEIN, A.M.; DAWOOD, H.K.; BAKARA, R.A.; KADIRGAMAA, K. Numerical study on turbulent forced convective heat transfer using nanofluids TiO<sub>2</sub> in an automotive cooling system. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 9, p. 72-78, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.11.005>

IJAZ, H.; RAZA, H.; GOHAR, G.A.; ULLAH, S.; AKHTAR, A.; IMRAN, M. Effect of graphene oxide doped nano coolant on temperature drop across the tube length and effectiveness of car radiator – A CFD study. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 20, p. 100689, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100689>

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. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.08.062>

KAKAVAND, H.; MOLANA, M. A numerical study of heat transfer characteristics of a car radiator involved nanofluids. **Heat Transfer-Asian Research**, v. 47, n. 1, p. 88-102, 2017. <https://doi.org/10.1002/htj.21292>

KALADGI, A.R.; AFZAL, A.; MANOKAR, A.M.; THAKUR, D.; AGBULUT, U.; ALSHAHRANI, S.; C, A.S.; SUBBIAH, R. Integrated Taguchi-GRA-RSM optimization and ANN modelling of thermal performance of zinc oxide nanofluids in an automobile radiator. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 26, p. 101068, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101068>

KALANTARI, D.; TAFAKHORI, M.; GHANBARI, M.; BIPARVA, P.; PEYGHAMBARZADEH, S.M. Intensification of thermal efficiency of a cross-flow heat exchanger under turbulent flow conditions using CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/water nanofluid. **International**

**Journal of Thermal Sciences**, v. 185, p. 108107, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.108107>

KAOOD, A.; HASSAN, M.A. Thermo-hydraulic performance of nanofluids flow in various internally corrugated tubes. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 154, p. 108043, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108043>

KARIMI, A.; AFRAND, M. Numerical study on thermal performance of an air-cooled heat exchanger: effects of hybrid nanofluid, pipe arrangement and cross section. **Energy Conversion and Management**, v. 164, p. 615-628, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.038>

KHAN, A.; ALI, H.M.; NAZIR, R.; ALI, R.; MUNIR, A.; AHMAD, B.; AHMAD, Z. Experimental investigation of enhanced heat transfer of a car radiator using ZnO nanoparticles in H<sub>2</sub>O–ethylene glycol mixture. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 138, n. 5, p. 3007-3021, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08320-7>

KHAN, T.A.; AHMAD, H. CFD-Based Comparative Performance Analysis of Different Nanofluids Used in Automobile Radiators. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 44, n. 6, p. 5787-5799, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03750-9>

KHETIB, Y.; ALAHMADI, A.; ALZAED, A.; TAHMASEBI, A.; SHARIFPUR, M.; CHERAGHIAN, G. Effects of Different Wall Shapes on Thermal-Hydraulic Characteristics of Different Channels Filled with Water Based Graphite-SiO<sub>2</sub> Hybrid Nanofluid. **Processes**, v. 9, n. 7, p. 1253, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9071253>

KILINÇ, F.; BUYRUK, E.; KARABULUT, K. Experimental investigation of cooling performance with graphene based nano-fluids in a vehicle radiator. **Heat and Mass Transfer**, v. 56, n. 2, p. 521-530, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02722-x>

KLAZLY, M.; BOGNÁR, G. A novel empirical equation for the effective viscosity of nanofluids based on theoretical and empirical results. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 135, p. 106054, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106054>

KOCHERIL, R.; ELIAS, J. Fuel efficiency enhancement by addition of nano sized magnetised ferro particles in cooling system of internal combustion engines. **Materials Today: Proceedings**, v. 21, p. 722-726, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.746>

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, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.014>

KUMAR, J.V.; AMARKARTHIK, A.; SANTHOSH, T.; ALLENJUDAH, R.S.; SUNDRESWARAN, U. Performance Analysis of Automobile Radiator Using Tungsten Trioxide Nano-Fluid. **Springer Proceedings in Materials**, p. 1175-1181, 2021c. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8319-3\\_117](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8319-3_117)

KUMAR, A.; CHAND, P.; HASSAN, M.A. Louvered finned car radiator with MWCNT-SiO<sub>2</sub> hybrid nanofluid: an experimental approach. **Powder Technology**, v. 415, p. 118176, 2023a. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118176>

KUMAR, L. H.; KAZI, S. N.; MASJUKI, H. H.; ZUBIR, M. N. M.; JAHAN, A.; SEAN, O.C. Experimental study on the effect of bio-functionalized graphene nanoplatelets on the thermal performance of liquid flat plate solar collector. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 2, p. 1657-1674, 2021a. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10527-y>

