

GUILHERME AZEVEDO OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO
TÉRMICO DE NANOFLUIDOS EM RADIADORES
AUTOMOTIVOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2016

GUILHERME AZEVEDO OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
NANOFLUIDOS EM RADIADORES AUTOMOTIVOS**

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

Área de Concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho.

UBERLÂNDIA - MG

2016

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

O48a
2016 Oliveira, Guilherme Azevedo, 1989-
 Análise experimental do desempenho térmico de nanofluidos em
 radiadores automotivos / Guilherme Azevedo Oliveira. - 2016.
 176 f. : il.

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

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

CDU: 621

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

À minha esposa, Carolina Beicker, pela ajuda, paciência e companheirismo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus companheiros de trabalho Arthur Antunes e Luís Manoel, pelas contribuições e amizade incondicional.

Ao meu companheiro de bancada Edwin Contreras pelas contribuições à pesquisa.

Aos técnicos Luiz Quirino, Renato e Reinaldo, pelas contribuições e companheirismo mostrado durante este trabalho

Ao prof. Ricardo Fortes de Miranda, pela sua imensa disposição em ajudar com seu conhecimento, contribuindo fortemente com a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho pela orientação, paciência e confiança durante o desenvolvimento desta Tese.

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

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro.

À FIAT CHRYSLER AUTOMOBILES pelo suporte técnico e Financeiro.

OLIVEIRA, G.A. - **Análise experimental do desempenho térmico de nanofluidos em radiadores automotivos**. 2016. 180 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Resumo

O presente trabalho relata uma investigação experimental acerca do desempenho térmico de nanofluidos em radiadores automotivos. Uma mistura composta por 70% água e 30% etilenoglicol (EG30%), utilizada em alguns tipos de radiadores como fluido de arrefecimento, foi substituída por 8 distintos nanofluidos, produzidos por homogeneização à alta pressão. Destes nanofluidos 4 eram compostos por nanopartículas de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) e 4 compostos por grafeno, em concentrações mássicas 0,05, 0,1, 0,2, 0,3%. Além disso, foram também produzidos nanofluidos compostos por MWCNT e água como fluido base, em concentrações até 0,16%. Em uma primeira etapa, foram medidas experimentalmente as propriedades térmicas (condutividade térmica, viscosidade e densidade) de todos os fluidos produzidos, propriedades estas necessárias para os cálculos de transferência de calor. Posteriormente, os nanofluidos foram submetidos a ensaios como fluido de arrefecimento em radiadores automotivos, instalados em um túnel de vento devidamente equipado e instrumentado para avaliação do desempenho térmico dos fluidos. O desempenho dos nanofluidos foi avaliado em termos das taxas de transferência de calor no radiador e potência de bombeamento necessária para o escoamento. A temperatura de entrada do fluido de arrefecimento no radiador foi fixada em 50, 60, 70 e 80°C, e vazão entre 30 e 130 g/s, enquanto a vazão e temperatura de incidência do ar foram fixadas em 0,175 kg/s e 25°C, respectivamente. A primeira etapa de resultados indicou um ligeiro incremento na condutividade térmica para os nanofluidos, de até 5%. Com relação à viscosidade, no caso dos nanofluidos MWCNT/água foi observado incremento significativo (54%). O mesmo comportamento não foi observado para os nanofluidos baseados em EG30%, para os quais a viscosidade obtida foi semelhante ao fluido base, com exceção dos testes realizados em 80°C, nos quais observou-se um aumento de 30%. Na segunda etapa, referente aos testes de desempenho em radiadores, os resultados indicaram uma leve queda na taxa de transferência de calor para os nanofluidos. Os piores desempenhos foram encontrados para os nanofluidos MWCNT/água, que apresentaram redução de até 22% na taxa de transferência de calor. No caso dos nanofluidos baseados em EG30%, foram encontrados resultados levemente superiores ao fluido base em algumas condições de testes, porém com o aumento da temperatura de entrada o desempenho dos nanofluidos se mostrou inferior ao do fluido base em até 10%. De forma geral, os nanofluidos analisados não apresentaram potencial de substituição do fluido de arrefecimento convencional. Os resultados obtidos apresentam discrepância com relação à literatura, na qual a maioria dos resultados são apresentados em função do número de Reynolds, porém, em análise adicional, verificou-se que o número de Reynolds não é um parâmetro adequado de referência para avaliação do desempenho de nanofluidos em escoamento interno.

Palavras Chave: *nanofluidos, nanotubos de carbono, grafeno, radiador.*

Oliveira, G.A. – Experimental investigation on the thermal performance of nanofluids in an automotive radiator, 2016. 180 p., Ph.D. Thesis, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Brazil.

Abstract

Nanofluids is a new class of fluids composed by solid nanoparticles dispersed in a fluid. This work concerns an experimental investigation about thermal performance of nanofluids in automotive radiators. A mixture of 70% water and 30% ethylene glycol (EG30%), used in some cooling systems, was replaced by 8 distinct nanofluids. The nanofluids composed by graphene and multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) were produced by a two step method called high pressure homogenization, in mass concentrations between 0,05 and 0,3%, In addition, was produced water based MWCNT nanofluids, in concentrations between 0,05 and 0,16%. As a first step, the properties (thermal conductivity, viscosity and density) were experimentally measured. After that, the nanofluids were tested as coolants in automotive radiators, located in a wind tunnel strongly equipped to measure the heat transfer. The performance of nanofluids was evaluated in terms of heat transfer rate and pumping power. The liquid inlet temperature was fixed at 50, 60, 70 and 80°C, while the mass flow rate was between 30 and 130g/s. On the other hand, the air mass flow rate and air inlet temperature were fixed at 0,175kg/s and 25°C, respectively. The first step results indicated a slightly enhancement on the thermal conductivity related to the base fluid, up to 5%. With respect to viscosity, in the case of MWCNT/WATER nanofluids, was observed a significant enhancement (up to 54%). Similar behavior was not found for EG30% based nanofluids, for which was obtained viscosity close to the base fluid, except for tests at 80°C, which was observed enhancements up to 30% on this property. In the second step results, referent to the tests in radiators, the results shown a slightly drop in the thermal performance with nanofluids. The worses performances were found to MWCNT/WATER nanofluids, for which the maximum drop verified was 22%. For EG30% based nanofluids, were found results slightly higher to base fluid in some test conditions, however, for most cases the performance were closed or lower the EG30%. In general, the analyzed nanofluids didn't show potential to replace the conventional coolant. The obtained results are discrepant from literature, in which the heat transfer is analized, in the most os cases, in function of Reynolds number, but in an additional analysis, it was concluded that the Reynolds number is not an appropriate reference parameter to evaluate the thermal performance of nanofluids in internal flow.

Key Words: nanofluids, carbon nanotubes, graphene, radiator.

SIMBOLOGIA

Arábicos

A	Área [m ²]
A_1	Coeficiente relacionado com a concentração de nanopartículas
a	Parâmetro relacionado ao coeficiente de descarga
b	Meia largura do aquecedor de metal [mm]
B_1	Coeficiente relacionado com a concentração de nanopartículas
B_{2x}	Fator auxiliar de despolarização na direção x
B_{2y}	Fator auxiliar de despolarização na direção y
C_1	Constante proporcional de Jang e Choi (2004)
c_p	Calor específico a pressão constante [kJ/kg K]
C_d	Coeficiente de descarga
\bar{C}	Velocidade de movimento aleatório das nanopartículas [m/s]
C_{geom}	Fator geométrico
D	Diâmetro [nm]
d_i	Diâmetro do bocal i
d_h	Diâmetro hidráulico
Erro%	Erro percentual
F	Fator de correção para trocadores de calor
FP	Fator de potência
H	Distância entre nanopartículas [nm]
h	Coeficiente de transferência de calor
h_{teo}	Coeficiente de transferência de calor médio teórico
h_m	Coeficiente de transferência de calor médio experimental
h_{air}	Entalpia do ar
h_{liq}	Entalpia do fluido de arrefecimento
i	Corrente elétrica
\vec{k}	Vetor de malha dinâmica
K_b	Constante de Boltzmann [J/K]
k	Condutividade térmica [W/m K]

k_o	Parâmetro de Bessel
l	Comprimento
L	Espessura da camada de fluido de teste [mm]
L_c	Comprimento dos cilindros
M	Parâmetro auxiliar na determinação da influência da nanocamada
m	Massa [kg]
\dot{m}	Vazão mássica
Nu	Número de Nusselt
n	Número de bocais
Pr	Número de Prandtl
P	Pressão
\dot{q}''	Fluxo de calor por unidade de área [W/m ²]
Q_e	Potência dissipada no medidor de condutividade térmica
Q	Calor
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor
q	Calor por unidade de comprimento [W/m]
R	Resistência aquecedora [Ω]
Re	Número de Reynolds
Re_d	Número de Reynolds
r	Raio das nanopartículas [nm]
r_1	Raio do cilindro interno
r_2	Raio máximo do filme de líquido
r_3	Raio do cilindro externo
r_f	Posição radial da fonte [mm]
t	Tempo [s]
T	Temperatura
T_m	Temperatura média ou de filme
U	Coeficiente global de transferência de calor
UA	Condutância térmica
U_Y	Incerteza na variável Y
V	Volume [m ³]
v_B	Velocidade browniana [m/s]
V_1	Tensão [V]
\dot{W}	Potência de bombeamento
x	Variável genérica que propaga incerteza para outra variável Y

Gregos

α	Difusividade térmica [W/m K]
α_2	Parâmetro de forma de Xue e Xu (2005)
α_3	Absortividade do feixe de laser
β	Razão entra espessura de nanocamada e raio de nanopartículas
β_2	Constante relacionada a resistência de Kapitza
β_{fl}	Parâmetro de interface líquido-nanocamada
β_{lf}	Parâmetro de interface nanocamada-líquido
β_{pl}	Parâmetro de interface partícula-nanocamada
Ψ	Fator de forma
θ	Parâmetro auxiliar na determinação da influência da nanocamada
ε	Razão entre as condutividades térmicas de nanopartícula e fluido base
δ	Gradiente
ω	Frequência angular [rad/s]
ΔT	Variação de temperatura [K]
ΔP	Variação de pressão
ΔT_{lm}	Diferença de temperatura média logarítmica
μ	Viscosidade dinâmica [Pa s]
ρ	Densidade [kg/m ³]
λ	Fator de forma
Φ	Concentração de nanopartículas
Φ_t	Concentração de nanocamada
Φ_a	Concentração de aglomerações
Φ_{int}	Concentração de nanopartículas dentro da aglomeração
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s]

Subscritos

2x	Direção x de semi-eixo da elipse
2y	Direção y de semi-eixo da elipse
air	ar
bf	fluido base
cx	Direção x
cy	Direção y
cl	cluster
eff	efetiva
geom	geométrico
i	Bocal i
in	Entrada
int	interno
inf	Inferior
liq	Fluido de arrefecimento
lr	nanocamada
medio	médio
nano	nanométrico
nf	nanofluido
out	Saída
p	partículas
sup	superior
T	total
v	cinético
pl	Partícula-nanocamada
fl	Fluido- nanocamada
lf	Nanocamada-fluido

Siglas

4WD	Four wheel drive
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
ASME	American Society of Mechanical Engineering
CHF	Fluxo Crítico de Calor
CNT	Nanotubos de carbono
CTAB	Cetyl Trimetyl ammonium brommide
CVD	Chemical vapor deposition
DOT3	Fluido dielétrico
KD2	Equipamento para medir a condutividade térmica
DWCNT	Nanotubos de carbono de parede dupla
MWCNT	Nanotubos de carbono de paredes múltiplas
SWCNT	Nanotubos de carbono de parede simples
LEST	Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos
LABVIEW	Software de aquisição e monitoramento de dados
NanoAmor	Nanostructured & Amorphous, inc.
SDS	Surfate dodecyl sodium
SANSS	Submerged arc nanoparticle synthesis system
PVA	Polyvinil Alcohol
PVP-K30	Polivinilpirrolidona
EG	Etilenoglicol
EG30%	Etilenoglicol 30%/água 70%
MWCNT05	Nanofluido CNT/EG30% - concentração 0,05% em massa
MWCNT1	Nanofluido CNT/EG30% - concentração 0,1% em massa
MWCNT2	Nanofluido CNT/EG30% - concentração 0,2% em massa
MWCNT3	Nanofluido CNT/EG30% - concentração 0,3% em massa
GRF05	Nanofluido GRAFENO/EG30% - concentração 0,05% em massa
GRF1	Nanofluido GRAFENO/EG30% - concentração 0,1% em massa
GRF2	Nanofluido GRAFENO/EG30% - concentração 0,2% em massa
GRF3	Nanofluido GRAFENO/EG30% - concentração 0,3% em massa
THB-1	Transient Hot Bridge 1
THW	Transient hot wire

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Estrutura da tese.....	1
CAPÍTULO 2 – Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Definições.....	5
2.2. Produção de nanofluidos.....	11
2.3. Propriedades dos nanofluidos.....	15
2.3.1. <i>Condutividade térmica</i>	15
2.3.2. <i>Viscosidade</i>	27
2.4. Nanofluidos em transferência de calor.....	29
2.5. Desafios.....	XX
2.6. Objetivos.....	Xx
CAPÍTULO 3 – Materiais e Métodos.....	38
3.1. Produção dos nanofluidos.....	38
3.2. Medição das propriedades dos nanofluidos.....	41
3.3. Bancada experimental.....	47
3.4. Metodologia de Projeto e Análise dos experimentos.....	62
3.4.1. <i>Condição de regime permanente</i>	Xx
3.4.2. <i>Funções objetivo</i>	xx
3.4.3. Incerteza experimental.....	xx
CAPÍTULO 4 - Resultados e Discussões.....	67
4.1. Validação dos resultados.....	68
4.2. Propriedades dos nanofluidos.....	73
4.3. Desempenho dos nanofluidos nos radiadores.....	79
4.3.1. <i>Radiador 1</i>	80
4.3.2. <i>Radiador 2</i>	86
4.4. Comparação com resultados da literatura	114

CAPÍTULO 5 - Conclusões.....	117
5.1. Conclusões.....	117
5.2. Trabalhos futuros.....	119
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 120
ANEXO I - Calibração dos sensores.....	130
ANEXO II - Gradiente de temperatura do líquido para os ensaios nos radiadores.....	145
ANEXO III - Taxa de transferência de calor em função da concentração (radiador 2).	153
ANEXO IV - Código para cálculo das concentrações de nanofluidos.....	163

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A substituição dos fluidos refrigerantes é um dos grandes desafios enfrentado atualmente na engenharia térmica. A busca de fluidos e sistemas que sejam menos agressivos ao meio ambiente e ao mesmo tempo tenham desempenho térmico igual ou até mesmo superior aos fluidos utilizados é um fato. A síntese de novos compostos tem aumentado as possibilidades para aplicação de fluidos não convencionais em sistemas térmicos.

Nanofluidos são suspensões de partículas de escala nanométrica (entre 1 e 100nm) dispersas em um fluido comumente denominado fluido base. A possibilidade recente de síntese de nanofluidos em maior escala, associada a elevada condutividade térmica destes fluidos, segundo alguns pesquisadores (como por exemplo Choi (1995) e Eastman et al. (2001)), despertou o interesse da comunidade científica em aplicar esta nova classe de fluidos em sistemas térmicos.

A Fig. 1.1 ilustra o grande aumento no número de publicações envolvendo nanofluidos nos últimos anos, fato que demonstra o grande potencial encontrado nesta nova classe de fluidos. Nesse levantamento foram consideradas publicações envolvendo nanofluidos em diversas aplicações distintas.

As principais nanopartículas utilizadas são óxidos metálicos, como alumina (Al_2O_3), óxido de titânio (TiO_2), óxido de cobre (CuO) e óxido de silício (SiO_2), metais estáveis como: prata (Ag), cobre (Cu), titânio (Ti), ouro (Au) e alumínio, (Al), e além desses, é também utilizado carbono em diferentes formas alotrópicas, como nanotubos de carbono (CNT), grafite, grafeno e diamante. Por outro lado, os principais fluidos base utilizados são água, etilenoglicol e alguns tipos de óleos.

A principal vantagem esperada da aplicação de nanofluidos é uma elevada condutividade térmica (Choi, 1995), comparada ao fluido base, que pode levar a um aumento na transferência de calor. Por outro lado, a viscosidade dos nanofluidos também tende a ser

superior, o que implica em uma maior potência de bombeamento, necessária para manter estes fluidos em escoamento.

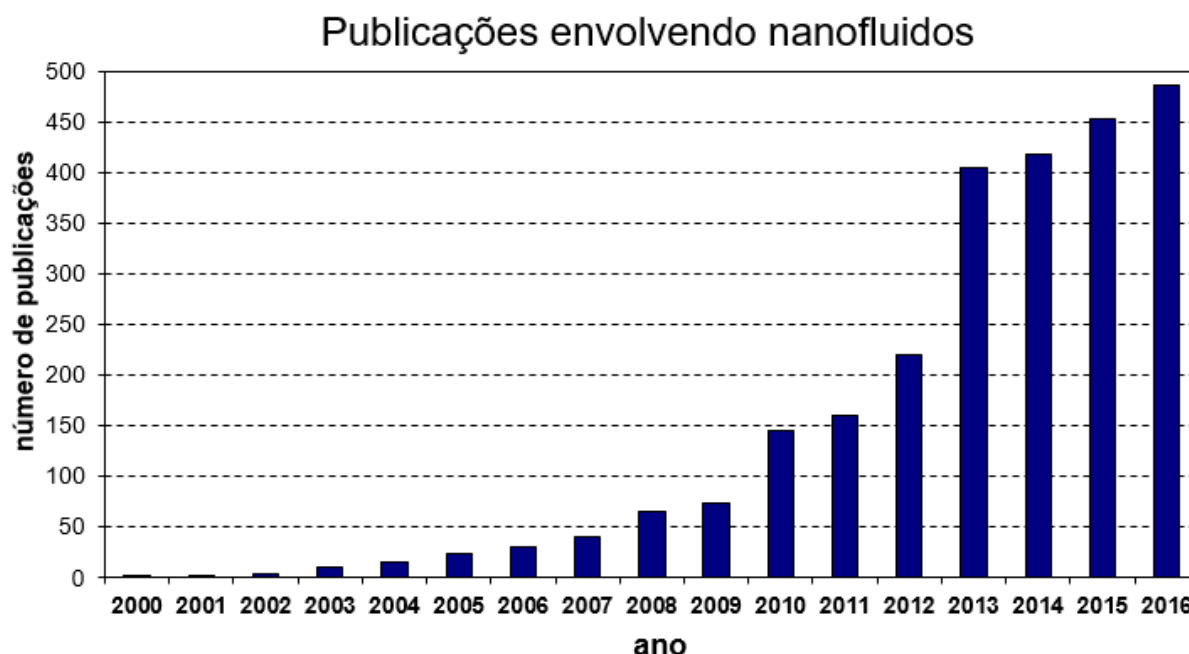


Figura 1.1 – Quantidade de publicações envolvendo nanofluidos por ano (Fonte: Web of Science).

1.1. Motivação

Diversas aplicações de nanofluidos têm sido estudadas nos últimos anos, especialmente em aplicações onde se deseja aumentar a transferência de calor, como por exemplo: na refrigeração de componentes eletrônicos (Ma et al., 2006) e em aquecimento solar (Karami et al., 2014). Estes fluidos podem ser utilizados como selantes magnéticos e até mesmo lubrificantes.

No setor automotivo, nanofluidos aparecem como alternativa para substituir os fluidos de arrefecimento. Os radiadores atualmente utilizados ocupam um espaço considerável no motor. Nanofluidos podem aumentar a eficiência do sistema, de arrefecimento permitindo a utilização de radiadores menores e com menor área frontal, devido ao aumento na transferência de calor (Singh et al., 2006). Esta diminuição da área frontal também diminuiria a força de arrasto sobre os veículos, melhorando ainda mais o seu desempenho.