KUMAR, L.H.; KAZI, S.N.; MASJUKI, H.H.; ZUBIR, M.N.M.; JAHAN, A.; BHINITHA, C. Energy, exergy and economic analysis of liquid flat-plate solar collector using green covalent functionalized graphene nanoplatelets. **Applied Thermal Engineering**, v. 192, p. 116916, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116916>

KUMAR, R.; KUMAR, P.; RAJAN, A. Thermal performance of automobile radiator under the influence of hybrid nanofluid. **Materials Today: Proceedings**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.099>

KUMAR, A.; HASSAN, M.A.; CHAND, P. Heat transport in nanofluid coolant car radiator with louvered fins. **Powder Technology**, v. 376, p. 631-642, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.047>

KUMAR, A.; HASSAN, M.A. Heat transfer in flat tube car radiator with CuO-MgO-TiO<sub>2</sub> ternary hybrid nanofluid. **Powder Technology**, v. 434, p. 119275, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119275>

KUMAR, V.; SAHOO, R.R. Exergy and energy analysis of a wavy fin radiator with variously shaped nanofluids as coolants. **Heat Transfer-Asian Research**, v. 48, n. 6, p. 2174-2192, 2019. <https://doi.org/10.1002/htj.21478>

KUMAR, V.; SAHOO, R.R. Experimental investigation on Thermo-hydraulic performance of radiator with preheating effects on engine performance from the waste heat using THNF coolant. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 24, p. 15083-15100, 2022a. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11561-8>

KUMAR, V.; SAHOO, R. Preheating Effects on Compression Ignition Engine Through Waste Heat Recovery Using THNF-Based Radiator Coolant: an experimental study. **Journal of**

**Thermal Science and Engineering Applications** v. 14, n. 12, 2022b.  
<https://doi.org/10.1115/1.4055005>

KUMAR, P.G.; VIGNESWARAN, V.S.; SIVALINGAM, V.; VELRAJ, R.; KIM, S.C.; RAMKUMAR, V. Enhancing heat transfer performance of automotive radiator with H<sub>2</sub>O/activated carbon nanofluids. **Journal of Molecular Liquids**, v. 371, p. 121153, 2023b.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.121153>

KUMAR, V.A.; 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, 2023c.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108497>

KRISTIAWAN, B.; WIJAYANTA, A.T.; YANINGSIH, I.; BUDIANA, E.P.; HADI, S.; A, H.D. Numerical Analysis of Heat Transfer Improvement in Flat Tube Car Radiator by Using TiO<sub>2</sub>/Water Nanofluids. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1096, n. 1, p. 012056, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1096/1/012056>

LEE, C.; WEI, X.; KYSAR, J.W.; HONE, J. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. **Science**, v. 321, n. 5887, p. 385-388, 2008.  
<https://doi.org/10.1126/science.1157996>

LEE, C.; WEI, X.; LI, Q.; CARPICK, R.; KYSAR, J.W.; HONE, J. Elastic and frictional properties of graphene. **Physica Status Solidi (B)**, v. 246, n. 11-12, p. 2562-2567, 2009.  
<https://doi.org/10.1002/pssb.200982329>

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, p. 125968, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125968>

LIANG, Y.; LIU, P.; ZHENG, N.; SHAN, F.; LIU, Z.; LIU, W. Numerical investigation of heat transfer and flow characteristics of laminar flow in a tube with center-tapered wavy-tape insert. **Applied Thermal Engineering**, v. 148, p. 557-567, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.090>

LU, S.; LIN, H. Effective conductivity of composites containing aligned spheroidal inclusions of finite conductivity. **Journal of Applied Physics**, v. 79, n. 9, p. 6761-6769, 1996.  
<https://doi.org/10.1063/1.361498>

MAGHRABIE, H.M.; MOUSA, Hamouda M. Thermal Performance Intensification of Car Radiator Using SiO<sub>2</sub>/Water and ZnO/Water Nanofluids. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, v. 14, n. 3, 2021. <https://doi.org/10.1115/1.4051382>

MARINHEIRO, M.M.; CORAÇA, G.M.; CABEZAS-GÓMEZ, L.; RIBATSKI, G. Detailed transient assessment of a small-scale concentrated solar power plant based on the organic Rankine cycle. **Applied Thermal Engineering**, v. 204, p. 117959, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117959>

MAZAHERI, N.; BAHIRAEI, M.; CHAGHAKABOODI, H.A.; MOAYEDI, H. Analyzing performance of a ribbed triple-tube heat exchanger operated with graphene nanoplatelets nanofluid based on entropy generation and exergy destruction. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 107, p. 55-67, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.05.015>

MCCORMICK, S.; NIANG, M.; DAHM, M.M. Occupational Exposures to Engineered Nanomaterials: a review of workplace exposure assessment methods. **Current Environmental Health Reports**, v. 8, n. 3, p. 223-234, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40572-021-00316-6>

MEDINA, H.; LIN, Y.; OBERGFELL, D.; CHIU, P. Tuning of Charge Densities in Graphene by Molecule Doping. **Advanced Functional Materials**, v. 21, n. 14, p. 2687-2692, 2011. <https://doi.org/10.1002/adfm.201100401>

MEHRALI, M.; SADEGHINEZHAD, E.; ROSEN, M.A.; AKHIANI, A.R.; LATIBARI, S.T.; MEHRALI, M.; METSELAAR, H.S.C. Heat transfer and entropy generation for laminar forced convection flow of graphene nanoplatelets nanofluids in a horizontal tube. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 66, p. 23-31, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.05.007>

MEI, X.; SHA, X.; JING, D.; MA, L. Thermal Conductivity and Rheology of Graphene Oxide Nanofluids and a Modified Predication Model. **Applied Sciences**, v. 12, n. 7, p. 3567, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12073567>

MEKHEIMER, K.S.; HASONA, W.M.; ABO-ELKHAIR, R.E.; ZAHER, A.Z. Peristaltic blood flow with gold nanoparticles as a third grade nanofluid in catheter: application of cancer therapy. **Physics Letters A**, v. 382, n. 2-3, p. 85-93, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.10.042>

MENTER, F. Zonal Two Equation  $\kappa$ - $\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows. **23Rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference**, 1993. <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>

MERT, S.; YASAR, H.; DURMAZ, U.; TOPUZ, A.; YETER, A.; ENGIN, T. Na experimental study on cooling performance of a car radiator using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - ethylene glycol/water nanofluid. **Thermal Science**, v. 25, n. 1, p. 801-809, 2021. <https://doi.org/10.2298/TSCI190630179M>



M'HAMED, B.; SIDIK, N.A.C.; 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. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.024>

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

MONTAZER, E.; SHAFII, M.B.; SALAMI, E.; MUHAMAD, M.R.; YARMAND, H.; GHAREHKHANI, S.; CHOWDHURY, Z.Z.; KAZI, S.N.; BADARUDIN, A. Heat transfer in turbulent nanofluids: separation flow studies and development of novel correlations. **Advanced Powder Technology**, v. 31, n. 8, p. 3120-3133, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.06.001>

MORALES, D.A.F.; GOMEZ, A.O.C.; AMJAD, M.; SANTOS, D.D.; BANDARRA FILHO, E.P. Experimental study on the heat transfer and pressure drop of oil-based nanofluids in laminar flow inside horizontal tubes. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 45, n. 9, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04412-6>

MUKHERJEE, S.; WCIŚLIK, S.; MISHRA, P.C.; CHAUDHURI, P. Nanofluids: critical issues, economics and sustainability perspectives. **Particuology**, v. 87, p. 147-172, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.06.021>

MURUGANANDAM, M.; KUMAR, P.C.M. Experimental analysis on internal combustion engine using MWCNT/water nanofluid as a coolant. **Materials Today: Proceedings**, v. 21, p. 248-252, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.411>

NADDAF, A.; HERIS, S.Z.; POULADI, B. An experimental study on heat transfer performance and pressure drop of nanofluids using graphene and multi-walled carbon nanotubes based on diesel oil. **Powder Technology**, v. 352, p. 369-380, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.078>

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

NASCIMENTO, E.O.; CONTRERAS, E.M.C.; CABEZAS-GÓMEZ, L.; BANDARRA FILHO, E.P. Comparison of experimental results with numerical simulation of thermal performance in car radiator using MWCNT/EG/water nanofluid. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 46, n. 7, 2024. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05013-7>

NAVEEN, N.S.; KISHORE, P.S. Experimental investigation on heat transfer parameters of an automotive car radiator using graphene/water-ethylene glycol coolant. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 43, n. 3, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1840999>

NEVES, F.; SOARES, A.A.; ROUBOA, A. Forced convection heat transfer of nanofluids in turbulent flow in a flat tube of an automobile radiator. **Energy Reports**, v. 8, p. 1185-1195, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.087>

NOVOSELOV, K.S.; GEIM, A.K.; MOROZOV, S.V.; JIANG, D.; ZHANG, Y.; DUBONOS, S.V.; GRIGORIEVA, I.V.; FIRSOV, A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. **Nature Materials**, v. 306, p. 666-669, 2004. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>

OLIVEIRA, G.A.; CONTRERAS, E.M.C.; 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. 3-13, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02870-4>