A aplicação dos nanofluidos em radiadores automotivos requer que algumas propriedades físicas sejam conhecidas na avaliação do desempenho, são elas: condutividade térmica, densidade, viscosidade e calor específico. Estas propriedades influenciam,

fortemente, a transferência de calor, a perda de carga e, conseqüentemente, a potência de bombeamento.

1.2. Estrutura da Tese

O trabalho foi dividido em 5 capítulos conforme apresentado a seguir:

No Capítulo I foi realizada uma breve introdução ao conceito de nanofluidos e sua utilização como alternativa para incrementar a transferência de calor em diferentes sistemas, além de estabelecer os objetivos do trabalho.

No Capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre nanofluidos, com foco nos principais conceitos e parâmetros utilizados nesta tese. Nesse capítulo são apresentadas as principais definições envolvendo nanofluidos, suas principais características e potenciais, além de uma revisão dos principais resultados envolvendo produção e estabilidade de nanofluidos, avaliação e medição de propriedades térmicas e análise de desempenho térmico de nanofluidos.

O Capítulo III abrange uma descrição dos procedimentos utilizados no presente trabalho. Este capítulo descreve o método de preparação dos nanofluidos, além do princípio de funcionamento dos equipamentos utilizados na análise das propriedades térmicas dos nanofluidos. Por fim, o capítulo descreve detalhadamente cada componente da bancada experimental utilizada para os testes com nanofluidos no radiador automotivo, princípios de operação desta bancada e memorial dos cálculos de transferência de calor.

O Capítulo IV reúne diferentes análises referentes aos resultados experimentais. As discussões iniciam-se com a validação dos resultados experimentais, desde propriedades até os resultados obtidos na bancada experimental. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos para as propriedades dos nanofluidos. Finalmente, são apresentados os resultados obtidos com relação ao desempenho dos nanofluidos no radiador.

O capítulo V encerra o trabalho, apresentando as principais ideias e conclusões obtidas a partir dos experimentos do presente trabalho. São também apresentadas as perspectivas futuras para esta pesquisa e para este campo de atuação.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são abordados os aspectos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho. Os tópicos abordados são: definições sobre nanofluidos, condutividade térmica e viscosidade de nanofluidos e, por fim, aplicações de nanofluidos em sistemas térmicos. Em adição, são apresentados os principais resultados da literatura referente a estes tópicos, para uma posterior comparação com os resultados do presente estudo.

2.1. Nanofluidos

O termo nanofluidos foi introduzido por Choi (1995) para denominar as suspensões coloidais, em escala nanométrica (1 a 100nm), de sólidos em líquidos. Devido à elevada condutividade térmica das nanopartículas, os nanofluidos possuem uma condutividade térmica também superior em relação a seus respectivos fluidos base, o que implica em um grande potencial de transferência de calor, tanto em condição monofásica como em mudança de fase. Os nanofluidos também têm potencial em incrementar o fluxo crítico de calor (CHF), com uma pequena redução em termos de transferência de calor, resultando em mais uma gama de aplicações, principalmente, em reatores nucleares. Este potencial despertou o interesse da comunidade científica nesta nova classe de fluidos.

A Tab. 2.1 ilustra como os valores de condutividade térmica dos sólidos utilizados como nanopartículas são superiores aos valores de condutividade de fluidos refrigerantes e óleos em gerais. Ao analisar a Tab. 2.1, é possível imaginar uma mistura das características dos sólidos e dos líquidos para obter um fluido idealizado, visto que a obtenção de um fluido com condutividade térmica superior, e com capacidade de incrementar o fluxo crítico de calor, implica em um potencial térmico com algumas possibilidades de aplicações em transferência de calor.

Tabela 2.1 – Condutividade térmica de sólidos e líquidos

Sólidos		Líquidos	
Material	k (W/m-K)	Material	k (W/m-K)
Nanotubos de Carbono (CNT)	3000	Água	0,613
Prata (Ag)	426	Etilenoglicol	0,253
Ouro (Au)	317	Propilenoglicol	0,182
Óxido de Cobre (CuO)	69	Óleo de Motor	0,145
Alumina (Al ₂ O ₃)	40	“Poly-Alpha-Olefin” (PAO)	0,142
Óxido de Titânio (TiO ₂)	13,7	Etanol	0,18
Óxido de Silício (SiO ₂)	1,4	Amônia	0,5
Óxido de Zinco	116	R12	0,07
Carbeto de Silício	490	Querosene	0,15

A tabela 2.2 apresenta uma lista com todos os artigos revisados na presente tese, indicando o contexto no qual se enquadra o trabalho desenvolvido.

Tabela 2.2 – Resumo dos artigos revisados no presente trabalho

Autores	Nanofluidos	Aplicações	Resultados
Abdul Hamid et al. (2016)	TiO ₂ /água-EG	Transf. calor	EXPERIMENTAL
Ali et al. (2015)	ZnO/água	Radiador	EXPERIMENTAL
ASHRAE 33 (2000)	-	NORMA	-
ASHRAE 41.2 (1987)	-	NORMA	-
ASME (1989)	-	NORMA	-
Baeber et al. (2007)	SiC/água	Síntese	EXPERIMENTAL
Bhimani et al. (2013)	TiO ₂ /água	Radiador	EXPERIMENTAL
Bigdelli et al. (2016)	-	Propriedades	EXPERIMENTAL
Bouanis et al. (2011)	SWCNT/água	Síntese	EXPERIMENTAL
Buongiorno et al. (2009)	Al ₂ O ₃ /água	Propriedades	EXPERIMENTAL
Chandrasekar et al. (2010)	Al ₂ O ₃ /água	Síntese	EXPERIMENTAL
Chaupis (2011)	MWCNT/água	Transf. calor	NUMÉRICO
Chen (2010)	Cu/DOT3	Síntese	EXPERIMENTAL
Chevalier et al. (2007)	Vários	Viscosidade	EXPERIMENTAL
Choi (1995)	-	-	TEÓRICO
Chopkar et al. (2007)	Al ₂ Cu/água	Síntese	EXPERIMENTAL
Ding et al. (2006)	CNT/água	Transf. calor	EXPERIMENTAL
Donzelli et al. (2009)	-	refrigeração	TEÓRICO
Eastman et al. (2001)	Cu/EG	Síntese	EXPERIMENTAL
Elias et al. (2014)	Al ₂ O ₃ /"coolant"	Propriedades	EXPERIMENTAL
Esfahany et al. (2016)	Grafeno/água	viscosidade	EXPERIMENTAL
Esfe et al. (2016)	DWCNT-ZnO/água	condutividade	EXPERIMENTAL
Evans et al. (2006)	-	condutividade	TEÓRICO
Evans et al. (2008)	-	condutividade	TEÓRICO
Fontes et al. (2015)	CNT,diamante/água	propriedades	EXPERIMENTAL
Ghozatloo et al. (2013)	Grafeno/água	condutividade	EXPERIMENTAL
Hajjar et al. (2014)	Grafeno/água	condutividade	EXPERIMENTAL
Hamilton e Crosser (1962)	-	condutividade	TEÓRICO
Harandi et al. (2016)	MWCNT-Fe ₂ O ₃ /EG	condutividade	EXPERIMENTAL
Heris et al. (2013)	CuO/água-EG	radiador	EXPERIMENTAL
Huang et al. (2015)	MWCNT/Água	Transf. calor	EXPERIMENTAL
Hussein et al. (2014a)	TiO ₂ /água	radiador	EXPERIMENTAL
Hussein et al. (2014b)	TiO ₂ /água	radiador	EXPERIMENTAL
Hwang et al. (2007)	-	síntese	EXPERIMENTAL
Ijam e Saidur (2012)	TiO ₂ /água	Transf. calor	EXPERIMENTAL

Tabela 2.2 (continuação)

Autores	Nanofluidos	Aplicações	Resultados
Jackson (2007)	-	CHF	TEÓRICO
Jang e Choi (2004)	-	condutividade	TEÓRICO
Jeong et al. (2013)	ZnO/água	propriedades	EXPERIMENTAL
Jiang et al. (2014)	-	condutividade	TEÓRICO
Kannan et al. (2014)	Al ₂ O ₃ /água	radiador	EXPERIMENTAL
Karami et al. (2014)	CNT/água	solar	EXPERIMENTAL
Kebblinski et al. (2002)	CuO/água	síntese	EXPERIMENTAL
Kim et al. (2007)	-	CHF	TEÓRICO
Kleinstreuer et al. (2008)	-	medicina	TEÓRICO
Leong et al. (2010)	-	radiador	EXPERIMENTAL
Leong et al. (2006)	-	condutividade	TEÓRICO
Li et al. (2015)	ZnO/EG	condutividade	EXPERIMENTAL
Lu e Zhao (2010)	-	síntese	EXPERIMENTAL
Ma et al. (2006)	-	Ref. eletrônicos	EXPERIMENTAL
Madesh et al. (2014)	Ag/EG	Transf. calor	EXPERIMENTAL
Maxwell (1873)	-	condutividade	TEÓRICO
Mohamad (2015)	-	-	TEÓRICO
Motta (2012)	Al ₂ O ₃ /água	propriedades	EXPERIMENTAL
Munkhbayar et al. (2012)	MWCNT/água	condutividade	EXPERIMENTAL
Nambeesan et al. (2015)	Al ₂ O ₃ /água-EG	Transf. calor	EXPERIMENTAL
Nguyen et al. (2007)	Al ₂ O ₃ /água	Transf. calor	EXPERIMENTAL
Nikkam et al. (2014)	SiC/água-EG	síntese	EXPERIMENTAL
Parashurama et al. (2015)	CuO/água	radiador	EXPERIMENTAL
Paul et al. (2010)	-	condutividade	TEÓRICO
Peyghambarzadeh et al. (2011)	Al ₂ O ₃ /água	radiador	EXPERIMENTAL
Peyghambarzadeh et al. (2013)	CuO e Fe ₂ O ₃ /água	radiador	EXPERIMENTAL
Routbort (2009)	-	refrigeração	TEÓRICO
Selvakumar e Suresh (2012)	CuO/água	Transf. calor	EXPERIMENTAL
Serebryakova et al. (2015)	Al ₂ O ₃ /água-EG	propriedades	EXPERIMENTAL
Singh et al. (2006)	-	radiadores	TEÓRICO
Spanhel e Anderson (1991)	-	síntese	EXPERIMENTAL
Sundar et al. (2014)	Al ₂ O ₃ /água-EG	propriedades	EXPERIMENTAL
Sundar et al. (2016)	Diamante/água	propriedades	EXPERIMENTAL
Taylor e Kyuatt (1994)	-	incerteza	TEÓRICO
Timofeeva et al. (2011)	SiC/EG	Transf. calor	EXPERIMENTAL
Tomar e Tripathi (2015)	Al ₂ O ₃ /água-EG	radiador	EXPERIMENTAL
Tzeng et al. (2005)	CuO/óleo	Transf. calor	EXPERIMENTAL
Usri et al. (2015)	TiO ₂ /água-EG	Transf. calor	EXPERIMENTAL
Utomo et al. (2012)	Ti/água	condutividade	EXPERIMENTAL
Wang et al. (2003)	-	condutividade	TEÓRICO
Wen et al. (2010)	-	revisão	TEÓRICO
Xie et al. (2005)	-	condutividade	TEÓRICO
Xie et al. (2016)	MWCNT/água	viscosidade	EXPERIMENTAL
Xing et al. (2015)	MWCNT/água	condutividade	EXPERIMENTAL
Xue e Xu (2005)	-	condutividade	TEÓRICO
Yan e Liu (2008)	-	criocirurgia	TEÓRICO
Yu e Choi (2004)	-	condutividade	TEÓRICO
Yu et al. (2012)	Al ₂ O ₃ /água-EG	Transf. calor	EXPERIMENTAL
Zarifi e Jahanfarina (2014)	TiO ₂ /água	Reator nuclear	TEÓRICO
Zhu et al. (2004)	Cu/EG	síntese	EXPERIMENTAL
Presente trabalho	MWCNT/água	radiador	EXPERIMENTAL
Presente trabalho	MWCNT e grafeno/água	radiador	EXPERIMENTAL

Aplicações dos nanofluidos

Nanofluidos podem ser utilizados em sistemas de refrigeração, reduzindo o consumo de energia. Com maior capacidade de troca térmica, os equipamentos podem ser utilizados em potências reduzidas, mantendo o mesmo nível de refrigeração. Esta redução pode chegar a

1 trilhão de kJ energia, para a indústria dos EUA, por exemplo (Routbort, 2009). A utilização de menos potência promove também uma redução de 5,6 milhões de toneladas métricas na emissão de dióxido de carbono, 21 mil toneladas de dióxido de enxofre e 8,6 mil toneladas de óxidos de nitrogênio, além de diminuir a quantidade de fluido utilizados nos sistemas. Alguns nanofluidos também podem ser usados como fluidos inteligentes, controlando o fluxo de calor. Pode ser configurado em um estado onde haja reduzida transferência de calor, ou um estado de alta condutividade, onde a condução se torna mais eficiente (Donzelli et al., 2009).

Reatores nucleares podem ter um melhor fluido de pressurização do reator, pois utilizando nanofluidos ao invés de água, o aumento da molhabilidade do fluido proporciona aumento do fluxo crítico de calor (CHF), que é o limitante na geração de vapor (Kim et. al., 2007). Os nanofluidos mostram grande potencial em aumentar o CHF, com uma pequena diminuição na transferência de calor (Jackson, 2007). Por outro lado, é necessário conhecer a quantidade de nanopartículas que seriam levadas pelo vapor de ebulição, além da compatibilidade do nanofluido com outros componentes dos reatores, fatos que implicam medidas adicionais de segurança de operação e eliminação do nanofluido. Nanofluidos podem também ser utilizados em sistemas de arrefecimento de emergência, com o objetivo resfriar superfícies com mais eficiência.

Zarifi e Jahanfarnia (2014) avaliaram o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos TiO_2 em um reator nuclear. Foi encontrado que quanto maior a concentração de nanopartículas, mais a temperatura do combustível central poderia ser reduzida, o que aumenta a vida útil do equipamento além de permitir uma redução em suas dimensões. Para uma concentração 10% em volume, a diferença no gradiente de temperatura foi próxima de 20°C .

Os nanofluidos também apresentam potencial de aplicação no setor automotivo. Os óleos de motor, por exemplo, possuem propriedades térmicas muito pobres, que podem ser incrementadas com a adição de nanopartículas.

Tzeng et al. (2005) avaliaram nanofluidos de CuO e Al_2O_3 em óleo de motor, em termos de desempenho de transferência de calor. Foi utilizado o sistema de transmissão de um carro 4WD como plataforma de testes. Os resultados indicaram que o melhor fluido foi o nanofluido de CuO , pela distribuição de temperatura pequena tanto em alta como em baixa rotação do motor, além do melhor efeito de transferência de calor.

O uso de nanofluidos no sistema de arrefecimento permitiria menor tamanho e melhor posicionamento dos radiadores, devido a uma melhor eficiência na transferência de calor, consequentemente menos energia seria gasta para vencer o arrasto aerodinâmico.

A redução na área do radiador é estimada em cerca a 10%, e o consumo de combustível pode diminuir 5%, em projeção realizada por Singh et al. (2006). Porém, deve ser analisada

a possibilidade de erosão das paredes do radiador e das tubulações, para que evite a sua falha.

Peyghambarzadeh et al. (2011) investigaram experimentalmente o desempenho de um radiador automotivo com nanofluidos alumina/água. As propriedades térmicas dos nanofluidos foram estimadas com base em balanço de concentrações e utilizando correlações disponíveis na literatura. A vazão de líquido variou entre 2 e 6 litros por minuto, enquanto a concentração máxima utilizada foi 1% (em volume) para os dois tipos de nanofluido. Vale ressaltar que para a faixa de vazões analisada o fluxo obtido foi turbulento para a água e laminar para o etilenoglicol. Para a melhor condição, foi observado um incremento de 40% na transferência de calor comparado ao fluido base, enquanto a condutividade térmica para a mesma concentração de nanopartículas foi estimada como apenas 15% superior à do fluido base.

Hussein et al. (2014a) estudaram a transferência de calor utilizando nanofluidos SiO_2 /água e TiO_2 /água em um radiador automotivo. Utilizaram uma vazão volumétrica de 2 a 8 litros por minuto, temperatura de entrada do líquido no radiador entre 60 e 80°C e concentrações máximas de 2%. Um banho térmico foi utilizado para simular a carga térmica do motor, e a temperatura de superfície nos tubos do radiador foi medida em diversos pontos, além das medições dos gradientes de temperatura e pressão entre entrada e saída de líquido no radiador. O nanofluido de óxido de silício apresentou um maior incremento na transferência de calor comparado com o óxido de titânio, que por sua vez apresentou um incremento significativo comparado com a água pura. O máximo incremento no número de Nusselt observado foi de 22,5%.

Kannan et al. (2014) analisou o desempenho de nanofluidos de alumina em água em um radiador automotivo, em duas concentrações diferentes (0,25 e 0,5% em volume), em vazões de 0,5 a 0,15 kg/s e temperaturas de entrada do líquido entre 35 e 60°C, e verificaram um incremento na taxa de transferência de calor ao comparar os nanofluidos com o fluido base. O percentual de aumento da transferência de calor foi maior para os testes com menor temperatura de entrada.

Ainda no setor automotivo, Wen (2010) propôs que combustíveis podem ter o calor de combustão aumentado com a adição de nanopartículas, e diminuindo a emissão de óxido nitroso. Nanofluido de alumínio em água pode ser um exemplo de aditivo em combustíveis.

Nanofluidos também podem substituir os fluidos de freio convencionais, para aumentar a segurança dos sistemas de frenagem. A elevada energia cinética gerada por uma frenagem é dissipada na forma de calor para o fluido de freio. Se o fluido atinge o ponto de ebulição, ocorre um bloqueio de vapor, que retarda a dissipação do calor, gerando um risco de segurança.

No campo da eletrônica, nanofluidos podem elevar a capacidade de arrefecimento dos microchips. Os sistemas microeletrônicos se apresentam cada vez mais em tamanho reduzido, porém a temperatura de operação é muitas vezes elevada, o que demanda um sistema de refrigeração que utiliza líquido. Nanofluidos tem potencial para dissipar as grandes quantidades de calor como fluido de arrefecimento, e neste contexto, espera-se uma nova geração de dispositivos de refrigeração (Ma et al., 2006).

Selvakumar e Suresh (2012) estudaram o desempenho de nanofluidos CuO/água, em concentrações volumétricas até 0,2% em volume, em um pequeno dissipador de calor. Foram obtidos incrementos no coeficiente de transferência de calor de até 29,6% comparado com a água pura, apesar de um incremento de 15% na potência de bombeamento necessária no processo.

Nguyen et al. (2007) investigaram nanofluidos Al_2O_3 /água em um sistema de refrigeração de microprocessadores. Os resultados indicaram um aumento considerável no coeficiente de transferência de calor, de até 40% para uma concentração volumétrica de 6,8% de nanopartículas. Estes coeficientes foram superiores para os menores tamanhos de nanopartículas analisados. Além disso, foi observado uma queda considerável nos valores de temperatura de operação do processador.

Ijam e Saidur (2012) analisaram o desempenho da nanofluidos de SiC e TiO_2 em água, em um dissipador de calor. Em comparação com a água pura, as condutividades térmicas dos nanofluidos foram encontradas 12,44% maiores que da água para os nanofluidos de SiC, na concentração 4%, e 9,99% superior para o nanofluido de TiO_2 , na mesma concentração. O desempenho de refrigeração para os dois nanofluidos foram 12% superiores ao do fluido base. A potência de bombeamento foi também analisada, e o consumo para o nanofluido de SiC foi superior ao do nanofluido de TiO_2 .

Nanofluidos podem ser aplicados em sistema de absorção de radiação solar. Por exemplo, Karami et al. (2014) estudaram a possibilidade da aplicação de nanofluidos de carbono CNT, em um coletor de absorção direta de baixa temperatura. Diversas propriedades óticas foram medidas, e os resultados apontaram incrementos de até 32% na condutividade térmica com a adição de apenas 150 ppm de CNT ao fluido base.

As aplicações dos nanofluidos não se limitam à engenharia. Na biomedicina existe uma gama de aplicações. No interesse de controlar as respostas das células alvo aos estímulos farmacêuticos, nanofluidos podem ter um papel fundamental. Empregando a nanodistribuição de remédios, a concentração da droga se manterá dentro da janela terapêutica durante o tempo necessário. O problema é a entrega de concentrações uniformes na saída de microcanais (Kleinstreuer et al., 2008).

Existem perspectivas de utilizar nanofluidos no tratamento de câncer, como distribuidores de remédios ou em radioterapia. Nanofluidos magnéticos serão guiados por ímãs através da corrente sanguínea até um tumor, onde altas doses de medicamentos ou radiação seriam liberadas, sem prejudicar os tecidos saudáveis.

A criocirurgia está se tornando um tratamento alternativo ao câncer. O método consiste em utilizar o congelamento para destruir tecidos indesejados. A utilização de nanopartículas de alta condutividade térmica como carga adicional, pode reduzir a temperatura final do processo, aumentar a taxa de congelamento, ampliar o volume de gelo, além de tornar o tratamento mais flexível, interferindo no tamanho, forma e sentido de formação do gelo, podendo oferecer novas oportunidades de tratamento de tumores (Yan, 2008).

2.2. Produção de nanofluidos

Os nanofluidos são considerados estáveis quando comparados com suspensões de partículas em escala micrométrica. Ainda assim, são grandes as dificuldades em obter nanofluidos estáveis por longos períodos, devido à grande possibilidade de formação de aglomerações e deposição de nanopartículas. Por isso, a síntese dos nanofluidos deve ser cuidadosamente analisada, já que a estabilidade é sensivelmente dependente do método de preparação.

Uma das formas de evitar aglomerações é a adição de dispersantes (ou surfactantes) à mistura. Estas substâncias diminuem a tensão interfacial entre o fluido base e as nanopartículas, fato que as mantém dispersas por mais tempo. Entretanto, os surfactantes alteram as propriedades térmicas da mistura, fato que deve ser levado em conta quando for de interesse aplica-los aos nanofluidos. Exemplos de surfactantes: CTAB (cetyl trimethyl ammonium bromide), SDS (sulfate dodecyl sodium), PVA (polyvinyl alcohol), entre outros.

Existem dois caminhos para a síntese de nanofluidos: os métodos de um passo e de dois passos. O primeiro consiste naqueles que combinam a síntese das nanopartículas e dispersão no fluido base em um único processo, enquanto nos métodos de dois passos as partículas são sintetizadas na forma de pó seco e, posteriormente, dispersas no fluido base por meio de um processo físico.

Os métodos de um passo são geralmente mais caros, porém mais eficientes quanto ao tempo de estabilidade dos nanofluidos. Geralmente o material que dará origem as nanopartículas são evaporados em condições de vácuo e posteriormente condensados em meio ao fluido base.

Keblinski et al. (2002) utilizaram um método físico de um passo para preparação de nanofluidos. No interior de uma câmara de vácuo, vapor de cobre foi, diretamente,

condensado em forma de nanopartículas e posto em contato com etilenoglicol escoando a baixa pressão. A mistura final mostrou-se homogênea, e com condutividade térmica, significativamente, superior à do etilenoglicol. Kao et al. (2007) produziram nanofluidos de óxido de cobre em fluido de freio por meio de um único passo, utilizando arco submerso (SANSS). Uma barra de cobre puro foi utilizada como eletrodo, a qual foi derretida e vaporizada em um fluido dielétrico (chamado DOT3). Após a haste atingir um estado vaporizado e coagular para o fluido de freio, o nanofluido pronto foi extraído. O cobre reagiu com o oxigênio do fluido base para formar as nanopartículas de óxido de cobre, as quais já se encontravam dispersas no fluido. Para uma concentração mássica de 2% foi verificado um aumento da condutividade de 0,03 para 0,05 W/m K. Chen (2010) também utilizou o método do arco submerso para a produção de nanopartículas de óxido de titânio baseados em água. Um bastão de titânio puro foi exposto a um arco submerso sob um ambiente de vácuo controlado, este bastão foi fundido e evaporado. Após esta etapa, o metal passou por três processos: nucleação, condensação e crescimento. Ao invés de nanopartículas de titânio, foram formadas partículas de TiO_2 , isso ocorreu devido à reação do oxigênio presente na água e no ar com o titânio. A intensidade da corrente elétrica utilizada no processo influenciou, significativamente, no tamanho, na distribuição e na esfericidade das nanopartículas.

Zhu et al. (2004) produziram nanofluidos de cobre em etilenoglicol utilizando um método de um passo por redução química. Uma solução 0,1M (0,1 mol de soluto para 1 litro de solução) de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ em etilenoglicol foi misturada com 5 ml de uma solução 0,01M de PVP-K30, seguido de agitação magnética por 30 minutos. Depois, 25 ml de uma solução 0,25M de $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ foi adicionada e uma nova agitação foi necessária por mais 15 minutos. Após um processo de resfriamento, os nanofluidos de cobre foram obtidos. Nenhuma purificação adicional foi necessária, e testes de estabilidade indicaram que os nanofluidos ficaram estáveis por mais de 3 semanas.

Eastman et al. (2001) produziram nanofluidos de cobre em etilenoglicol utilizando um método de um passo. Este método envolveu o contato de vapor metálico com um fluxo de vapor de um fluido em baixa pressão. Os resultados indicaram poucas aglomerações e partículas com tamanho médio 10nm.

A desvantagem dos métodos de um passo é que estes precisam ser desenvolvidos por lotes, ou seja, normalmente a produção acontece apenas em pequenas quantidades, inviabilizando a produção comercial de nanofluidos. Além disso, o controle sobre parâmetros importantes, como tamanho das nanopartículas, é limitado. Outra restrição é que o fluido base deve possuir baixa pressão de vapor, a fim de se evitar aglomerações de nanopartículas (Chaupis, 2011).

Os métodos de dois passos permitem uma maior variedade de materiais e concentrações para os nanofluidos. O custo é inferior e a viabilidade de produção em grande escala é maior, se comparado aos métodos de um passo. Por meio de dois passos, as nanopartículas são produzidas em uma primeira etapa na forma de pó, e depois são dispersas no fluido base.

Seguem alguns exemplos de métodos para produção de nanopartículas:

- Condensação de gás inerte: neste método, o material base é vaporizado em uma câmara de vácuo e, em seguida, condensa-se este vapor em nanopartículas por colisão com um fluxo de gás inerte a uma pressão controlada.
- Sol-Gel: Neste método uma solução (sol) evolui no sentido de formar um sistema bifásico de gel, contendo tanto a fase líquida, quanto a fase sólida. As fases são separadas posteriormente, o que pode ser feito de diversas maneiras, como por exemplo a centrifugação. Lu e Zhao (2010) produziram nanopartículas de ZnO a partir de uma solução aquosa de hidrato de nitrato de zinco ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$). Este método, inicialmente, propõe a ebulição de uma solução etanoica de acetato de zinco dihidratado para formar o precursor do zinco (Spanhel, 1991). O hidrato foi dissolvido em água, formando uma solução de concentração molar 0,1M enquanto HMT ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) foi dissolvido em água formando uma solução de 0,5 a 2,0M. Ambas as soluções foram agitadas por uma haste magnética, depois misturadas e guardadas em forno por 45 minutos, sem agitação. O precipitado formado foi seco e, posteriormente, aquecido, obtendo-se assim as nanopartículas de ZnO, que em sequência, foram dispersas em água.
- Deposição de vapor químico (CVD): método usado para produzir materiais sólidos de alta pureza e desempenho. Nesse, um substrato é exposto a um ou mais precursores de voláteis, os quais reagem ou se decompõem sobre a superfície do substrato, produzindo o depósito pretendido. O material depositado pode ser de várias formas: policristalino, monocristalino, amorfo e epitaxial. Estes materiais incluem silício, fibras de carbono, nanotubos de carbono, tungstênio, nitreto de silício, etc. Bouanis et al. (2011) produziram nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT) a partir de um processo CVD, assistido por um filamento quente. Os resultados experimentais indicaram uma influência, significativa, do filamento quente e da temperatura de crescimento de grão no diâmetro e na cristalinidade dos SWCNT. Verificou-se que uma maior densidade de SWCNT longos foi obtida com a ajuda do filamento quente, enquanto que o diâmetro SWCNT aumentou com o incremento da temperatura de crescimento de grão.

Baeber et al. (2007) produziram nanopartículas de SiC por um processo CVD combinado com impactação das nanopartículas. As nanopartículas são sintetizadas por injeção de reagentes químicos em um plasma térmico, que rapidamente expande através de um bocal, resultando em uma nucleação. Foram obtidas partículas de tamanho médio 20nm.

Nikkam et al. (2014) produziram nanofluidos de SiC em água/etilenoglicol (50:50), por meio de dois passos. As nanopartículas foram adquiridas e misturadas ao fluido base por meio de sonicação por 15 minutos. O pH da mistura foi ajustado a 9,5, utilizando NaOH. Nanofluidos de concentração mássica de até 9% foram mantidos estáveis por uma semana.

Após a produção das nanopartículas em forma de pó seco, é necessário dispersar estas nanopartículas no fluido base, de forma a compor um fluido homogêneo e estável. A seguir, alguns dos principais métodos de dispersão de nanopartículas nos fluidos base:

- Banho ultrassônico e sonicação: são métodos semelhantes, onde o efeito de uma vibração a baixa frequência (da ordem de 10 kHz) é transferido à mistura. No banho ultrassônico, esse efeito é transmitido pela água, fluido do banho ou pela câmara. Na sonicação, a vibração é transmitida diretamente pela ferramenta do sonotrodo, que permanece em contato com o fluido durante o processo. Chandrasekar et al. (2010) prepararam nanofluidos de óxido de alumínio baseados em água, utilizando um vibrador ultrassônico, com pulsos de 100 W a uma frequência de 36 kHz. O tempo de vibração foi de 6 horas, e garantiu a dispersão estável, sem a necessidade do uso de surfactantes ou mudança de pH.

Chopkar et al. (2007) produziram nanofluidos por meio de 2 passos. Nanopartículas de Al_2Cu e Ag_2Al foram produzidas por moagem. Para a homogeneização no fluido base foi utilizado 1% em volume de ácido oleico, além de vibração ultrassônica e agitação magnética intensiva.

- Homogeneização a alta pressão: este método consiste em pressurizar a amostra, fornecendo assim, a energia necessária para quebrar as aglomerações, dispersando, dessa maneira, as nanopartículas no fluido base. Primeiramente, a dispersão contendo aglomerações é inserida no equipamento no qual é pressurizada por um pistão. Nesta etapa, energia é fornecida ao fluido fazendo com que aglomerações sejam quebradas. Os fluxos são divididos entre microcanais ligados às câmaras onde estão localizados os pistões, e posteriormente, estes fluxos são recombinados em uma câmara de reação, situada após a seção de medição de pressão, na qual a velocidade do fluido já pressurizado é aumentada. As aglomerações são quebradas pela combinação de mecanismos: Impactos fortes e irregulares com a parede interior da câmara

de interação, microbolhas formadas por implosão de energia de cavitação induzida, e alta taxa de cisalhamento do fluxo. O processo resulta em um fluido disperso e homogêneo (Hwang, 2007). A Fig. 2.1 mostra um esquema do processo.

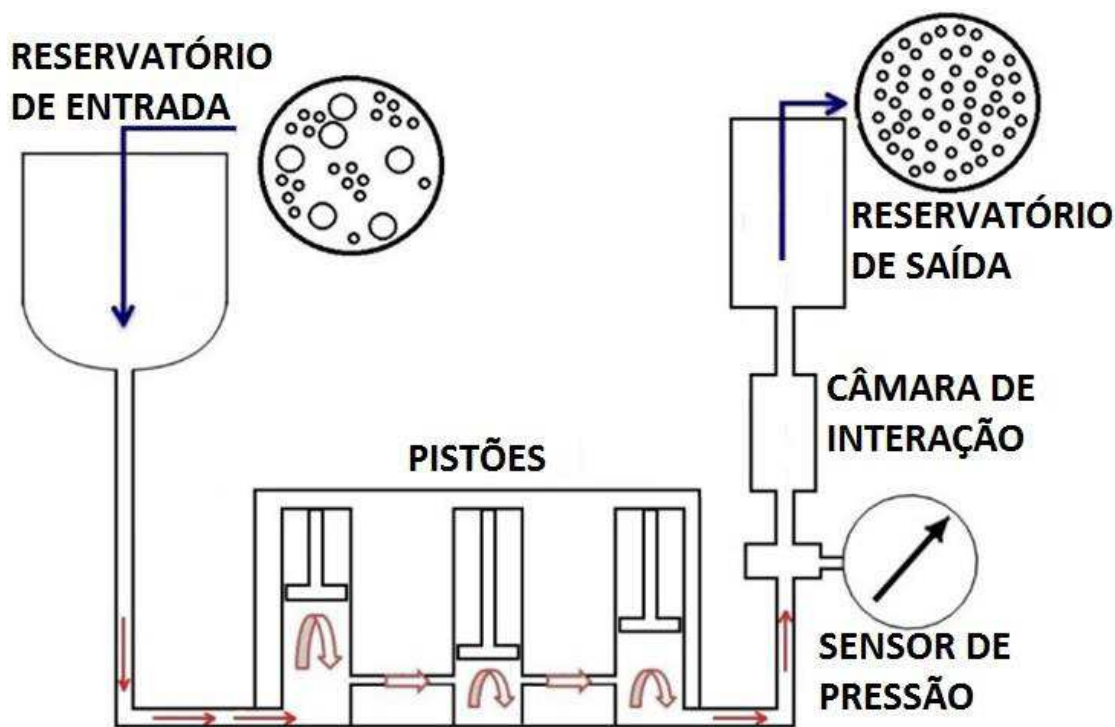


Figura 2.1 – Esquema do processo de homogeneização a alta pressão.

2.3. Propriedades dos nanofluidos

Neste tópico, são abordadas as propriedades dos nanofluidos, especificamente condutividade térmica e viscosidade. Alguns modelos de previsão da condutividade térmica desta classe de fluido são apresentados, bem como formas de medição e alguns resultados da literatura acerca dessas duas propriedades.

2.3.1. Condutividade térmica

A condutividade térmica dos nanofluidos é em geral, o principal foco de estudo desta nova classe de fluidos. Devido a elevada condutividade térmica dos sólidos, comparado aos líquidos, os nanofluidos tendem a apresentar uma condutividade térmica superior ao fluido base. Alguns fatores são encontrados na literatura como influentes na condutividade térmica dos nanofluidos:

- Concentração de nanopartículas;
- Natureza das nanopartículas e do fluido base;
- Tamanho e forma das nanopartículas;
- Temperatura;
- Aditivos;
- Acidez.

Alguns fatores adicionais são considerados fundamentais por alguns pesquisadores na análise do fenômeno do incremento do aumento da condutividade térmica e transferência de calor:

- Movimento browniano: movimento aleatório das partículas no fluido, é tratado por muitos como mecanismo fundamental em nanofluidos. A influência está também associada a presença de aglomerações.
- Camada interfacial (partícula-fluido): possui propriedades intermediárias entre o fluido base e as nanopartículas, por isso espera-se que quanto maior sua espessura, maior a condutividade do nanofluido. Estas características dependem da natureza da interação fluido-partícula.

A maioria dos modelos desenvolvidos para a condutividade térmica de nanofluidos são baseados em modelos clássicos para a condutividade de misturas como o de Maxwell (1873) e Hamilton-Crosser (1962).

O modelo de Maxwell leva em consideração que o transporte de energia térmica em suspensão é difusivo, pois a distância entre partículas é muito maior que as moléculas de fluido. Assim, existe um meio efetivo com condutividade térmica intermediária. A equação de Maxwell leva em consideração as condutividades do fluido base e da partícula, além da concentração. Já o modelo de Hamilton-Crosser (1962) introduz um fator de forma na equação de Maxwell.

Yu e Choi (2003) desenvolveram um novo modelo, modificando a equação de Maxwell, para a condutividade térmica de suspensões sólido-líquido, incluindo como novo fator a presença de uma nanocamada. Devido a esta interface, o maior impacto na condutividade térmica ocorre para pequenos tamanhos de nanopartículas (menores que 10nm). Neste modelo se pode notar a influência da espessura de nanocamada. Para maiores diâmetros da nanopartícula, a influência da nanocamada se torna menor, aproximando a correlação proposta ao modelo de Maxwell.

Baseado na teoria de Maxwell e na teoria de polarização média, Xue (2003) apresenta um modelo para determinar a condutividade térmica efetiva de nanofluidos. O autor considera o conjunto partícula-nanocamada como uma denominada partícula complexa. A partícula é considerada na forma elíptica, de semi-eixos a , b , c . Neste modelo, B_{2x} é um parâmetro de forma, que vale $1/3$ para partículas esféricas. Xue (2003) comparou seu modelo a alguns resultados experimentais, inclusive para partículas de nanotubos de carbono. Neste caso, estimou B_{2x} como igual a $0,0062$ para o diâmetro e comprimento analisado. Nas equações, λ é um fator de forma e B um parâmetro auxiliar de forma.

Wang et al. (2003) desenvolveram um modelo que envolve uma aplicação e melhora das teorias do meio efetivo e fractal, para determinar a condutividade térmica de nanofluidos a base de partículas metálicas e não metálicas, considerando o efeito do tamanho das nanopartículas e da adsorção do líquido na superfície das nanopartículas (nanocamada). O modelo fractal proposto se relaciona diretamente com a interação entre partículas e o processo de formação de clusters. Devido à dificuldade de determinação da condutividade de nanocamada, este parâmetro foi, num primeiro momento, aproximado. Os resultados foram comparados com outros modelos e com resultados experimentais para nanofluidos de CuO em água, obtendo boa aproximação quando considera o efeito da nanocamada, apesar deste parâmetro não ter sido ainda devidamente estudado.

Jang e Choi (2004) encontraram que o movimento browniano em escala molecular e nanoescala é um mecanismo chave no comportamento térmico de suspensões. O modelo foi baseado em cinética, resistência térmica de kapitza e convecção. Foi derivada uma expressão envolvendo 4 modos de transporte de energia: colisões entre moléculas do fluido base, difusão de nanopartículas no fluido base, colisão entre partículas devido ao movimento browniano, e interações entre partículas em movimento com o fluido base. O modelo proposto foi considerado como capaz de prever o comportamento da condutividade térmica de nanofluidos.

Xie et al. (2005) consideraram que a principal deficiência dos modelos tradicionais para a predição da condutividade térmica de nanofluidos é deixar de levar em consideração alguns mecanismos. Assim, derivaram da solução geral da condução de calor em coordenadas esféricas e do modelo de esfera rígida equivalente, uma expressão para determinar a condutividade térmica, considerando a espessura de nanocamada, tamanho de nanopartícula, concentração e as condutividades das partículas e do fluido base. A espessura, a microestrutura, e as propriedades físico-químicas desta nanocamada são fortemente dependentes das nanopartículas suspensas, do fluido base, e das interações entre eles. É esperado que a nanocamada apresente propriedades intermediárias entre as nanopartículas e o fluido base. Foi assumida uma variação linear neste modelo. Determinando a espessura

da nanocamada, foi possível determinar sua condutividade térmica e, consequentemente, do nanofluido.