OLIVEIRA, G.A.; CONTRERAS, E.M.C.; BANDARRA FILHO, E.P. Experimental study on the heat transfer of MWCNT/water nanofluid flowing in a car radiator. **Applied Thermal Engineering**, v. 111, p. 1450-1456, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.086>

ONG, H.R.; ISKANDAR, W.M.E.; JOO, M.Y.; KHAN, M.M.R.; MOHAMED, M. K. A. Effects of natural-based SiO<sub>2</sub> nanocoolant on car radiator: thermal profile. **Materials Today: Proceedings**, v. 66, p. 2734-2737, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.505>

OYEDEPO, S.O.; EZEUDUJI, D.; ARAOYINBO, A.O.; KILANKO, O.; EFEMWENKIEKIE, U.K.; DIRISU, J.O.; AWORINDE, A.K.; BABALOLA, P.O.; LERAMO, R.O.; AHMED, M.H. Numerical modeling of heat transfer performance and optimization of car radiator using (H<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanofluids as coolant. **Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals**, v. 82, n. 5, p. 185-198, 2022. <https://doi.org/10.1080/10407790.2022.2083854>

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

PALANIAPPAN, B.; RAMASAMY, V. Thermodynamic analysis of fly ash nanofluid for automobile (heavy vehicle) radiators. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 136, n. 1, p. 223-233, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7844-0>

PAPAGEORGIOU, D.G.; KINLOCH, I.A.; YOUNG, R.J. Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. **Progress in Materials Science**, v. 90, p. 75-127, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004>

PATANKAR, S.V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. CRC press, 2018. <https://doi.org/10.1201/9781482234213>

PATANKAR, S.V.; SPALDING, D.B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 15, n. 10, p. 1787-1806, 1972. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(72\)90054-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(72)90054-3)

PATEL, J.; SONI, A.; BARAI, D.P.; BHANVASE, B.A. A minireview on nanofluids for automotive applications: current status and future perspectives. **Applied Thermal Engineering**, v. 219, p. 119428, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119428>

PONANGI, B.R.; KRISHNA, V.; SEETHARAMU, K.N. Effect of Ultralow Concentrated Reduced Graphene Oxide Nanofluid on Radiator Performance. **Journal of Heat Transfer**, v. 143, n. 8, 2021. <https://doi.org/10.1115/1.4051233>

PONANGI, B.R.; SUMANTH, S; KRISHNA, V; SEETHARAM, T R; SEETHARAMU, K.N. Heat transfer analysis of radiator using graphene oxide nanofluids. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 346, p. 012032, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/346/1/012032>

PORDANJANI, A.H.; AGHAKHANI, S.; AFRAND, M.; SHARIFPUR, M.; MEYER, J.P.; XU, H.; ALI, H.M.; KARIMI, N.; CHERAGHIAN, G. Nanofluids: physical phenomena, applications in thermal systems and the environment effects- a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 320, p. 128573, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128573>

PURBIA, D.; KHANDELWAL, A.; KUMAR, A.; SHARMA, A.K. Graphene-water nanofluid in heat exchanger: mathematical modelling, simulation and economic evaluation. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 108, p. 104327, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104327>

QASIM, M.; KAMRAN, M.S.; AMMAR, M.; JAMAL, M.A.; JAVAID, M.Y. Heat Transfer Enhancement of an Automobile Engine Radiator using ZnO Water Base Nanofluids. **Journal of Thermal Science**, v. 29, n. 4, p. 1010-1024, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11630-020-1263-9>

RAFI, A.A.; HAQUE, R.; SIKANDAR, F.; CHOWDHURY, N.A. Experimental analysis of heat transfer with CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water-ethylene glycol nanofluids in automobile radiator. **Aip Conference Proceedings**, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5115878>

RAFIEERAD, M.; RAFIEERAD, A. R.; MEHMANDOUST, B.; DHINGRA, S.; SHANBEDI, M. New water-based fluorescent nanofluid containing 2D titanium carbide MXene sheets: a comparative study of its thermophysical, electrical and optical properties with amine and carboxyl covalently functionalized graphene nanoplatelets. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 146, n. 4, p. 1491-1504, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10088-0>

RAI, P.K.; KUMAR, A.; YADAV, A. Experimental Investigation of Heat Transfer Augmentation in Automobile Radiators using Magnesium Oxide/Distilled Water-Ethylene Glycol based Nanofluid. **Materials Today: Proceedings**, v. 24, p. 1525-1532, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.472>

RAMADHAN, A I; AZMI, W H; MAMAT, R. Heat transfer characteristics of car radiator using tri-hybrid nanocoolant. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 863, n. 1, p. 012054, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/863/1/012054>

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, p. 107886, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107886>