A Tab. 2.3 apresenta alguns dos modelos matemáticos utilizados na previsão de condutividade térmica de nanofluidos:

Tabela 2.3 – Modelos da literatura para previsão da condutividade térmica de nanofluidos

Autores	Modelo	Eq. nº
Maxwell (1873)	$k_{eff} = k_{bf} + 3 \cdot \phi \cdot \left(\frac{k_v - k_{bf}}{2 \cdot k_{bf} - \phi \cdot (k_v - k_{bf})} \right) \cdot k_{bf}$	2.1
Hamilton e Crosser (1962)	$k_{nf} = k_{bf} + 3\psi^{-1}\phi \frac{k_p - k_{bf}}{(3\psi^{-1} - 1)k_{bf} + k_p - \phi(k_p - k_{bf})} k_{bf}$	2.2
Yu e Choi (2003)	$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_{bf} + (2(k_p - k_{bf}) \cdot (1 + \beta)^3) \cdot \phi}{k_p + 2k_{bf} + ((k_p - k_{bf}) \cdot (1 + \beta)^3) \cdot \phi} \text{ onde } \beta = \frac{h_{nc}}{r}$	2.3
Xue (2003)	$9 \left(1 - \frac{\phi}{\lambda} \right) \left(\frac{k_{nf} - k_{bf}}{2k_{nf} + k_{bf}} \right) + \frac{\phi}{\lambda} \left[\frac{k_{nf} - k_{cx}}{k_{nf} + B_{2x} \cdot (k_{cx} - k_{nf})} + 4 \cdot \frac{k_{nf} - k_{cy}}{2k_{nf} + (1 - B_{2x}) \cdot (k_{cy} - k_{nf})} \right] = 0$	2.4
Wang (2003)	$k_{eff} = \frac{(1 - \phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_{cl}(r) \cdot n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_{bf}}}{(1 - \phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_{bf} \cdot n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_{bf}}}$	2.5
Xue e Xu (2005)	$\left(1 - \frac{\phi}{\alpha_2} \right) \cdot \left(\frac{k_{nf} - k_{bf}}{2k_{nf} + k_{bf}} \right) + \frac{\phi}{\alpha_2} \cdot \left[\frac{(k_{nf} - k_{lr}) \cdot (2k_{lr} + k_p) - (\alpha_2 \cdot (k_p - k_{lr}) \cdot (2k_{lr} + k_{nf}))}{(2k_{nf} + k_{lr}) \cdot (2k_{lr} + k_p) + 2\alpha_2 \cdot (k_p - k_{lr}) \cdot (k_{lr} - k_{nf})} \right] = 0$ onde $\alpha_2 = \left(\frac{r}{r + h_{nc}} \right)$	2.6
Xie (2005)	$\text{onde: } \phi_t = \phi \cdot (1 + \beta^3), \quad \theta = \beta_{yf} \cdot \left[\frac{(1 + \beta)^3 - \frac{\beta_{pl}}{\beta_{fl}}}{(1 + \beta)^3 + 2\beta_{yf} \cdot \beta_{pl}} \right]$	2.7
Leong (2006)	$k_{eff} = \frac{(k_p - k_{lr}) \cdot \phi \cdot k_{lr} \cdot (2\beta_4^3 - \beta_3^3 + 1) + (k_p + 2k_{lr}) \cdot \beta_4^3 \cdot (\phi \cdot \beta_3^3 \cdot (k_{lr} - k_{bf}) + k_{bf})}{\beta_4^3 \cdot (k_p + 2k_{lr}) - (k_p - k_{lr}) \cdot \phi \cdot (\beta_4^3 + \beta_3^3 - 1) \cdot k_{bf}}$	2.8

Xue e Xu (2005) determinaram que a condutividade térmica de nanofluidos não pode ser estimada sem levar em consideração o efeito interfacial entre as nanopartículas e o fluido

base e derivaram uma expressão dependente do tamanho das nanopartículas e propriedades interfaciais, além de considerarem o conjunto nanopartícula-nanocamada como uma partícula complexa. Baseado em resultados experimentais determinaram a espessura e condutividade de nanocamada para os nanofluidos alumina/água, óxido de cobre/água e óxido de cobre/etilenoglicol.

Leong et al. (2006) desenvolveram uma correlação considerando a nanocamada como um dos principais mecanismos no aumento da condutividade térmica dos nanofluidos. Considerando a existência da nanocamada, dividiu a determinação da condutividade em duas etapas: cálculo dos campos e gradientes de temperatura e modelagem da condutividade térmica efetiva. Compararam seus resultados com alguns experimentos, e estimaram a condutividade da nanocamada como 3 vezes a do fluido base e com espessura 1nm, para Al_2O_3 -água, e para CuO -água a condutividade de nanocamada estimada foi 5 vezes a do fluido base.

Evans et al. (2008) analisaram o efeito das aglomerações e resistência térmica interfacial na condutividade térmica de nanofluidos. Foi encontrado que a condutividade térmica pode ser fortemente incrementada pela agregação de nanopartículas em aglomerações, e este incremento depende da geometria das aglomerações e da condutividade térmica interfacial. Os autores concluem que partículas e aglomerados de razão de aspecto elevada tendem a compor nanofluidos de maior condutividade térmica.

Em outro trabalho, Evans et al. (2006) analisou, por meio da teoria cinética, que o efeito do movimento browniano na transferência de calor com nanofluidos não é significativo. A análise foi feita por meio de simulações de fluxo de calor com nanofluidos de partículas bem dispersas. Ficou evidente que, o transporte de calor por condução, que pode ser quantificado pela condutividade térmica, é muito mais rápido que o movimento da partícula, quantificado pela sua difusividade. Os resultados foram consistentes com a teoria do meio efetivo e com resultados experimentais da literatura.

Jiang et al. (2014) apresentaram um modelo em que a condutividade térmica de nanofluidos não é afetada apenas pela relação de condutividades dos materiais e fração volumétrica, mas também pelo tamanho da nanopartícula e espessura de nanocamada. Neste modelo, a condutividade da nanocamada foi considerada não-linear ao longo de sua espessura, e a condutividade média desta camada foi calculada por integração. O efeito da nanocamada foi significativo na condutividade térmica dos nanofluidos, especialmente para partículas menores. O modelo obtido apresentou boa concordância com alguns resultados experimentais da literatura.

Por outro lado, Mohamad (2015) afirma que os resultados encontrados na literatura são muito controversos, e que não existe mágica em física. Ele deduziu teoricamente

equações que demonstram que não apenas o tamanho e formato das nanopartículas influenciam a condutividade térmica dos nanofluidos, mas também o alinhamento das nanopartículas com o fluxo de calor. O autor também analisou com relação ao movimento browniano, onde concluiu que a contribuição do movimento particular ao transporte de energia térmica não é significativa. O autor ainda realizou simulações onde a condutividade térmica do fluido era variável, sendo superior próximo às nanopartículas, em até 100 vezes o valor da condutividade do fluido base. Nenhuma diferença na transferência de calor ocorreu. Além disso, como os nanofluidos possuem viscosidade elevada, proporciona um aumento no Reynolds, e uma consequente diminuição na taxa de transferência de calor. Outro fato é que o calor específico da água (fluido base mais comum) é aproximadamente 4184 J/kgK, valor dez vezes superior o maior calor específico de um metal (por exemplo o do cobre é 390 J/kgK). Uma análise sobre convecção natural também indicou uma diminuição na transferência de calor utilizando nanofluidos.

Métodos de medição da condutividade térmica

Diversos pesquisadores têm realizado experimentos para medir a condutividade térmica de nanofluidos. Porém, os resultados encontrados em pesquisas semelhantes são discrepantes, muitas vezes controversos. Parte destas inconsistências se devem às dificuldades associadas aos diferentes métodos de medição da condutividade térmica.

Existem, de forma simplificada, dois tipos de técnicas de medição de condutividade térmica de líquidos: transientes e permanentes (Paul et al., 2010). Dentre as técnicas transientes estão o fio quente transiente, oscilação de temperatura e técnica 3ω . Já os métodos permanentes incluem placas paralelas e célula cilíndrica. A ocorrência de convecção e o fato de nanofluidos não terem forma definida, dificultando a determinação de uma área transversal ao fluxo de calor são as principais fontes de erros e dificuldades experimentais.

Fio quente transiente: O método do fio quente (THW), é uma técnica padrão transiente, baseada na medição do aumento da temperatura de uma fonte de calor linear (fio quente). A técnica consiste em um fio de platina imerso no fluido de teste, inicialmente em equilíbrio térmico, a qual é submetida a um pulso elétrico de baixa magnitude, e uma medição da variação de temperatura do fio em função do tempo é realizada. Se uma taxa de transferência de calor constante é aplicada a uma fonte “infinitamente” longa e fina, a resposta de temperatura pelo parâmetro $\ln(t)$ se torna uma linha reta em um determinado intervalo de tempo, deste intervalo pode-se desenvolver uma expressão para a condutividade térmica (Paul et al., 2010):

$$k = \frac{q}{4\pi(\Delta T_2 - \Delta T_1)} \cdot \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad 2.9$$

Sendo q é a quantidade constante de produção de calor por unidade de tempo e por unidade de comprimento do fio (W/m), k a condutividade térmica do fluido circundante.

Outro equipamento que utiliza uma técnica transiente é o analisador de propriedades térmicas. Uma fonte de calor plana é utilizada para fornecer calor ao fluido de testes, de uma forma parecida com o método do fio quente transiente. As vantagens deste método são medição mais rápida, mais ampla faixa de valores de medição, não necessidade de preparação da amostra e quantidade de amostra necessária flexível (Paul, 2010).

O método 3ω também é similar ao fio quente transiente, em que um fluxo de calor é imposto a um elemento que é aquecedor e termômetro simultaneamente. Uma corrente senoidal de frequência ω é passada pelo fio elétrico, gerando uma onda de calor de frequência 2ω , que por sua vez é deduzida pelo componente de voltagem do equipamento na frequência 3ω . A Eq. 2.10 apresenta a solução da equação para fonte de calor de comprimento infinito pode ser utilizada:

$$\Delta T(r) = \frac{p}{l\pi k} k_o(qr) \quad 2.10$$

Onde P/l representa a amplitude da potência por unidade de comprimento do aquecedor. K_o é um parâmetro dependente da função de Bessel.

Na técnica das placas paralelas, que é realizada em regime permanente, uma pequena quantidade de amostra é colocada entre duas placas de cobre. Aquecedores termicamente isolados são ligados a uma das placas de cobre, estabelecendo um sentido para o fluxo de calor. A temperatura na face de cada uma das placas de cobre deve ser medida. É importante ressaltar que as medições de temperatura em cada placa devem ser precisas, assim como devem mostrar a mesma temperatura antes de iniciar o aquecimento. A condutividade térmica global pode ser calculada por meio da equação de condução de calor unidimensional, e conhecendo-se a condutividade das placas de cobre, a condutividade térmica do líquido confinado pode ser determinada pela Eq. 2.11:

$$k = \frac{q \cdot L_g}{S \cdot \Delta T} \quad 2.11$$

Onde L_g é a espessura de filme de líquido entre as placas de cobre, S a área de seção transversal.

Outro método que utiliza regime permanente é o da célula cilíndrica. Neste método, a amostra é confinada entre dois cilíndricos coaxiais. Um aquecedor elétrico é instalado no cilindro interno, e um fluxo de calor na direção radial é mantido constante. Por meio da equação de condução de calor unidimensional em coordenadas cilíndricas, é possível estabelecer uma equação para calcular a condutividade térmica do líquido interno. A condutividade térmica é calculada pela Eq. 2.12:

$$k = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L_c \left[(\Delta T/Q_e) - (\ln(r_3/r_2)/2\pi L k_c) \right]} \quad 2.12$$

Onde Q_e é a potência dissipada, r_1 , r_2 e r_3 são os raios dos cilindros interno, amostra e externo, k_c a condutividade térmica do cobre e L o comprimento dos cilindros.

Resultados experimentais para a condutividade térmica de nanofluidos

Vários pesquisadores têm investigado experimentalmente a condutividade térmica de nanofluidos. A grande maioria destes tem encontrado um aumento na condutividade térmica, quando comparado ao fluido base. Porém os resultados encontrados na literatura são conflitantes, sendo que alguns encontraram aumentos anômalos na condutividade térmica, de cerca de 30 a 40%, enquanto outros verificaram incrementos discretos, entre 5 e 10%. Em vários casos, pesquisadores diferentes que analisaram o mesmo tipo de nanopartícula encontraram resultados totalmente diferentes, o que pode ser explicado pelos diferentes métodos de medição utilizados e pelo método de preparação dos nanofluidos.

Munkhbayar et al. (2012), por exemplo, analisaram a condutividade térmica de nanofluidos MWCNT/água entre 30 e 45°C. As nanopartículas finais produzidas eram de 20nm de diâmetro e 5µm de comprimento. O Incremento na condutividade térmica foi de até 18% comparado com a água pura, na temperatura 45°C. Este incremento foi crescente com o aumento da concentração volumétrica e também com o aumento da temperatura.

Xing et al. (2015) investigaram experimentalmente a condutividade térmica de nanofluidos compostos de diferentes tipos de CNT em água. Foram testados CNT curtos de paredes simples, longo de paredes simples e de paredes múltiplas, em temperaturas entre 10 e 60°C. Foi encontrado um aumento de 16,2% nos testes com temperatura 60°C para os nanofluidos com CNT longos de paredes simples, relativo ao fluido base. Para os nanotubos de paredes múltiplas, ocorreu o menor incremento, 5%.

Harandi et al. (2016) analisaram a condutividade térmica de nanofluidos híbridos, compostos por nanopartículas de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) e Fe_3O_4 dispersas em etilenoglicol, em concentrações de até 2,3% em volume. Os testes foram conduzidos entre 25 e 50°C. O incremento na condutividade térmica foi de até 30%, e este incremento foi maior conforme aumentado a temperatura de testes e também ao aumentar a concentração de nanopartículas. Esta tendência é ilustrada na Fig. 2.2.

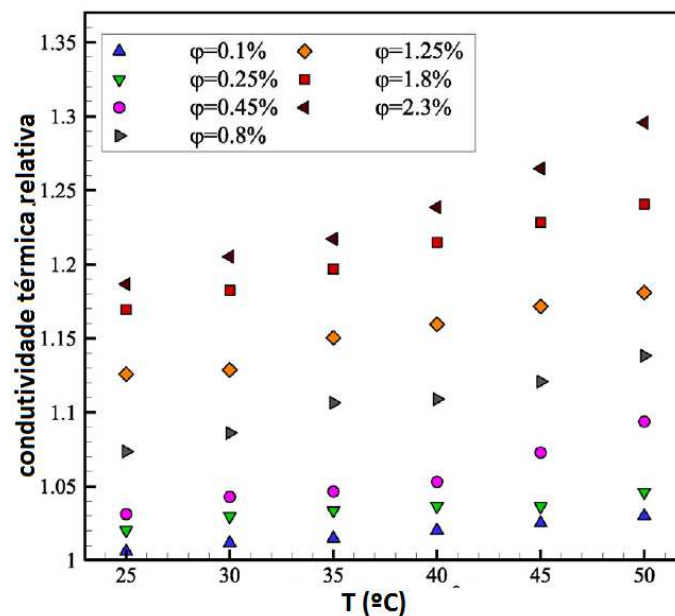


Figura 2.2 – Resultados experimentais de Harandi et al. (2016)

O fluido de arrefecimento automotivo é composto por uma mistura de água, etilenoglicol e alguns aditivos, na maioria das aplicações. A proporção mais usual é 50% para cada fluido, em volume. Na tentativa de encontrar um fluido com melhor desempenho térmico neste campo de aplicação, alguns pesquisadores avaliaram a condutividade térmica de nanofluidos compostos por água e etilenoglicol.

Soltanimehr e Afrand (2016) analisaram a condutividade térmica de nanofluidos que tinham como fluido base água e etilenoglicol (proporção 60:40). Os testes foram realizados entre 25 e 50°C, e a concentração volumétrica dos nanofluidos foi de até 1%. Os autores verificaram um incremento na condutividade térmica de até 34,7%, para a temperatura 50°C e concentração 1%.

Sundar et al. (2014) avaliaram a condutividade térmica de nanofluidos de Al_2O_3 em diferentes proporções de água e etilenoglicol. As concentrações de etilenoglicol no fluido base foram 20, 40 e 60% em massa. A temperatura de teste variou entre 20 e 60°C. Já a concentração volumétrica de nanopartículas dos nanofluidos variou entre 0,3 e 1,5%. O

nanofluido que obteve o maior aumento na condutividade térmica, relativa ao fluido base, foi o composto de 20% etilenoglicol, na concentração 1,5% e temperatura 60°C. Este incremento foi de 32%.

Serebryakova et al. (2015) estudaram a condutividade térmica de nanofluidos de Al_2O_3 dispersos em uma mistura 90% etilenoglicol e 10% água. A concentração volumétrica dos nanofluidos produzidos foi de até 1,5% em volume. A condutividade térmica dos nanofluidos foi no máximo 4% superior à do fluido base, incremento observado para a maior concentração analisada. Os testes foram realizados em temperatura ambiente, 25°C.

Ghozatloo et al. (2013) produziram nanopartículas de grafeno e dispersaram em água, criando nanofluidos de concentração mássica entre 0,01 e 0,05%. Foram verificados incrementos de até 14% na condutividade térmica para a concentração 0,05%, porém testes subsequentes indicaram para uma queda na condutividade térmica dos nanofluidos ao longo do tempo, para todas as concentrações.

Esfe et al. (2015) analisou a condutividade térmica de nanofluidos híbridos, compostos por nanotubos de carbono de parede dupla (DWCNT) e ZnO dispersos em mistura de água e etilenoglicol (60:40), em temperaturas entre 25 e 50°C. Foi encontrado um incremento de até 30% na condutividade térmica, para a concentração 1% e temperatura 50°C. A condutividade térmica relativa foi maior em elevadas concentrações e temperaturas, porém o efeito da concentração na condutividade térmica foi superior. Estes resultados são apresentados na Fig. 2.3.

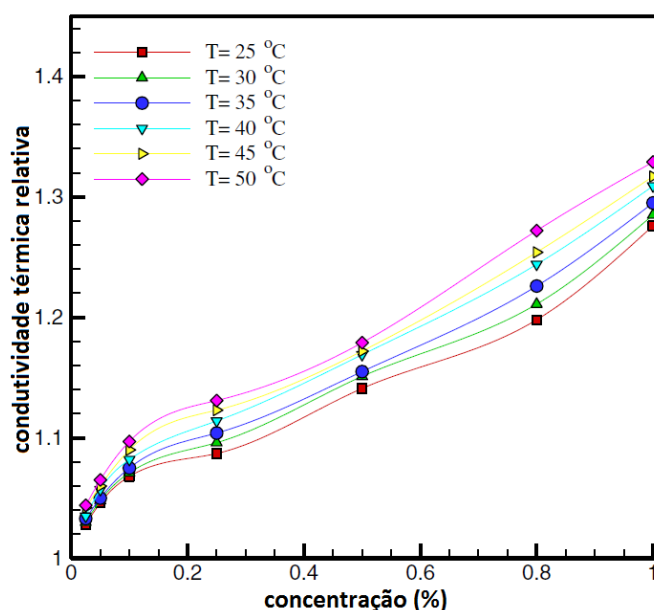


Figura 2.3 – Resultados experimentais de Esfe et al. (2015).

Elias et al (2014) avaliaram as propriedades térmicas de nanofluido composto de fluido de arrefecimento automotivo com nanopartículas de alumina. As amostras foram preparadas com um homogeneizador ultrassônico sem o uso de surfactantes. A concentração de nanopartículas variou entre 0 e 1% em volume, enquanto as propriedades foram medidas entre 10 e 50°C. Foi observada uma condutividade térmica do nanofluido de concentração 1%, maior que a do fluido base em 8%, em diferentes temperaturas. A viscosidade também apresentou um incremento com o aumento da concentração volumétrica de nanopartículas. Foi verificado que para a concentração de 1%, a viscosidade teve um decréscimo de 57,5% ao aumentar a temperatura de 10 para 50°C, enquanto o fluido base teve um decréscimo de 73%, indicando que o efeito do incremento da viscosidade é mais acentuado em maiores temperaturas. A densidade apresentou um ligeiro incremento, sendo o incremento máximo de aproximadamente 2,9%. O calor específico dos nanofluidos foi menor que o fluido base, e crescente com a temperatura.