RAMALINGAM, S.; DHAIRIYASAMY, R.; GOVINDASAMY, M.; MUTHAIAH, V.M. Rajavel. Consequence of nanoparticles size on heat transfer characteristics of a radiator. **Powder Technology**, v. 367, p. 213-224, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.057>

RANJBARZADEH, R.; ISFAHANI, A.H. M.; AFRAND, M.; KARIMIPOUR, A.; HOJAJI, M. An experimental study on heat transfer and pressure drop of water/graphene oxide nanofluid in a copper tube under air cross-flow: applicable as a heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, v. 125, p. 69-79, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.110>

RASHIDI, A.; AMROLLAHI, A.; LOTFI, R.; JAVAHERYZADEH, H.; RAHIMI, H.; RAHIMI, A.R.; JORSARAEI, A. An investigation of electrochemical behavior of nanofluids containing MWCNT on the corrosion rate of carbon steel. **Materials Research Bulletin**, v. 48, n. 11, p. 4438-4443, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.07.042>

RASHMI, W; KHALID, M.; ONG, S.S.; SAIDUR, R. Preparation, thermo-physical properties and heat transfer enhancement of nanofluids. **Materials Research Express**, v. 1, n. 3, p. 032001, 2014. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/1/3/032001>

REDDY, C.D.; RAJENDRAN, S.; LIEW, K.M. Equilibrium configuration and continuum elastic properties of finite sized graphene. **Nanotechnology**, v. 17, n. 3, p. 864-870, 2006. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/3/042>

ROACHE, P.J. **Verification and validation in computational science and engineering**. Albuquerque, NM: Hermosa, 1998.

SADEGHINEZHAD, E.; MEHRALI, M.; SAIDUR, R.; MEHRALI, M.; LATIBARI, S.T.; AKHIANI, A.R.; METSELAAR, H.S.C. A comprehensive review on graphene nanofluids: recent research, development and applications. **Energy Conversion and Management**, v. 111, p. 466-487, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.004>

SADRI, R.; MALLAH, A.R.; HOSSEINI, M.; AHMADI, G.; KAZI, S.N.; DABBAGH, A.; YEONG, C.H.; AHMAD, R.; YAAKUP, N.A. CFD modeling of turbulent convection heat transfer of nanofluids containing green functionalized graphene nanoplatelets flowing in a horizontal tube: comparison with experimental data. **Journal of Molecular Liquids**, v. 269, p. 152-159, 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.011>

SADRI, R.; HOSSEINI, M.; KAZI, S.N.; BAGHERI, S.; ABDELRAZEK, A.H.; AHMADI, G.; ZUBIR, N.; AHMAD, R.; ABIDIN, N.I.Z. 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, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.052>

SAFAEI, M.R.; JAHANBIN, A.; KIANIFAR, A.; GHAREHKHANI, S.; KHERBEET, A. S.; GOODARZI, M.; DAHARI, M. Mathematical Modeling for Nanofluids Simulation: a review of the latest works. **Modeling and Simulation in Engineering Sciences**, 2016. <https://doi.org/10.5772/64154>

SANDHYA, M.; RAMASAMY, D.; SUDHAKAR, K.; KADIRGAMA, K.; HARUN, W.S.W. Enhancement of the heat transfer in radiator with louvered fin by using Graphene-based hybrid nanofluids. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1062, n. 1, p. 012014, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1062/1/012014>

SATHISH, T.; SABARIRAJ, R.V.; MUTHUKUMAR, K.; KARTHICK, S. Experimental investigation of convective heat transfer coefficient on nano particles mixture used in automobile radiator based on mass flow rate. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 2524-2529, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.016>

SHAHSAVAR, A.; GODINI, A.; SARDARI, P.T.; TOGHRAIE, D.; SALEHIPOUR, H. Impact of variable fluid properties on forced convection of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CNT/water hybrid nanofluid in a double-pipe mini-channel heat exchanger. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 137, n. 3, p. 1031-1043, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-07997-6>

SHAHSAVAR, A.; ENTEZARI, S.; TOGHRAIE, D.; BARNOON, P. Effects of the porous medium and water-silver biological nanofluid on the performance of a newly designed heat sink

by using first and second laws of thermodynamics. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 11, p. 2928-2937, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.07.025>

SHAHSAVAR, A.; ENTEZARI, S.; ASKARI, I.B.; ALI, H.M. The effect of using connecting holes on heat transfer and entropy generation behaviors in a micro channels heat sink cooled with biological silver/water nanofluid. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 123, p. 104929, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104929>

SAHOO, R.R. Heat transfer and second law characteristics of radiator with dissimilar shape nanoparticle-based ternary hybrid nanofluid. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 146, n. 2, p. 827-839, 2020a. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10039-9>

SAHOO, R.R. Thermo-hydraulic characteristics of radiator with various shape nanoparticle-based ternary hybrid nanofluid. **Powder Technology**, v. 370, p. 19-28, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.013>

SHAJAHAN, M.I.; STEPHEN, C.; MICHAEL, J.J.; ARULPRAKASAJOTHI, M.; RATHNAKUMAR, P.; M, P. Heat transfer investigations of in-line conical strip inserts using MWCNT/water nanofluid under laminar flow condition. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 183, p. 107844, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107844>

SAID, Z.; ASSAD, M. E.H.; HACHICHA, A.A.; BELLOS, E.; ABDELKAREEM, M.A.; ALAZAIZEH, D.Z.; YOUSEF, B.A.A. Enhancing the performance of automotive radiators using nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 112, p. 183-194, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.052>

SAID, L.B.; KOLSI, L.; GHACHEM, K.; ALMESHAAAL, M.; MAATKI, C. Advancement of nanofluids in automotive applications during the last few years—a comprehensive review. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 14, p. 7603-7630, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11088-4>

SAID, Z.; SUNDAR, L. S.; TIWARI, A.K.; ALI, H.M.; SHEIKHOESLAMI, M.; BELLOS, E.; BABAR, H. 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, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2021.07.002>

SAIDUR, R.; LEONG, K.Y.; MOHAMMED, H.A. A review on applications and challenges of nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 3, p. 1646-1668, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.035>

SAINI, R.P.; VERMA, J. Heat transfer and friction factor correlations for a duct having dimple-shape artificial roughness for solar air heaters. **Energy**, v. 33, n. 8, p. 1277-1287, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.02.017>

SAJJAD, M.; KAMRAN, M.S.; SHAUKAT, R.; ZEINELABDEEN, M.I.M. Numerical investigation of laminar convective heat transfer of graphene oxide/ethylene glycol-water nanofluids in a horizontal tube. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 21, n. 4, p. 727-735, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.009>

SALAMON, V.; KUMAR, D.S.; THIRUMALINI, S. Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Automobile Radiator using TiO<sub>2</sub>-Nanofluid Coolant. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 225, p. 012101, 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/225/1/012101>

SARAFRAZ, M.; SAFAEI, M.; TIAN, Z.; GOODARZI, M.; BANDARRA FILHO, E.; ARJOMANDI, M. Thermal Assessment of Nano-Particulate Graphene-Water/Ethylene Glycol (WEG 60:40) nano-suspension in a compact heat exchanger. **Energies**, v. 12, n. 10, p. 1929, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12101929>

SATYAPRASAD, S.; RAMBABU, V.; RAVIBABU, S. Experimental investigation of radiator heat transfer efficiency using Water + Ethylene Glycol based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC nanofluids. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 954, n. 1, p. 012031, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/954/1/012031>

SELVAM, C.; BALAJI, T.; LAL, D. M.; HARISH, S. Convective heat transfer coefficient and pressure drop of water-ethylene glycol mixture with graphene nanoplatelets. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 80, p. 67-76, 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.08.013>

SELVAM, C.; RAJA, R.S.; LAL, D.M.; 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.071>

SELVAM, C.; LAL, D.M.; HARISH, S. Enhanced heat transfer performance of an automobile radiator with graphene based suspensions. **Applied Thermal Engineering**, v. 123, p. 50-60, 2017c. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.076>

SELVARAJOO, K.; WANATASANAPPAN, V.V.; LUON, N.Y. Experimental measurement of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GO (80:20) hybrid and mono nanofluids. **Diamond and Related Materials**, v. 144, p. 111018, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111018>

SHAH, T.R.; ALI, H.M.; JANJUA, M.M. On Aqua-Based Silica (SiO<sub>2</sub>-Water) Nanocoolant: convective thermal potential and experimental precision evaluation in aluminum tube radiator. **Nanomaterials**, v. 10, n. 9, p. 1736, 2020. <https://doi.org/10.3390/nano10091736>

SHAH, T.R.; ALI, H.M.; ZHOU, C.; BABAR, H.; JANJUA, M.M.; DORANEHGARD, M.H.; HUSSAIN, A.; SAJJAD, U.; WANG, C.; SULTAN, M. Potential evaluation of water-based ferric oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water) nanocoolant: an experimental study. **Energy**, v. 246, p. 123441, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123441>

SHAHRUL, I.M.; MAHBUBUL, I.M.; KHALEDUZZAMAN, S.S.; SAIDUR, R.; SABRI, M.F.M. A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 88-98, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.081>