Tendo em vista os aumentos anômalos apresentados por alguns autores e a grande discrepância dos resultados, Buongiorno et al. (2009) propuseram um estudo de referência (“benchmark”) para determinar a condutividade térmica de diversos nanofluidos. A proposta foi preparar as amostras de nanofluidos em um único laboratório, e distribuir para que diversos laboratórios de universidades medissem a condutividade térmica e os resultados fossem comparados. Para evitar resultados forçados, as amostras foram distribuídas sem informação alguma, ou seja, para cada laboratório foi enviado o fluido base e o nanofluido, mas os cientistas não sabiam de quais materiais se tratava. Apenas depois de mostrados os valores de condutividade térmica medidos por todos os laboratórios foram revelados de quais nanofluidos se tratava. Foram analisados nanofluidos a base de alumina, ouro, óxido de silício, entre outros.

Foram observados aumentos discretos com relação a condutividade térmica do fluido base, de acordo com os resultados obtidos pela maioria dos laboratórios. Para o nanofluido de alumina (cilíndrica) em água (1%), o incremento médio na condutividade foi de 4%. No caso de nanopartículas esféricas de alumina em água (1%), em nenhuma das medições a condutividade térmica aumentou mais de 7%. Em conclusão, não foi verificado aumento anômalo na condutividade térmica dos nanofluidos testados.

A Tab. 2.4 mostra uma síntese de alguns dos principais resultados experimentais recentes encontrados na literatura, acerca de condutividade térmica de nanofluidos. A tabela mostra as faixas de concentrações e temperaturas analisadas, assim como o equipamento/método utilizado nas medições.

Tabela 2.4 – Dados experimentais da literatura para condutividade térmica de nanofluidos

Autores	Nanopartículas		Fluido Base	Preparação	Φ (%)	Máximo Incremento	Método de Medição	T (°C)
	Tipo	Tamanho						
Harandi et al. (2016)	MWCNTs, Fe ₃ O ₄ .	Ø int 3-5nm; Ø ext 5-15nm; Comp. 50µm MWCNTs. Ø 20-30nm Fe ₃ O ₄ .	EG	Agitação.	0,1-2,3%	30%	KD2 Pro	25-50°C
Soltanimehr et al. (2016)	MWCNTs.	Ø int 3-5nm. Ø ext 5-15nm. Comp. 50 µm.	EG 40% , água 60%.	Agitação magnética/ 2,5h, Sonicação, 400W/6 h.	0,025-1,0%	34,7%	KD2 Pro	25-50°C
Sundar et al. (2016).	Nano-diamante	Ø 50nm Comp. 100nm	Água. EG,	Sonicação 2h	0,2-1,0%	22.86%	KD 2 pro	20-50°C
Sundar et al. (2016).	Nano-diamante, Fe ₃ O ₄	ND 5nm, Fe ₃ O ₄ 13nm.	Água. 20:80%, 40:60%, 60:40%,	Agitação magnética 2h.	0,05-0,2%	14,16%	KD 2 pro	20-60°C
Xie, H. et al. (2016).	MWCNTs, [EMIM][DEP]	Ø20-40nm Comp. 1-2µm	Água.	Agitação magnética 10min, Sonicação 5 min.	0,2-1,0%	9,7%	TC 3010L (hot-wire method)	25-80°C
Fontes, et al. (2015).	MWCNT Diamond.	Øint 5nm Øext 15nm Comp.10-50µm Ø 6nm Respectivamente.	Óleo mineral.	Homogeneização a alta pressão.	0-0,5%	27% MWCNT 23% Diamond	transient hot wire	-
Serebryakova, et al. (2015)	Al ₂ O ₃	Tamanho 13nm.	90% EG 10% Água.	Ultrassom 1h.	0-1,5% Volume.	-	-	-
Esfe, et al. (2015)	DWCNT e ZnO	3nm DWCNT 10-30nm ZnO	Água 60% EG 40%	Ultrassom.	0,25-1,0% Volume.	Aumentou.	KD2 Pro	25-50°C
Li, H. (2015).	ZnO	Diâmetro 30nm	EG.	Agitação magnética 4h.	1,75-10,5%	9,13%	transient hot-wire	15-55°C
Hajjar, Z. (2014).	Oxido de grafeno.	Tamanho 1-3µm.	Água.	Sonicação 60 kHz, 200W	0,05-0,25%	47,54%	transient short hot-wire	10-40°C
Sundar et al.. (2014)	Al ₂ O ₃	Tamanho 30nm.	20:80%, 40:60%, 60:40%,E G/água.	Sonicação 40 kHz 490 W.	0-1,5% volume.	32,26%	transient hot wire	20-60°C
Ghozatloo et al. (2013)	Grafeno	Não informado	Água.	Ultrassom 1h.	0,01-0,05% 0,05-5,0% volume.	17%	transient short hot-wire	10-50°C
Jeong, et al. (2013).	ZnO	Tamanho 20-40nm	Água.	Sonicação.	0,05-5,0% volume.	19,8%	-	20-75°C
Munkhbayar, B. (2012)	MWCNTs	Ø 20nm Comp. 5µm	Água.	10 passos de 40 min de ultrasom.	0,1%	18,12%	Transiente hot- wire	15-40°C
Utomo, et al. (2012)	Titânio e alumina	Tamanho 20-60nm	Água.	Ultrassonicação 3min	2-14%	Aumentou.	transient hot wire.	20-25°C
Presente trabalho	MWCNT	Ø 30nm 10µm	Água	Homogeneização a alta pressão	0,05-0,16%	3,5%	Transient hot bridge	25-50°C
Presente trabalho	MWCNT e grafeno	Ø50nm/10µm 5-10µm	Água/EG (70:30)	Homogeneização a alta pressão	0,05-0,3%	5,5%	Transient hot bridge	20-50°C

2.3.2. Viscosidade

A viscosidade também é um parâmetro fundamental na análise de possíveis substituições de fluidos convencionais em sistemas térmicos. A perda de carga e potência de bombeamento estão diretamente relacionadas com esta propriedade. Os principais tipos de equipamentos para medição de viscosidade são:

- Viscosímetro tipo pistão: consiste de um pistão metálico que se move dentro de uma câmara preenchida com o fluido, sob a influência de um campo magnético oscilante. O período de oscilação do pistão é proporcional à viscosidade, para uma dada intensidade de campo. A temperatura do fluido se mantém constante durante a medição (Motta, 2012).
- Viscosímetro rotacional: neste tipo de equipamento, a viscosidade é determinada por meio do torque requerido para girar um objeto circundando o líquido. Pode ser constituído de cilindros concêntricos, ou também de uma geometria cone-placa, onde o cone gira sobre o líquido entre ele e uma placa fixa (Bigdelli et al., 2016).
- Viscosímetro capilar: é derivado de sistemas dedicados a medição de queda de pressão em microcanais. A taxa de cisalhamento na parede do microcanal é medida diretamente por meio da queda de pressão e a taxa de cisalhamento na parede é medida por meio da taxa de fluxo (Chevalier, 2007). A principal desvantagem deste método é a possibilidade da influência da razão entre partículas e diâmetro do tubo, além da influência das incertezas nas medições do diâmetro do capilar e queda de pressão (Bigdelli et al., 2016).

A viscosidade de nanofluidos tem sido medida por diversos pesquisadores, e assim como para a condutividade térmica, não há uma coerência entre resultados de diferentes pesquisas. Enquanto alguns resultados indicam viscosidades próximas do fluido base para baixas concentrações e incremento anômalo nesta propriedade com o incremento da concentração, outros autores mostram um aumento discreto na viscosidade dos nanofluidos, comparado ao fluido base.

Sundar et al. (2014) avaliaram, além da condutividade térmica, a viscosidade de nanofluidos de Al_2O_3 em diferentes proporções de água e etilenoglicol. As concentrações de etilenoglicol no fluido base foram 20, 40 e 60% em massa. A temperatura de teste variou entre 20 e 60°C. Já a concentração volumétrica de nanopartículas dos nanofluidos variou entre 0,3

e 1,5%. O nanofluido que obteve o maior aumento na viscosidade, relativa ao fluido base, foi o composto de 60% etilenoglicol, a viscosidade obtida para o nanofluido de concentração 1,5% foi 2,6 vezes maior que o fluido base.

Serebryakova et al. (2015) estudaram a viscosidade de nanofluidos de Al_2O_3 dispersos em uma mistura 90% etilenoglicol e 10% água, na temperatura 25°C, e encontraram um aumento na viscosidade de até 50%. Desta forma, os autores concluíram que estes nanofluidos não tem nenhuma perspectiva de aplicação, pois o aumento na condutividade não foi tão significativo, e uma viscosidade anômala verificada.

Esfahany et al. (2016) avaliou a viscosidade de nanofluidos de óxido de grafeno disperso em água, em concentrações até 0,5% em massa e temperaturas entre 25 e 60°C. Nas concentrações mais baixas analisadas, 0,01 e 0,05%, a viscosidade dos nanofluidos foi muito próxima à da água em todas as temperaturas avaliadas. Por outro lado, nas concentrações 0,1 e 0,5% houve um incremento significativo na viscosidade, de 38 e 130%, respectivamente.

Xie et al. (2016) avaliaram a viscosidade de nanofluidos de MWCNTs em solução aquosa de um fluido iônico. A concentração de nanopartículas dos nanofluidos produzidos foi entre 0,2 a 1% (em massa). Foi encontrado um aumento significativo na viscosidade dos nanofluidos, de até 30%, sendo que a viscosidade aumentou com o incremento da concentração de nanopartículas.

A Tab. 2.5 apresenta um resumo de vários resultados experimentais da literatura para a viscosidade de nanofluidos. A maioria dos pesquisadores encontraram um incremento significativo na viscosidade comparando com os respectivos fluidos base.

Tabela 2.5 – Resultados experimentais para a viscosidade de nanofluidos

Autores	Nanopartículas		Fluido Base	Preparação	ϕ	Incremento máximo na viscosidade	Método de Medição	T(°C)
	Tipo	Tamanho						
Esfahany, M.R. (2016)	Óxido de grafeno	600-2800nm	Água deionizada	Sonicação 130W 42kHz	0,01-0,5%	130%	-	5-80°C
Sundar, L.S. (2016)	ND (nanodiamante)	Ø 50nm Comp. 100nm	Água.	Sonicação 2h	0,2-1,0%	179%	A&D-vibro viscometer	20-50°C
Xie, H. (2016).	MWCNTs, [EMIM][DEP]	Ø20-40nm Comp. 1-2µm	Solução aquosa de fluido iônico	Agitação magnética 10min, Sonicação 5 min.	0,2-1,0%	130%	Viscosímetro Capilar	25-80°C
Fontes, D.H. (2015).	MWCNT Diamond.	Øint 5nm Øext 15nm Comp. 10-50µm Ø 6nm	Óleo mineral.	Homogeneização a alta pressão.	0-0,5%	125%	PhysicaMCR 301 and MCR 501.	-
Li, H. (2015)	ZnO	Ø 30nm	EG	Agitação magnética 4h.	1,75-10,5%	200%	Kinexus pro p Super Rotation Rheometer (Malvern Instruments Ltd, Britain).	15-55%
Serebryakova, M.A. (2015)	Al ₂ O ₃	13nm.	90% EG 10% Água.	Ultrassom 1h.	0-1,5% porcentagem no volume	50%.	Brookfield DV-II + Pro, Além de um viscosímetro capilar caseiro.	-
Sundar, L.S. (2014)	Al ₂ O ₃	Tamanho 30nm.	20:80%, 40:60%, 60:40%, EG/água.	Sonicação 40 kHz 490 W.	0-1,5% do volume	160%	-	0-60°C
Jeong et al (2013).	ZnO	Tamanho 20-40nm	Água.	Sonicação.	0,05-5,0% do volume	68,6%	Ubbelohde viscometer	20-75°C
Presente trabalho	MWCNT	Ø 30nm 10µm	Água	Homogeneização a alta pressão	0,05-0,16%	54%	Anton Paar SVM 3000	25-90°C
Presente trabalho	MWCNT e grafeno	Ø50nm/10µm 5-10µnm	Água/EG (70:30)	Homogeneização a alta pressão	0,05-0,3%	30%	Anton Paar SVM 3000	20-80°C

2.4 Nanofluidos em transferência de calor

Alguns pesquisadores têm estudado o desempenho de nanofluidos em transferência de calor, em sistemas com fluxo de calor constante, em trocadores de calor e em radiadores automotivos, que é o foco principal deste trabalho. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura indica para um aumento na transferência de calor quando da utilização de

nanofluidos, em comparação com o fluido base. Porém não há consistência entre os resultados encontrados, sendo que alguns resultados indicam grande aumento na transferência de calor contra outros que indicam aumento discreto. Por outro lado, poucos pesquisadores obtiveram resultados em que os nanofluidos pioram o desempenho de transferência de calor.

Ding et al. (2006) analisaram o desempenho de nanofluidos de CNT em água escoando em um tubo horizontal. Foram verificados incrementos muito significativos na transferência de calor. Para uma concentração mássica 0,5%, houve um incremento de 350% na transferência de calor para um Reynolds 800.

Huang et al. (2015) analisaram o desempenho de nanofluidos Al_2O_3 /água e MWCNT/água em um trocador de calor. Os resultados indicaram aparente melhora na transferência de calor para Reynolds semelhantes. Porém o incremento na viscosidade faz com que o fluxo mássico dos nanofluidos ser maior que o da água para mesmos Re. Para valores de vazão semelhantes, o desempenho dos nanofluidos foi pior do que o da água pura. O autor explica o efeito na diminuição da transferência de calor podendo ser causado pela supressão da turbulência e aumento da viscosidade quando da utilização de nanofluidos. O decremento na transferência de calor para os nanofluidos MWCNT foi maior que os nanofluidos de Al_2O_3 . No caso dos MWCNT, quanto maior a concentração de nanopartículas, maior foi a perda na transferência de calor.

Yu et al. (2012) analisaram as propriedades e desempenho de transferência de calor de nanofluidos de Al_2O_3 tendo como fluido base uma mistura de água e etilenoglicol (55:45). A concentração de nanopartículas utilizada foi até 2% em volume. O comportamento dos nanofluidos foi newtoniano acima de 45°C e não newtoniano abaixo de 45°C. A condutividade térmica aumentou 11,6% em relação ao fluido base para a concentração 2%, enquanto o coeficiente de transferência de calor aumentou 106% para esta mesma concentração, quando o Reynolds era de 2000.

Timofeeva et al. (2011) apresentou um estudo experimental sobre propriedades térmicas e desempenho em transferência de calor de nanofluidos de SiC em etilenoglicol-água (50:50) e água pura. Os resultados mostraram que a adição de nanopartículas à mistura água/etilenoglicol pode aumentar significativamente a transferência de calor, enquanto os nanofluidos de fluido base água pura apresentaram eficiência menor que o fluido base. Os autores destacam ainda que os parâmetros ideais de comparação são velocidade constante ou potência de bombeamento.

Madhesh e Kalaiselvam (2014) avaliaram a transferência de calor de nanofluidos de prata (Ag) em etilenoglicol, em um trocador de calor tubo em tubo. O coeficiente de transferência de calor aumentou com o incremento da concentração de nanopartículas, e foi

obtido um aumento de 24% na transferência de calor para a concentração volumétrica 2%. Por outro lado, o aumento na perda de carga para esta mesma concentração foi 23,7%.

Abdul Hamid et al. (2016) avaliaram o desempenho de nanofluidos de TiO_2 em água/etilenoglicol, em convecção forçada com Reynolds entre 3000 e 24000. Os nanofluidos foram preparados em concentrações até 1,5% em volume, e as propriedades foram medidas entre 30 e 70°C, que foram as temperaturas de entrada dos testes. A viscosidade dos nanofluidos foi superior à do fluido base em todas as temperaturas, e aumentando com incremento da concentração de nanopartículas. Tendência similar foi observada para a condutividade térmica, que foi superior para os nanofluidos. Os testes de transferência de calor apresentaram incrementos discretos quando utilizados nanofluidos, para baixas temperaturas de entrada. Já para temperaturas de entrada maiores, de 50 a 70°C, o incremento na transferência de calor para os nanofluidos foi mais acentuado, especialmente para elevados valores de Reynolds.

Diversos pesquisadores também têm investigado o desempenho térmico de nanofluidos em radiadores. Leong et. al (2010) investigaram analiticamente a performance de nanofluidos compostos de cobre/etilenoglicol em um sistema de arrefecimento automotivo. Dados relevantes da literatura foram aplicados à modelagem matemática desenvolvida, tais como propriedades térmicas dos nanofluidos e correlações empíricas. Foi avaliado a condutância térmica utilizando fluido base e nanofluido como fluido de trabalho, e os resultados mostraram incremento de 3,8% no coeficiente de transferência de calor quando da utilização de nanofluidos, para uma concentração de 2% de cobre e número de Reynolds fixo em 6000 para o lado do ar e 5000 para o lado do fluido de arrefecimento. Este incremento permitiria uma redução de 18,7% na área frontal do radiador analisado, porém seria necessária uma potência de bombeamento 12,1% maior. Os autores também verificaram uma maior influência do Reynolds do lado do ar na condutância térmica.

Hussein et al (2014b) estudaram fator de atrito e convecção forçada para nanofluidos SiO_2 /água em um radiador, conforme esquema apresentado na Fig. 2.4. Foram avaliadas 4 diferentes concentrações de nanofluido entre 1 e 2,5% utilizando uma vazão de 2 a 8 litros/minuto, Reynolds entre 500 e 1750. Foi observado um incremento máximo de 22% no fator de atrito, comparado à água, para a concentração de 2,5%. Já o número de Nusselt aumentou significativamente comparado ao fluido base, atingindo mais de 40% de incremento para a concentração de 2,5%. Os resultados foram ainda inferiores à simulação computacional realizada para as mesmas condições, que previam um incremento ainda maior no Nusselt.

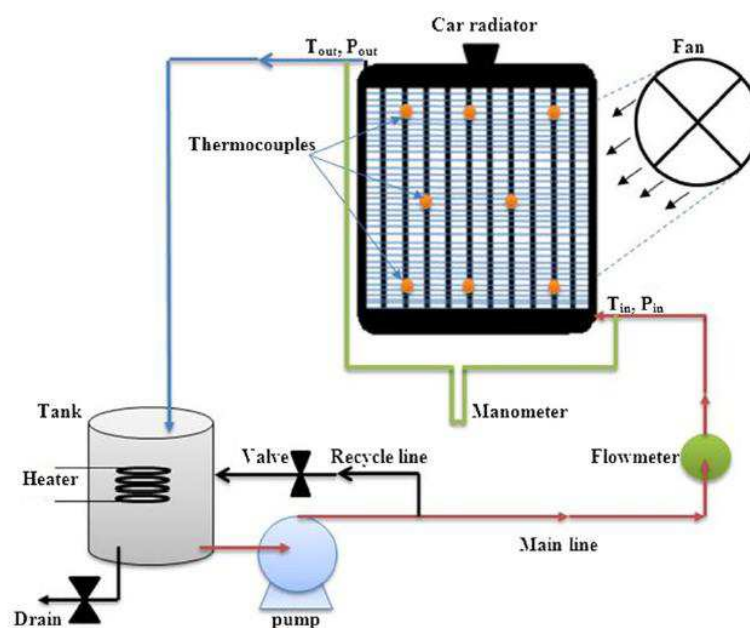


Figura 2.4 – Esquema do aparato experimental de Hussein et al. (2014).