SHANKARA, R.P.; BANAPURMATH, N.R.; SOUZA, A.D.; DHADED, S.S. Experimental investigation of enhanced cooling performance with the use of hybrid nanofluid for automotive application. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 872, p. 012074, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012074>

SHANKARA, R.P.; BANAPURMATH, N.R.; D'SOUZA, A.; SAJJAN, A.M.; AYACHIT, N.H.; KHAN, T.M.Y.; BADRUDDIN, I.A.; KAMANGAR, S. 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. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.037>

SHEIKHOLESLAMI, M. Applications of Nanofluid Transportation and Heat Transfer Simulation. **Advances in Chemical and Materials Engineering**, 2019. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7595-5>

SILVEIRA-NETO, A. **Escoamentos turbulentos: análise física e modelagem teórica**. 1.ed. Uberlândia: Composer, 2020.

SINGH, S.; VERMA, P.; GHOSH, S.K. Numerical and experimental analysis of performance in a compact plate heat exchanger using graphene oxide/water nanofluid. **International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow**, 2021. <https://doi.org/10.1108/HFF-08-2020-0539>

SINGH, T.; ALMANASSRA, I.W.; AL-ANSARI, T.; MCKAY, G.; ATIEH, M.A. Performance investigation of graphene oxide-based water/oil nanofluids for high pressure and high temperature solar thermal technologies for sustainable energy systems. **Flatchem**, v. 35, p. 100420, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2022.100420>



ŞIRIN, C.; GOGGINS, J.; HAJDUKIEWICZ, M. A review on building-integrated photovoltaic/thermal systems for green buildings. **Applied Thermal Engineering**, v. 229, p. 120607, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120607>

SIVALINGAM, V.; KUMAR, P.G.; PRABAKARAN, R.; SUN, J.; VELRAJ, R.; KIM, S.C. 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, p. 101724, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101724>

SOYLU, S.K.; ATMACA, İ.; ASILTÜRK, M.; DOĞAN, A. Improving heat transfer performance of an automobile radiator using Cu and Ag doped TiO<sub>2</sub> based nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, v. 157, p. 113743, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113743>

SUBHEDAR, D.G.; RAMANI, B.M.; GUPTA, A. Experimental investigation of heat transfer potential of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water-Mono Ethylene Glycol nanofluids as a car radiator coolant. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 11, p. 26-34, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.11.009>

SUMANTH, S.; RAO, P.B.; 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, 2018. <https://doi.org/10.1002/htj.21335>

SUNDARI, K.G.; ASIRVATHAM, L.G.; MARSHAL, S. J.J.; MANOVA, S.; SAHU, M.; AARON, M. J. Heat transfer studies using glycerin based nanocoolant for car radiator cooling applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 7045-7049, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.104>

TAFAKHORI, M.; KALANTARI, D.; BIPARVA, P.; PEYGHAMBARZADEH, S. M. Assessment of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-water nanofluid for enhancing laminar convective heat transfer in a car radiator. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 146, n. 2, p. 841-853, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10034-0>

TALER, D.; TALER, J.; TROJAN, M. Experimental Verification of an Analytical Mathematical Model of a Round or Oval Tube Two-Row Car Radiator. **Energies**, v. 13, n. 13, p. 3399, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13133399>

TAHERIALEKOUHI, R.; RASOULI, S.; KHOSRAVI, A. An experimental study on stability and thermal conductivity of water-graphene oxide/aluminum oxide nanoparticles as a cooling hybrid nanofluid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 145, p. 118751, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118751>

TIJANI, A.S.; SUDIRMAN, A.S.B. Thermos-physical properties and heat transfer characteristics of water/anti-freezing and  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CuO}$  based nanofluid as a coolant for car radiator. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 118, p. 48-57, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.083>

TOH, L.K.L.; TING, T.W. Thermal performance of automotive radiator with graphene nanoplatelets suspension. **Aip Conference Proceedings**, p. 0200121-0200128, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5085955>

TOPUZ, A.; ENGIN, T.; ERDOĞAN, B.; MERT, S.; YETER, A. Experimental investigation of pressure drop and cooling performance of an automobile radiator using  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -water + ethylene glycol nanofluid. **Heat and Mass Transfer**, v. 56, n. 10, p. 2923-2937, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02916-8>

UKUEJE, W.E.; ABAM, F.I.; OBI, A. A Perspective Review on Thermal Conductivity of Hybrid Nanofluids and Their Application in Automobile Radiator Cooling. **Journal of Nanotechnology**, v. 2022, p. 1-51, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2187932>

UPADHYAY, S.; CHANDRA, L.; SARKAR, J. A generalized Nusselt number correlation for nanofluids, and look-up diagrams to select a heat transfer fluid for medium temperature solar thermal applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 190, p. 116469, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116469>