Usri et al. (2015) analisaram a transferência de calor de nanofluidos de TiO_2 em mistura de água-etilenoglicol (60:40). Os experimentos foram conduzidos em escoamento turbulento e condição de entrada a 70°C . Foi encontrado um aumento da transferência de calor utilizando nanofluidos, sendo que com o aumento da concentração de partículas o coeficiente de transferência de calor aumentou. A maior concentração analisada foi 1,5% em volume, e o incremento na transferência de calor para este nanofluido foi 34% comparado ao fluido base.

Nambeesan et al. (2015) estudaram a transferência de calor utilizando nanofluidos Al_2O_3 /água-etileno glicol. A bancada experimental consistiu em um escoamento em loop onde estava inserido um radiador comercial, como apresentado na Fig. 2.5. Testes foram realizados com temperaturas de entrada entre 40 e 70°C . A adição de etilenoglicol na água pura nas proporções de 10 e 20% implicou em um decremento de 20 e 25% na condutância térmica. Já a adição das nanopartículas de alumina, na concentração 0,1% em volume proporcionou um aumento no desempenho de transferência de calor em 37%.

Bhimani et al. (2013) avaliaram o desempenho de nanofluidos de TiO_2 em água em um radiador automotivo, com vazões entre 90 e 120 L/min. Um diagrama do equipamento experimental utilizado é ilustrado na Fig. 2.6. Os resultados mostraram um aumento de até 45% na eficiência de transferência de calor em comparação com a água pura.

Parashurama et al. (2015) investigaram o desempenho de um nanofluido de CuO em água em um radiador automotivo. A concentração volumétrica foi de 10%. A temperatura de entrada foi fixada em $87,5^\circ\text{C}$, e a vazão de fluido foi entre 2,5 e 4 kg/s. A taxa de transferência de calor e o coeficiente global foram superiores para o nanofluido em comparação com o fluido

base, sendo que com o incremento da velocidade do vento incidente no radiador o ganho na transferência de calor foi menor.

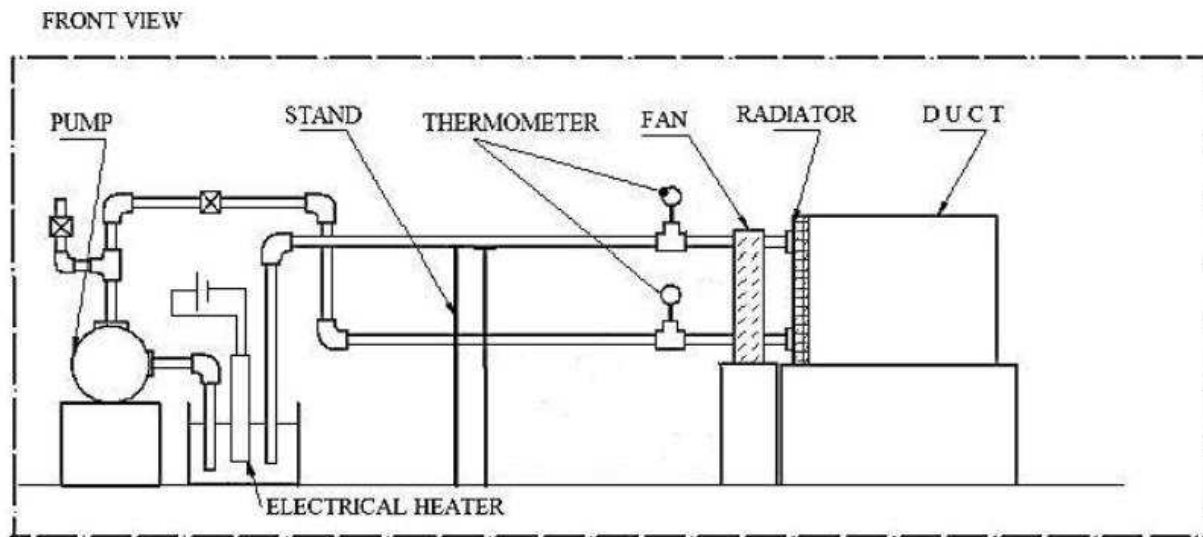


Figura 2.5 – Esquema do aparato experimental de Nambeesan et al. (2015).

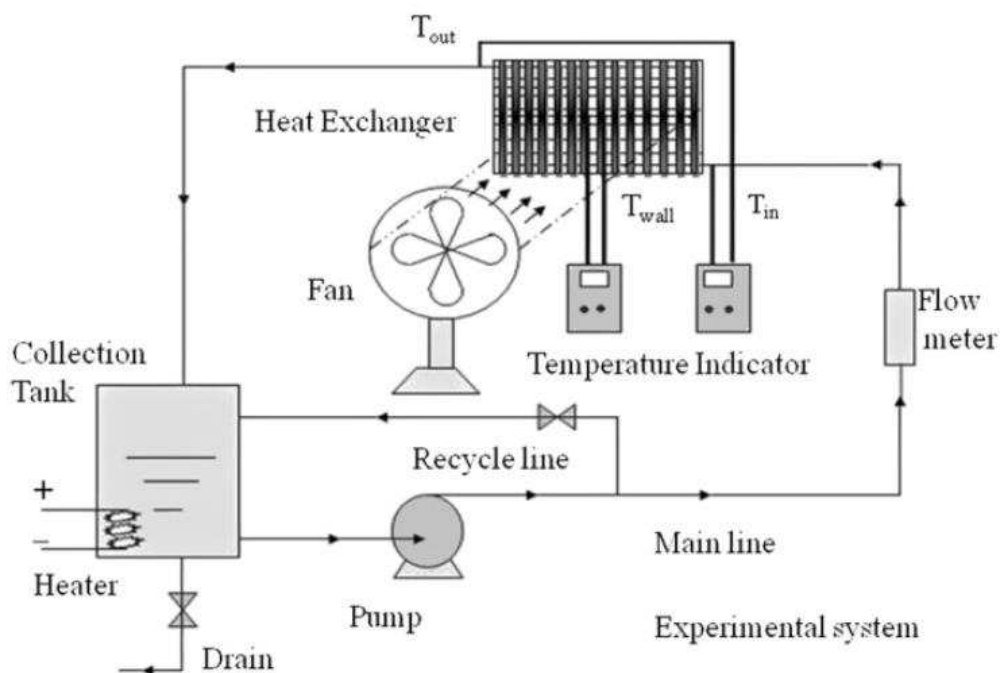


Figura 2.6 – Esquema do aparato experimental utilizado por Bhimani et al. (2013).

Heris et al. (2013) analisaram nanofluidos de CuO dispersos na mistura água-etileno glicol, em concentrações de 0,05 a 0,8% em volume, num radiador automotivo. A temperatura de entrada foi entre 35 e 54°C enquanto a vazão de líquido variou de 4 a 8 L/min. Foi verificado um aumento no coeficiente de transferência de calor, sendo que para a melhor condição este

incremento foi de 55% comparado ao fluido base. Um esquema do equipamento experimental utilizado é mostrado na Fig. 2.7.

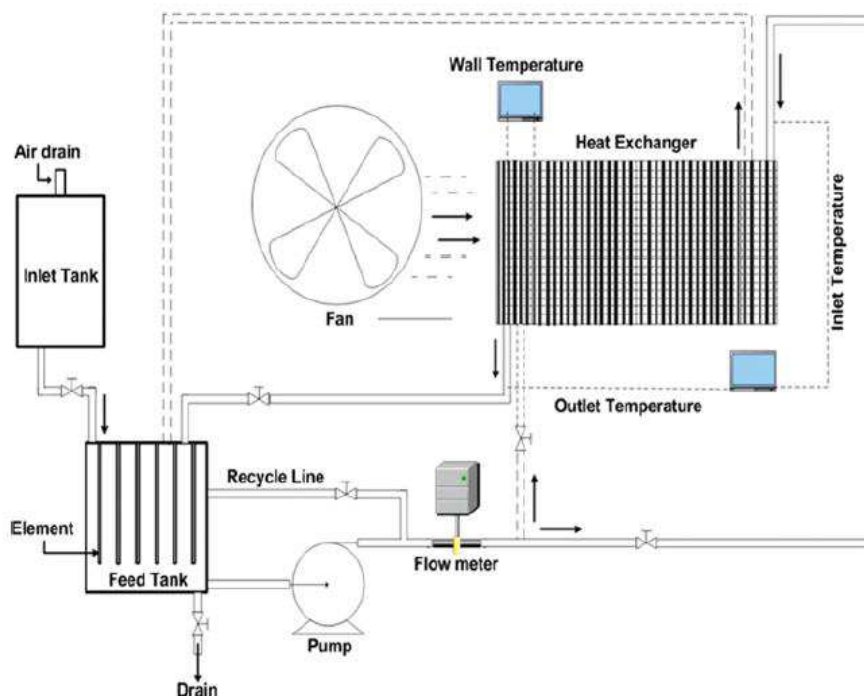


Figura 2.7 – Esquema do aparato experimental utilizado por Heris et al. (2013).

Tomar e Tripathi (2015) estudaram a transferência de calor em um radiador, utilizando a mistura água-etilenoglicol (50:50) e nanopartículas de Al_2O_3 dispersas nesta mistura, em concentrações até 1% em volume. Foram medidas a condutividade térmica do fluido base e nanofluidos, e também analisado a condutância térmica dos fluidos no radiador, em vazões de 2 a 5 L/min e temperaturas de entrada de 60 a 80 °C. A condutividade térmica dos fluidos aumentou com o incremento da concentração de nanopartículas, e a variação com a temperatura foi linear para todos os fluidos. O aparato utilizado para avaliação do desempenho de nanofluidos no radiador é ilustrado na Fig. 2.8. A condutância térmica também foi superior para os nanofluidos comparado ao fluido base, assim como a potência de bombeamento.

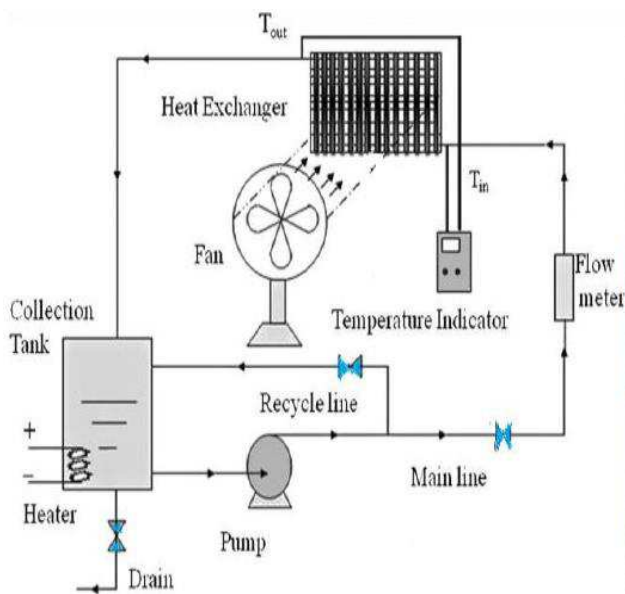


Figura 2.8 – Aparato experimental utilizado por Tomar e Tripathi (2015).

Ali et al. (2015) avaliaram experimentalmente o desempenho de nanofluidos ZnO/água em um radiador automotivo. A concentração volumétrica dos nanofluidos produzidos foi de até 0,3%, e os testes realizados com temperatura de entrada do fluido de arrefecimento entre 45 e 55°C. O maior ganho na transferência de calor foi obtido para o nanofluido de concentração 0,2%, este aumento foi de 46%. Com um incremento adicional na concentração, 0,3%, houve uma diminuição na taxa de transferência de calor comparado com o nanofluido 0,2%. O aparato experimental desta pesquisa está apresentado na Fig. 2.9.

Peyghambarzadeh et al. (2013) avaliou o coeficiente global de transferência de calor de um radiador automotivo operando com nanofluidos de CuO e Fe₂O₃ em água, com concentrações de 0,15 a 0,65% em volume, conforme esquema ilustrado na Fig. 2.10. A temperatura de entrada no radiador variou de 50 a 80°C enquanto Reynolds ficou entre 50 e 1000. Os dois tipos de nanofluidos apresentaram ganho na transferência de calor em até 9% em comparação com a água pura.

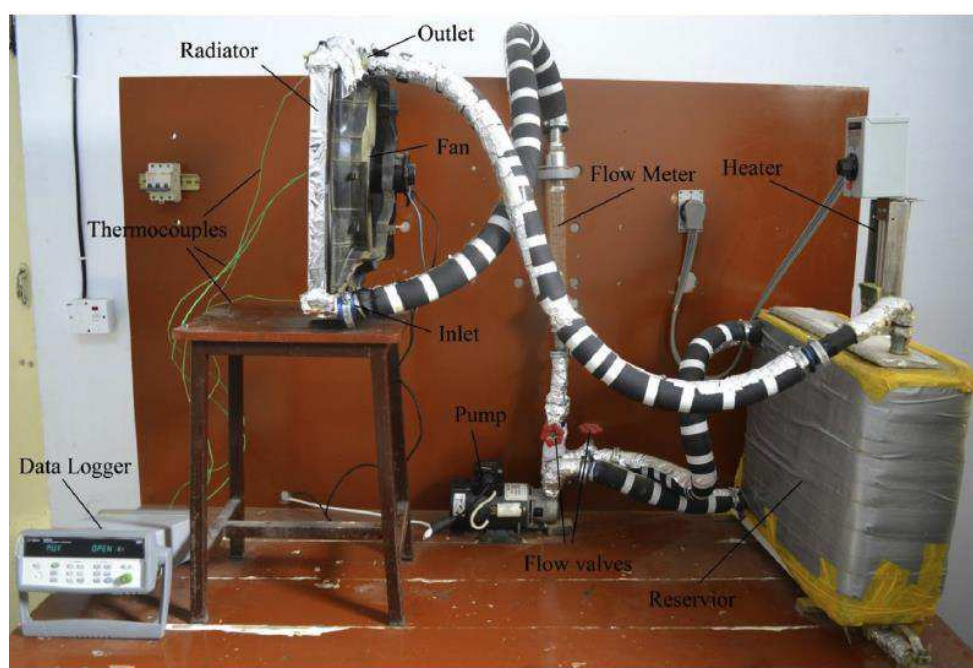


Figura 2.9 – Aparato experimental de Ali et al. (2015).

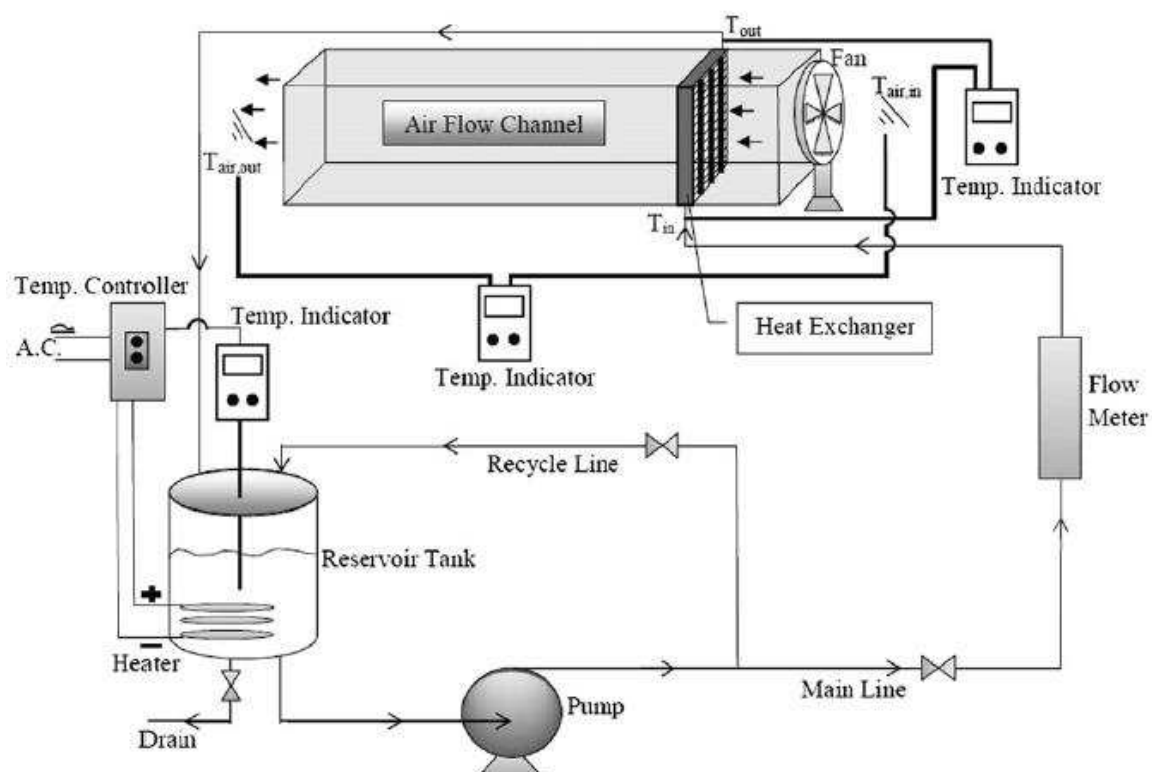


Figura 2.10 – Esquema do aparato experimental utilizado por Peyghambarzadeh et al. (2013).

A Tab. 2.6 apresenta uma síntese com os principais resultados obtidos com relação ao desempenho de nanofluidos em transferência de calor, com maior ênfase em experimentos que envolveram radiadores automotivos.

Tabela 2.6 – Resultados experimentais para nanofluidos em transferência de calor.

Autores	Nanopartículas		Fluido Base	Tipo de teste	Concentração	Incremento máximo na transferência de calor	T(°C)	Método de produção.
	Tipo	Tamanho						
Peyghambarzadeh (2011).	Al ₂ O ₃	20nm	Água	Radiador	0-1,0% do volume	40%	40-80°C	Surfactante
Hussein et al (2014)	TiO ₂ , SiO ₂	<100nm	Água	Radiador	0,01-0,02%	Ganho maior para SiO ₂	60-80°C	-
Kannan, C. (2014)	Al ₂ O ₃	45nm	Água.	radiador	0,0-0,5% do volume	49%	35-59°C	Ultrassonificador 2h Vib.
Selvakumar et al. (2012)	CuO	-	Água.	Fluxo calor constante	0,1-0,2% do volume	29,63%	-	ultrassônico 180 W 25 kHz
Nguyen, et al. (2007)	Al ₂ O ₃	47nm	Água.	Refrigeração líquida de eletrônicos.	1,0-6,8%	40%	-	Agitação.
Ijam, A. (2012)	TiO ₂ , SiC.	27 e 12nm	Água.	Refrigeração líquida de eletrônicos.	0,8-4,0% do volume	12,43% com o TiO ₂ .	50-71°C	-
Leong, et al. (2010)	CuO	-	EG	Radiador.	0,0-2,0%	3,8%	82,5°C	-
Hussein, et al. (2014)	SiO ₂	30nm	Água.	Radiador.	1,0-2,5% do volume.	40%	60-80°C	-
Usri, et al. (2015)	TiO ₂	-	Água/EG (60:40)	Fluxo calor constante.	0,5-1,5%	33,9%	70°C	Ultrassom 2h
Nambeesan et al. (2015)	Al ₂ O ₃	20nm	Água/EG 90:10 80:20	Radiador.	0,1%	37%	40-70°C	-
Bhimani, et al (2013)	TiO ₂	15nm	Água.	Radiador.	0,01-1% do volume	45%	80°C	Sonicação 1h
Madhesh, et al (2014)	Ag	12-64nm	EG	Trocador de calor tubo em tubo.	0,1-2,0%	54,3%	30-90°C	Ultrassom
Parashurama, M.S. (2015)	CuO	-	Água.	Radiador	10%	-	87,5°C	-
Heris, S.Z (2013)	CuO	60nm	Água/EG 40:60.	Radiador	0,05-0,8%	55%	35-54°C	-
Tomar, B.P.S. (2015)	Al ₂ O ₃	Ø40nm	Água/EG 50:50	Radiador	0,1-1%	64%	60-80°C	Agitador magnético.
Ding, Y. (2006)	CNT	100nm.	Água.	Fluxo calor constante	0,0-0,5%	350%	-	Banho ultrassônico 24h
Peyghambarzadeh et al (2013).	CuO, Fe ₂ O ₃	60nm, 40nm	Água.	Radiador.	0,15-0,65% do volume.	9%	50-80°C	-
Yu, W. (2012)	Al ₂ O ₃	20nm	Água/EG 55:45	Fluxo calor constante	1-3%	106%	10-60°C	Sonicação 3h
Presente Trabalho	MWCNT	Φ 30nm 10µm	Água	Radiador	0,05-0,16%	-22%	50-80°C	Hom.alta pressão
Presente Trabalho	MWCNT e Grafeno	Φ50nm/ 10µm 5-10µm	Água/EG 70:30	Radiador	0,05-0,3%	+8%/-9%	50-80°C	Hom. alta pressão

2.5. Desafios

Com base na revisão bibliográfica, os resultados encontrados na literatura com relação à nanofluidos se apresentam contraditórios, tanto com relação as propriedades termofísicas quanto com relação a transferência de calor. Por isso, vários desafios podem ser listados com relação a este campo de pesquisa. Entre eles, pode-se citar alguns:

- Estabelecer correlações adequadas para prever a condutividade térmica e viscosidade de nanofluidos. As correlações existentes não se ajustam a maioria dos dados experimentais encontrados na literatura.
- Estabelecer métodos específicos para avaliação experimental das propriedades dos nanofluidos. Ao confrontar-se dados da literatura, é possível observar resultados contraditórios para nanofluidos de natureza semelhantes.
- Produção de nanofluidos estáveis. A maioria dos nanofluidos produzidos atualmente possuem surfactantes, o que altera as propriedades do fluido base e dificulta a avaliação da eficiência dos nanofluidos.
- Critério para determinar a estabilidade dos nanofluidos. A estabilidade dos nanofluidos não é duradoura e na maioria dos casos é avaliada de forma visual.
- Estabelecer um parâmetro adequado para avaliação do desempenho de nanofluidos, conforme a aplicação. No caso de transferência de calor, por exemplo, a maioria dos pesquisadores compara o desempenho de fluido base e nanofluidos em função do número de Reynolds, o que em alguns casos (como o do presente trabalho) é inadequado.

2.6. Objetivos

Este trabalho tem como principal foco a avaliação do desempenho térmico de diferentes nanofluidos em radiadores automotivos. É importante ressaltar que na literatura não são encontrados trabalhos nos quais o desempenho de nanofluidos em radiadores automotivos foi estudado de forma semelhante a este trabalho. Além disso, os equipamentos experimentais utilizados no presente trabalho são mais robustos que os encontrados na literatura. Desta forma, pode-se atribuir ao trabalho os seguintes objetivos específicos:

- Revisão dos principais resultados da literatura acerca de propriedades, aplicações e desempenho térmico de nanofluidos;
- Síntese de nanofluidos estáveis

- Avaliação experimental de propriedades térmicas de nanofluidos, especificamente, a viscosidade, a densidade e a condutividade térmica;
- Avaliação experimental do desempenho termo-hidráulico de radiadores automotivos utilizando nanofluidos como fluido de arrefecimento.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

O aparato experimental consiste em uma gama de equipamentos, que devidamente monitorados e controlados, são responsáveis por dois processos térmicos elementares na realização dos testes. O sistema é capaz de aquecer e arrefecer os fluidos testados. Faz parte do equipamento experimental o homogeneizador a alta pressão, equipamento fundamental para a produção de nanofluidos. Além disso, sensores para a medição de condutividade térmica e viscosidade dos nanofluidos contemplam o aparato. Este capítulo contém uma descrição dos equipamentos utilizados neste trabalho.

Foi desenvolvida uma bancada experimental que se encontra instalada no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LEST) da Universidade Federal de Uberlândia. Neste equipamento é possível aquecer o fluido de trabalho, controlando a temperatura de entrada deste fluido no trocador de calor a ser avaliado, no caso da presente tese, um radiador automotivo. O fluido é arrefecido no radiador pelo escoamento cruzado de ar, proveniente de um túnel de vento também instalado no laboratório.

3.1. Síntese dos nanofluidos

Os nanofluidos foram produzidos por um método de dois passos, conhecido como homogeneização a alta pressão. Misturas pré dispersas foram adquiridas junto à empresa Nanostructured and amorphous Materials (NanoAmor), e diluídas de modo a obter-se a concentração desejada de nanopartículas.

O homogeneizador a alta pressão consiste em um equipamento onde a mistura é pressurizada, por meio de pistões, e depois, esse o fluido é direcionado à uma câmara de interação. Nessa câmara, a combinação de elevadas taxas de cisalhamento, a energia de cavitação induzida por grandes gradientes de pressão e os impactos da mistura com as paredes é responsável por quebrar as aglomerações de nanopartículas, deixando-as estáveis

a mistura estável. A Fig. 3.1 mostra o homogeneizador utilizado no processo de dispersão das nanopartículas de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) e grafeno.



Figura 3.1 – Homogeneizador a alta pressão.

Foram utilizados dois fluidos base diferentes no presente trabalho: água, para o primeiro radiador testado, e um dos fluidos de arrefecimento automotivo convencionalmente empregado em diversos modelos de automóveis. Este fluido é composto por 70% de água e 30% de etilenoglicol. Para efeito de organização dos dados, o fluido de arrefecimento será chamado mais adiante por EG30%, ou simplesmente fluido base.

A mistura original de fábrica, adquirida junto à NanoAmor, é composta por água e nanopartículas, em elevada concentração. No caso dos nanofluidos a base de água, a concentração original da mistura foi de 3%, enquanto para os nanofluidos baseados em EG30%, a concentração inicial de nanopartículas na mistura adquirida era 10%. O cálculo das quantidades de nanofluido original, água e etilenoglicol foi realizado utilizando o software EES, o código desenvolvido está apresentado no anexo IV. Os dados da mistura original, a qual foi diluída na produção dos nanofluidos utilizados no presente trabalho, estão apresentados na

Tab. 3.1. Posteriormente, ocorreu a diluição desta mistura em uma quantia adicional de água e etilenoglicol (este último apenas para os nanofluidos baseados em EG30%), de modo a garantir a concentração desejada de nanopartículas, além da concentração desejada de etilenoglicol (30%) no caso dos nanofluidos de EG30%. Ressalta-se ainda a presença de surfactante nos nanofluidos originais, porém o efeito deste parâmetro foi desprezado, pois a concentração de surfactante nos nanofluidos após a diluição foi muito baixa (sempre inferior a 0,02%) e além disso a viscosidade obtida para os nanofluidos, principalmente dos baseados em EG30%, foi próxima à do fluido base.

Tabela 3.1 Dados dos nanofluidos adquiridos.

Tipo	MWCNT/água	MWCNT/água	GRAFENO
Tamanho	φ 30nm L 10μm	φ 50nm L 10μm	5-10μm 50 folhas
Densidade (kg/m³)	1050	1050	1050
Concentração mássica	3%	10%	10%
Ponto de Ebulição (°C)	100	100	100
Solubilidade em água	Insolúvel	Insolúvel	Insolúvel
Flamabilidade		Altamente inflamável	
Reações perigosas		Acetileno ou Amônia	
Pureza	95%	99,9%	95%
Formato	Tubos	Tubos	Folhas
Surfactante	Polietilenoglicol (0,6%)	Polietilenoglicol (2%)	Polietilenoglicol (2%)

Cada amostra foi introduzida no homogeneizador e recirculada durante 1 hora, sob uma pressão de 500 bar. Um banho térmico foi conectado à camisa de resfriamento do reservatório de entrada do homogeneizador, por onde circulou-se água fria, evitando superaquecimento da amostra. A Tab. 3.2 apresenta todos os nanofluidos produzidos para testes realizados no presente trabalho, assim como suas abreviações, que serão utilizadas no decorrer do texto.

Tabela 3.2 – Nanofluidos produzidos.

Fluido Base	Nanopartículas	Concentração Mássica (%)	Abreviação
ÁGUA	MWCNT	0,05	
ÁGUA	MWCNT	0,08	
ÁGUA	MWCNT	0,16	
EG30%	MWCNT	0,05	MWCNT05
EG30%	MWCNT	0,10	MWCNT1
EG30%	MWCNT	0,20	MWCNT2
EG30%	MWCNT	0,30	MWCNT3
EG30%	GRAFENO	0,05	GRF05
EG30%	GRAFENO	0,10	GRF1
EG30%	GRAFENO	0,20	GRF2
EG30%	GRAFENO	0,30	GRF3

Foram produzidos 11 nanofluidos distintos compostos por duas nanopartículas diferentes, para os nanofluidos baseados em EG30% foram quatro concentrações para o nanofluido composto por nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) e quatro para o nanofluido composto por grafeno. Já no caso dos nanofluidos baseados em água, foram produzidos em 3 concentrações de MWCNT.

3.2. Medição das propriedades térmicas dos nanofluidos

A condutividade térmica dos nanofluidos foi medida por meio do sensor Linseis THB-1. Este sensor utiliza uma fonte plana de calor, o que pode ser considerado uma evolução do tradicional fio quente transiente, pois a medição pode ser realizada de forma mais rápida, indireta e independente do operador. Desta forma, os erros na medição desta propriedade são reduzidos. O sensor THB-1 é mostrado na Fig. 3.2.



Figura 3.2– Sensor THB-1 (medição de condutividade térmica).

O método do fio quente transiente convencional apresenta algumas desvantagens, entre elas: a perda de calor entre os condutores elétricos, a baixa sensibilidade entre temperatura e tensão de saída do sensor e a alta sensibilidade à tensão mecânica. O sensor utilizado elimina em parte estas desvantagens, aumentando a sensibilidade do sinal à temperatura devido a construção de uma ponte entre os pequenos resistores elétricos, que forma um condutor plano. Este condutor é dividido em dois resistores, de comprimentos diferentes, que resultam numa única fonte de calor.

Um recipiente térmico adicional para aquecimento das amostras foi instalado para análise da condutividade térmica dos nanofluidos em diferentes temperaturas, como mostra a Fig. 3.3.



Figura 3.3– Recipiente para controle de temperatura na medição de condutividade térmica.

. Durante a medição, o sensor é introduzido na cavidade do aparato, o qual recebe calor vindo do fluido do banho, até atingir a temperatura de testes desejada. O fluido do banho térmico é, então, retirado de circulação e removido da cavidade. Esse procedimento foi repetido antes de cada teste de condutividade térmica. O banho térmico utilizado para aquecimento do fluido nos testes de condutividade térmica é mostrado na Fig. 3.4.

O equipamento THB-1 é diretamente conectado ao computador, o qual contém um software próprio, para controle dos parâmetros de testes e visualização dos resultados. A condutividade térmica é medida em um processo transiente, ou seja, dependente do tempo de medição.

Desta forma, a potência dissipada e o tempo de aquisição de dados devem ser ajustados de forma que, o software seja capaz de calcular a propriedade. A Fig. 3.5 mostra a interface para ajuste dos parâmetros corrente elétrica e tempo de teste.



Figura 3.4 – Banho térmico utilizado para controle de temperatura (MQBMP-01).

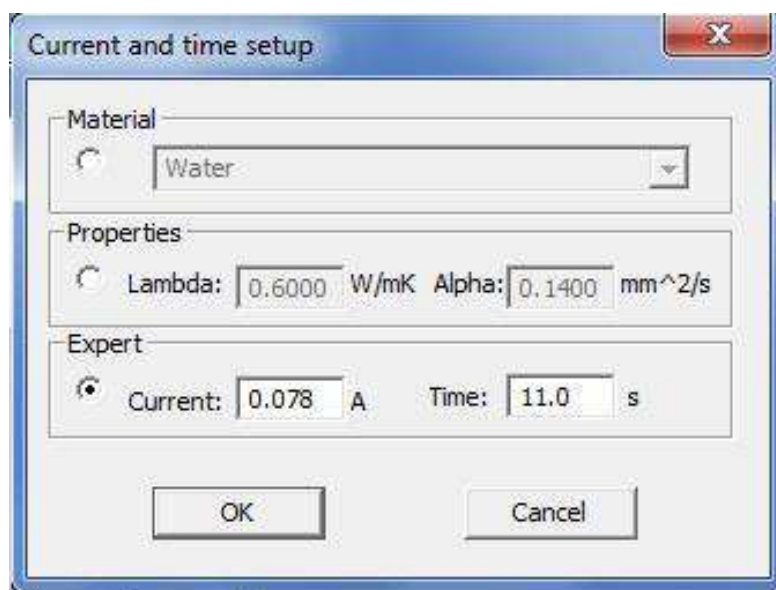


Figura 3.5– Seleção de parâmetros para os testes de condutividade térmica.

O processo de medição é baseado na Eq. 3.1, em que a condutividade térmica é inversamente proporcional a variação de temperatura pelo tempo.

$$k = \frac{q}{4\pi\Delta T} \ln(\Delta t) \quad 3.1$$

Onde k é a condutividade térmica do líquido circundante, q representa o calor dissipado por unidade de comprimento, ΔT e Δt representam a variação de temperatura e tempo, respectivamente. Porém este cálculo só pode ser realizado na faixa de tempo onde a variação de $\Delta T/\ln(\Delta t)$ possa ser considerada linear. Por isso, o software mostra a variação do sinal de saída (proporcional a temperatura) em função do tempo. Além disso, a derivada desta função, consequentemente, deve ser, praticamente, constante no período para que seja possível determinar o valor de k . A Fig. 3.6 mostra um exemplo de curva sinal de saída pelo tempo obtida em um dos testes realizados.

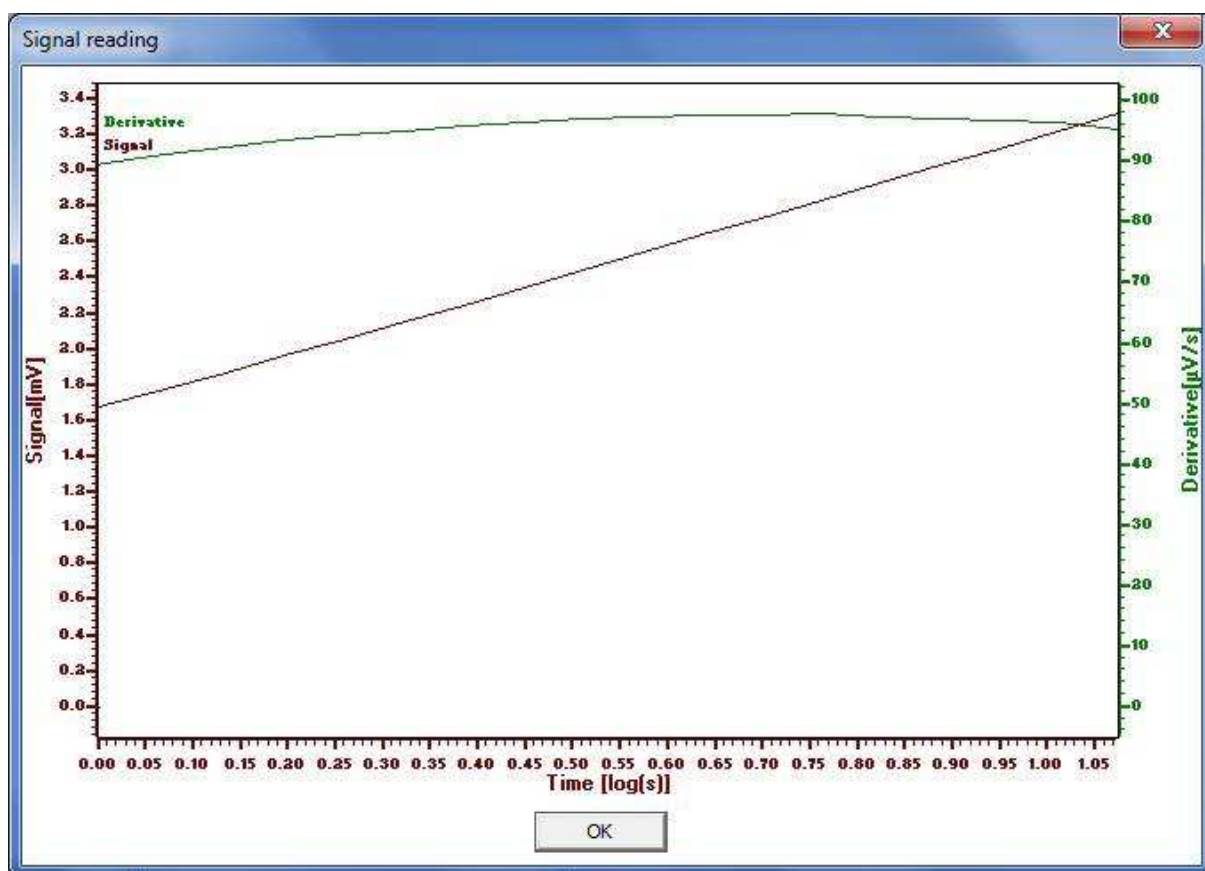


Figura 3.6 – Sinal de saída ao longo do tempo, durante um teste de condutividade térmica.

Finalmente, a interface principal do software mostra os resultados obtidos para condutividade e difusividade térmica da amostra, caso tenha sido possível calcular estes

valores. No caso de impossibilidade de cálculo, um erro é indicado, e um ajuste dos parâmetros de tempo e corrente elétrica torna-se necessário, mudando a taxa de variação da temperatura e tempo de aquisição, de forma que seja possível a realização do cálculo. É importante observar, que os parâmetros ideais para realização dos testes variam conforme a natureza do fluido e a temperatura de testes, por isso, um ajuste individual foi feito para cada amostra em cada temperatura antes do início dos testes. A interface principal do software é mostrada na Fig. 3.7.

THB-Measurement

Sample name: EG

Laboratory:

Operator:

Comment:

File name: EG1.TXT Path

Density: 1.011 g/cm³ ☒ Calculate cp ☒ Store raw data

Mode: ☒ Single ☐ Multiple Measurements: 1 Delay: 0.00 min

Number of drift measurements: 5 Status: Off

Result:

Measurement: -----	Duration: ----- s
Temperature: 25.00 °C	Drift: -0.00 mK/s
Thermal conductivity: 0.26909 W/mK	Thermal diffusivity: 0.19565 mm ² /s
Uncertainty: 2.3 %	Uncertainty: 2.3 %
Heat capacity: 1.3604 J/gK	

Recomm. Time: 24 s Recomm. Current: 0.100 A Sensor status: Sensor Ok

☐ Use recomm. params for next measurement

Start Done

Figura 3.7 – Interface para os testes de condutividade térmica.

Foram realizadas medições de condutividade térmica com temperaturas fixadas em 20, 30, 40 e 50°C, aproximadamente. Devido às limitações mencionadas anteriormente, não foi

possível medir a condutividade em temperaturas superiores a 50°C, pois não foi encontrado um ajuste de parâmetros que fornecesse um resultado para a medição. Para todos os testes de propriedades dos nanofluidos, foram realizadas 5 réplicas, e considerada a média das medições. O desvio padrão foi levado em consideração na análise de incerteza.

A viscosidade e a densidade dos nanofluidos foram medidas por intermédio de um viscosímetro rotacional Anton Paar SVM 3000. A determinação de viscosidade baseia-se numa medição de parâmetros como torque e velocidade. O rotor gira livremente sem atrito, tornando o instrumento praticamente insensível a vibrações. O pequeno volume de amostra permite mudanças extremamente rápidas de temperatura (por efeito Peltier) e tempos de equilíbrio muito curtos. A viscosidade dinâmica é calculada a partir da velocidade do rotor. A Fig. 3.8 mostra o sensor utilizado nas medições de viscosidade.