UZUN, S.; GENÇ, Y.; AÇĐR, A. Investigation of hybrid nanofluids effects on heat transfer characteristics in VVER-1000 nuclear reactor. **Progress in Nuclear Energy**, v. 154, p. 104489, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104489>

VANAKI, S.M.; GANESAN, P.; MOHAMMED, H.A. Numerical study of convective heat transfer of nanofluids: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1212-1239, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.042>

VERMA, A.K.; RAJPUT, S.; BHATTACHARYYA, K.; CHAMKHA, A.J.; YADAV, D. Comparison between graphene-water and graphene oxide-water nanofluid flows over exponential shrinking sheet in porous medium: dual solutions and stability analysis. **Chemical Engineering Journal Advances**, v. 12, p. 100401, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100401>

VERSTEEG, H. K; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method**. 2. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.

WANG, Y.; PENG, Y.; TAO, Y.; SHI, L.; LIU, Q.; MA, Y.; TU, J.; LIU, X. Evaluation methods of thermo-hydraulic performance in nanofluids: a comprehensive review. **Applied**

**Thermal Engineering**, v. 240, p. 121989, 2024.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121989>

WANG, Z.; WU, Z.; HAN, F.; WADSÖ, L.; SUNDÉN, B. Experimental comparative evaluation of a graphene nanofluid coolant in miniature plate heat exchanger. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 130, p. 148-156, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.04.021>

WEN, T.; LU, L.; ZHANG, S.; ZHONG, H. Experimental study and CFD modelling on the thermal and flow behavior of EG/water ZnO nanofluid in multiport mini channels. **Applied Thermal Engineering**, v. 182, p. 116089, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116089>

WILCOX, D.C. **Turbulence modeling for CFD**. La Canada, CA: DCW industries, 2006.

XIAN, H.W.; SIDIK, N.A.C.; NAJAFI, G. Recent state of nanofluid in automobile cooling systems. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 135, n. 2, p. 981-1008, 2018.  
<https://doi.org/10.1007/s10973-018-7477-3>

XIAN, H.W.; SIDIK, N.A.C.; SAIDUR, R. Hybrid nanocoolant for enhanced heat transfer performance in vehicle cooling system. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 133, p. 105922, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105922>

XUAN, Y.; ROETZEL, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 43, n. 19, p. 3701-3707, 2000.  
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00369-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00369-5)

YANG, L.; JI, W.; ZHANG, Z.; JIN, X. Thermal conductivity enhancement of water by adding graphene Nano-sheets: consideration of particle loading and temperature effects. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 109, p. 104353, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104353>

YANG, M.; LIU, Y.; FAN, T.; ZHANG, D. Metal-graphene interfaces in epitaxial and bulk systems: a review. **Progress in Materials Science**, v. 110, p. 100652, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100652>

YAW, C.T.; KOH, S. P.; SANDHYA, M.; KADIRGAMA, K.; TIONG, S.K.; RAMASAMY, D.; SUDHAKAR, K.; SAMYKANO, M.; BENEDICT, F.; TAN, C.H. Heat Transfer Enhancement by Hybrid Nano Additives—Graphene Nanoplatelets/Cellulose Nanocrystal for the Automobile Cooling System (Radiator). **Nanomaterials**, v. 13, n. 5, p. 808, 2023.  
<https://doi.org/10.3390/nano13050808>

YILDIZ, Ç.; KAPTAN, Ç.; ARICI, M.; BAYNAL, K.; KARABAY, H. Taguchi optimization of automotive radiator cooling with nanofluids. **The European Physical Journal Special Topics**, 2022. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00597-4>

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, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.01.040>

ZHOU, X.; WANG, Y.; ZHENG, K.; HUANG, H. Comparison of heat transfer performance of ZnO-PG,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PG, and  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PG nanofluids in car radiator. **Nanomaterials and Nanotechnology**, v. 9, p. 184798041987646, 2019. <https://doi.org/10.1177/1847980419876465>

ZOLFALIZADEH, M.; HERIS, S.Z.; POURPASHA, H.; MOHAMMADPOURFARD, M.; MEYER, J.P. Experimental investigation of the effect of graphene/water nanofluid on the heat transfer of a shell-and-tube heat exchanger. **International Journal of Energy Research**, v. 2023, p. 1-16, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/3477673>

ZUBAIR, M.M.; SERAJ, M.; FAIZAN, M.; ANAS, M.; YAHYA, S.M. Experimental study on heat transfer of an engine radiator with TiO<sub>2</sub>/EG-water nano-coolant. **Sn Applied Sciences**, v. 3, n. 4, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04441-7>