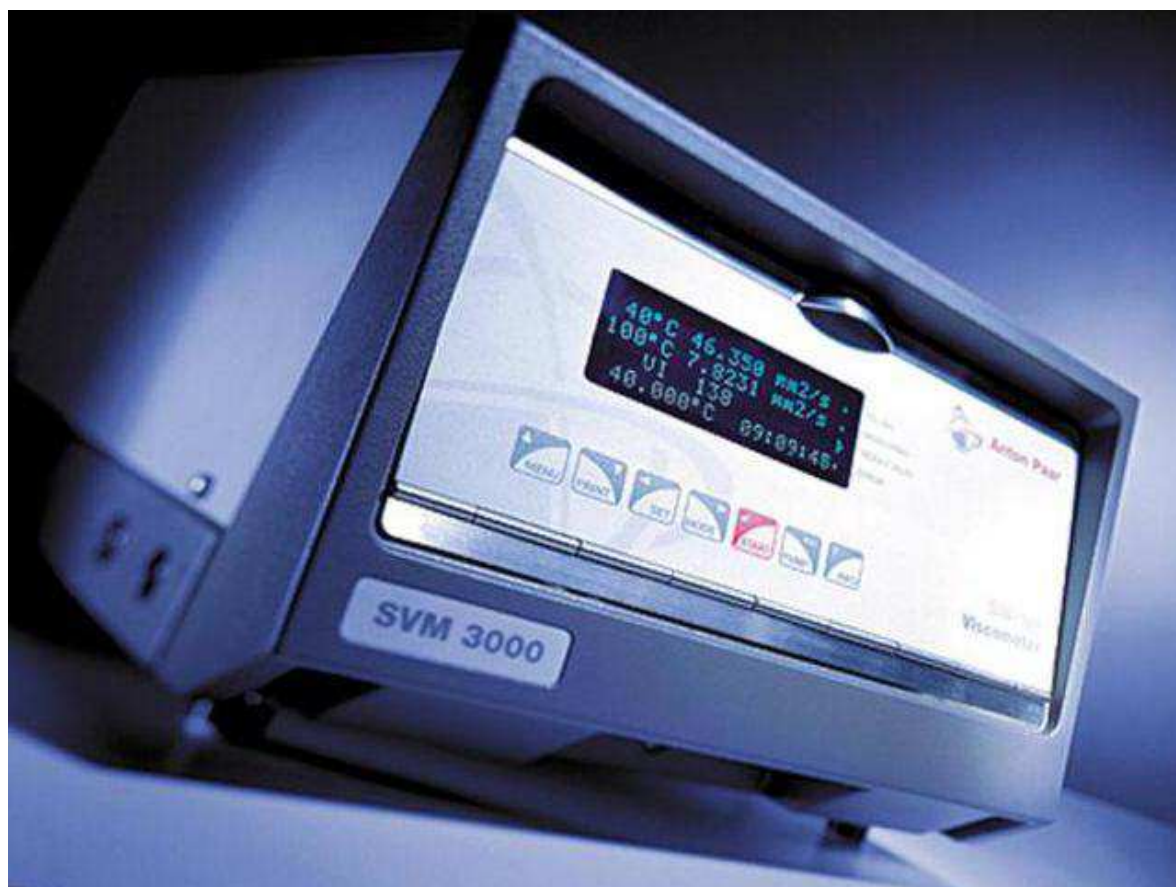


Figura 3.8 – Sensor SVM 3000 (medição de viscosidade).

A viscosidade e a densidade do fluido base e dos nanofluidos foram medidas em diferentes temperaturas, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70 e 80°C. Tais medições se fizeram necessárias, no intuito de avaliar as propriedades dos nanofluidos em função da temperatura

e contemplar toda a faixa de temperaturas nas quais foram realizados os testes experimentais de transferência de calor com nanofluidos.

Em adição, foram obtidas correlações para a condutividade térmica e para a viscosidade dos nanofluidos, o que permitiu avaliar estas propriedades em valores de temperatura intermediário aos valores nos quais foram, de fato, medidas.

3.3. Bancada Experimental

A bancada experimental está preparada para avaliar o desempenho térmico de trocadores de calor com dimensões máximas 0,8 x 0,4m (área frontal). No decorrer do presente trabalho, o aparato experimental foi construído e aprimorado para avaliação do desempenho de fluidos de arrefecimento, que operam a temperaturas da ordem de 90°C.

A Fig. 3.9 mostra um diagrama esquemático da bancada experimental, constituída de dois circuitos térmicos principais: fluido quente (vermelho) e ar (azul) além de um pequeno circuito terciário (água fria) que tem como função o resfriamento de ar por meio de um evaporador localizado no túnel e ligado a uma torre de resfriamento.

O circuito de ar é composto de um túnel de vento onde o ar atravessa o trocador de calor, em escoamento cruzado, para isto, é dotado de um ventilador. Medições de temperatura a montante e a jusante do trocador de calor, além de uma placa de bocais (por meio da qual é medida a vazão de ar) completam o circuito.

O circuito de fluido quente, representa o sistema de arrefecimento. Este possui um banho termostático, que aquece o fluido, simulando a carga térmica sobre o fluido. Uma bomba de engrenagens circula o fluido entre o banho e o radiador.

A vazão mássica do fluido é medida por meio de um medidor de vazão do tipo Coriolis. Em adição, foram realizadas medições de temperatura na entrada e na saída do radiador.

De forma mais detalhada, o circuito de ar é induzido por um ventilador centrífugo que tem capacidade fornecer uma vazão de até 10000 m³/h. A vista externa do ventilador é ilustrada na Fig. 3.10. Três válvulas (“dampers”) estão instaladas nas seções de admissão, descarga e retorno. Estes “dampers” permitem alternar entre a utilização de um circuito aberto (sem retorno do ar) e fechado (com retorno do ar). No presente trabalho, foi utilizado apenas circuito aberto, pois permite um melhor controle da temperatura de incidência do ar, detalhado posteriormente.

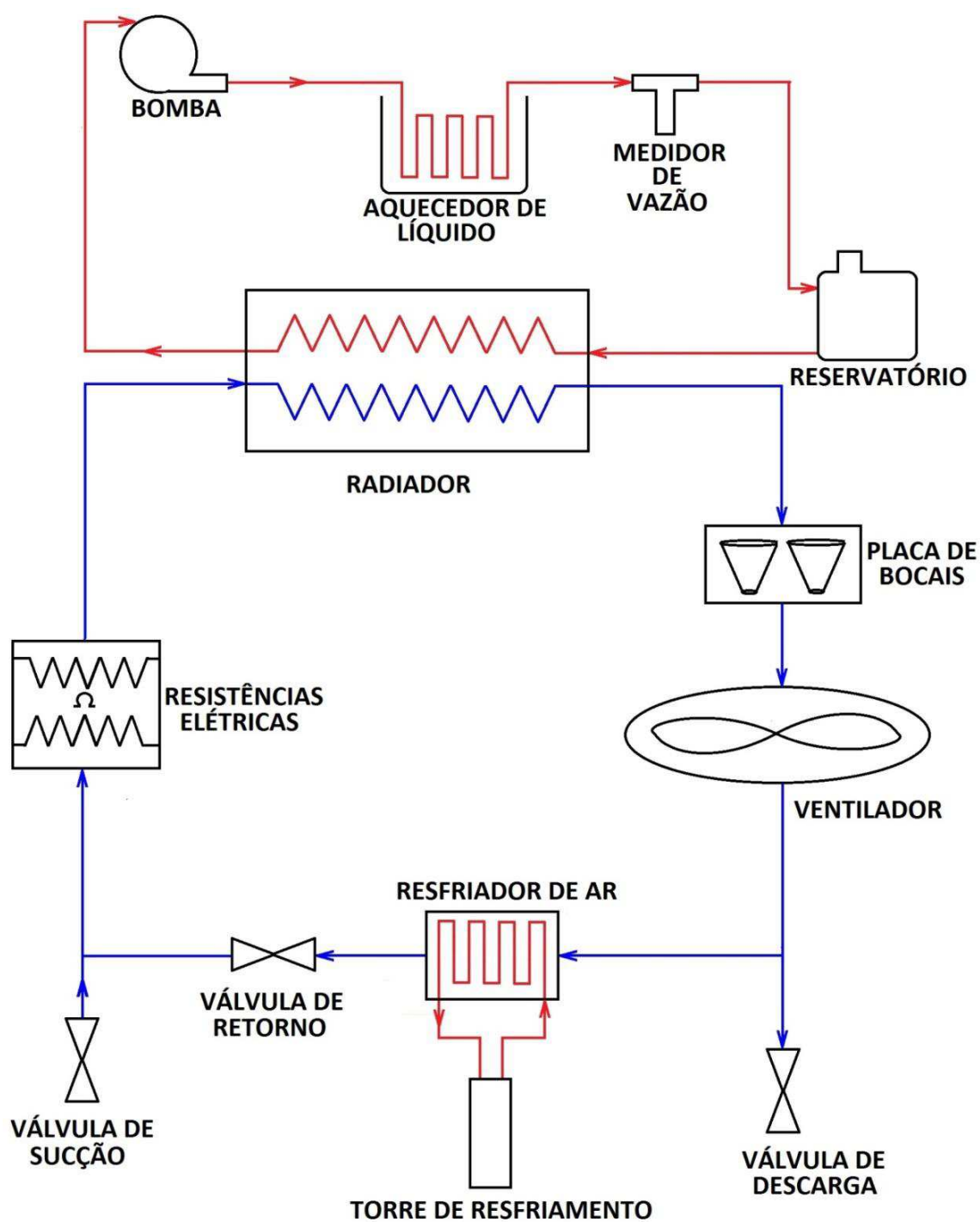


Figura 3.9 - Representação esquemática da bancada experimental. Azul: circuito de ar.
Vermelho: Circuito de arrefecimento.



Figura 3.10 – Ventilador, válvula de descarga e chaminé.

O túnel de vento possui uma placa de 5 bocais, dimensionados de acordo com a norma ASME, sendo dois destes de 90mm de diâmetro, dois de 75 cm de diâmetro e um de 80mm de diâmetro, dispostos de acordo com a norma ASHRAE 41.2, a qual estabelece que as distâncias entre centros de bocais e entre o centro de um bocal e a parede de duto adjacente, devem ser, respectivamente, superiores a 3 vezes o diâmetro da garganta do bocal e uma vez e meia vezes o diâmetro da garganta do bocal. A Fig. 3.11 ilustra os bocais do túnel de vento:

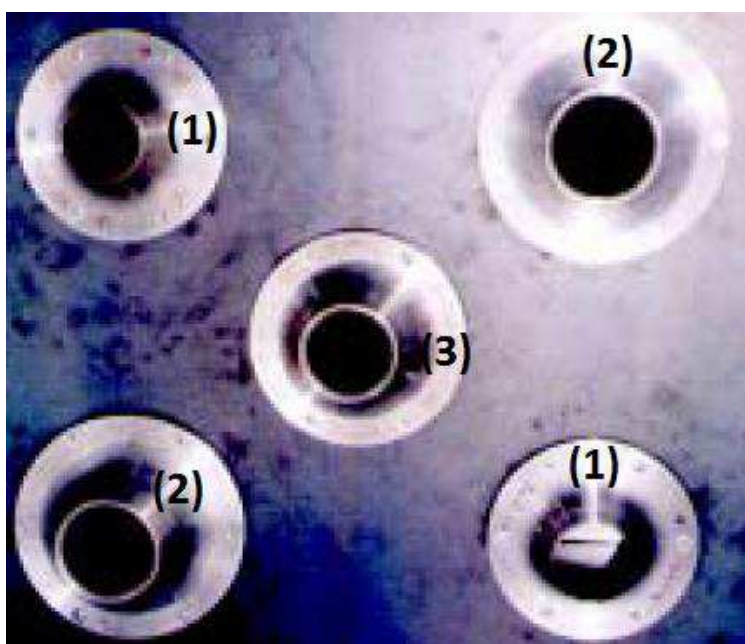


Figura 3.11 – Placa de bocais: 1- bocais de 75mm; 2- bocais de 90mm; 3 – bocal de 80mm.

O cálculo da vazão de ar é realizado de acordo com a equação da continuidade. Para tanto, é medido o diferencial de pressão do ar ao atravessar a placa de bocais. Este diferencial de pressão é medido por meio de 2 sensores: um transdutor diferencial de pressão e um manômetro em U. O transdutor diferencial de pressão é apresentado na Fig. 3.12. A partir deste diferencial de pressão, pode ser determinada a vazão mássica de ar. O controle da vazão de ar é realizado por 2 mecanismos: a alternância do número de bocais abertos, o que permite um ajuste grosseiro da vazão, e por um inversor de frequência, associado ao motor do ventilador, pelo qual é feito um ajuste fino da vazão. A Fig. 3.13 ilustra o inversor de frequência do ventilador.



Figura 3.12 – Transdutor diferencial de pressão da placa de bocais.

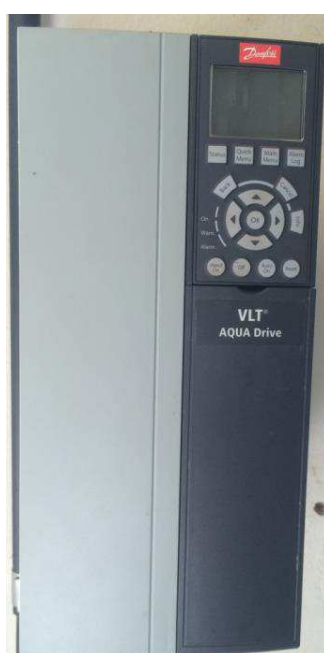


Figura 3.13 – Inversor de frequência do Ventilador.

A medição de vazão de ar é realizada de forma indireta, por meio da queda de pressão do ar ao passar pela placa de bocais. Determina-se o coeficiente de descarga de cada bocal separadamente, e soma-se as vazões em cada bocal. A vazão em um único bocal é calculada pela Eq. 3.2:

$$\dot{m}_i = \frac{A_i \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{air} \cdot \Delta P_{air}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_i}{A_T}\right)^2}} \quad 3.2$$

Onde: \dot{m}_i representa a vazão mássica no bocal i, A_i é a área do bocal i, medida na descarga do bocal, ρ_{air} e ΔP_{air} são a densidade do ar e o gradiente de pressão do ar ao passar pelos bocais e por fim, A_T é a área total do pleno onde a placa de bocais está instalada. O coeficiente de descarga depende do número de Reynolds, e é calculado pela Eq. 3.3:

$$C_{d,i} = 0,9975 - 0,00653 \cdot \left[\frac{10^6}{Re_{d,i}} \right]^a \quad 3.3$$

$C_{d,i}$ é o coeficiente de descarga para o bocal i. $Re_{d,i}$ é o número de Reynolds na descarga do bocal i, o qual pode ser calculado por meio da Eq. 3.4:

$$Re_{d,i} = 4 \cdot \frac{\dot{m}_i}{\pi \cdot d_i \cdot \mu_{air}} \quad 3.4$$

Onde d_i representa o diâmetro de descarga do bocal e μ_{air} é a viscosidade dinâmica do ar. O valor de a é dado por:

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

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

A vazão total de ar é a soma das vazões de todos os bocais, Eq. 3.5:

$$\dot{m}_{air} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \cdot C_{d,i} \quad 3.5$$

O valor da temperatura de incidência do ar no radiador é controlado pelo aquecimento do ar em uma bateria de resistores elétricos localizados a jusante da seção de admissão do túnel de vento. Optou-se pelo circuito aberto do para melhor controle da temperatura do ar.

A bateria de resistores elétricos utilizada no controle da temperatura do ar possui uma potência nominal de 6kW. Estes resistores estão conectados a um conversor de potência, Fig. 3.14, que controla a potência dissipada pelas resistências, entre zero e a potência nominal. O conversor mantém uma potência dissipada pelas resistências conforme seu sinal de entrada, que é do tipo 4-20mA.



Figura 3.14 – Conversor de Potência associado ao banco de resistores elétricos.

O controle do sinal é do tipo PID, proporcional-integral-derivativo. O controle foi realizado por intermédio do sistema de aquisição fabricado pela empresa National Instruments, o qual possui um módulo de saída com sinal 4-20mA. O sinal enviado pelo programa de aquisição de dados ao conversor de potência é função da temperatura de incidência do ar no radiador, a qual foi monitorada em tempo real. O sistema foi testado inicialmente da seguinte maneira: mantendo-se a temperatura constante em um ponto de operação definido, e aplicando-se um degrau na entrada do conversor de potência (variação na corrente de entrada do conversor), tornou-se possível a verificação de como esse distúrbio altera a saída do sistema, nesse caso a temperatura de entrada do ar. Por meio deste procedimento, foi obtida uma função de transferência para o distúrbio e o controlador constituiu-se de uma realimentação negativa desta função de transferência. Na interface

apresentada na Fig. 3.15, é possível observar painel de controle da variável temperatura do ar, com as constantes de controle e sinal de saída (4-20mA) para o conversor de potência.

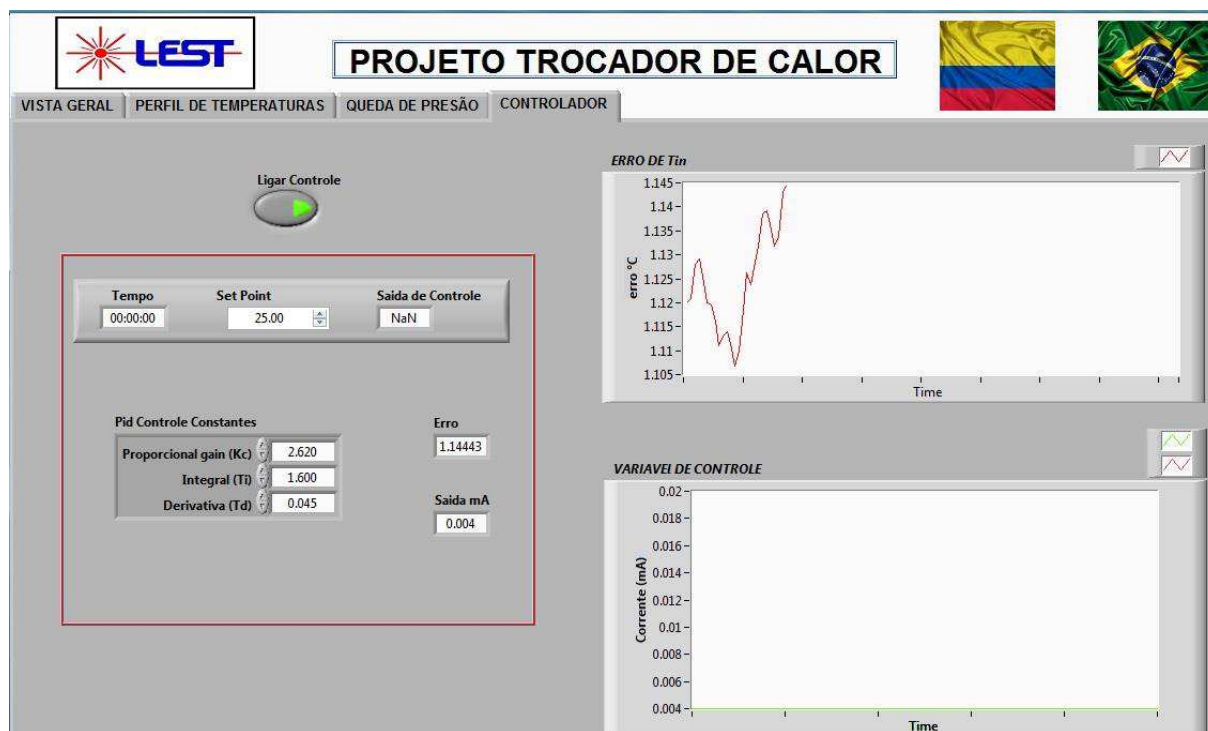


Figura 3.15– Controle PID da temperatura de incidência do ar.

O valor da temperatura de entrada do ar foi fixado em 25°C, e as constantes de controle foram calculadas a partir deste parâmetro. O controlador é capaz de manter a entrada do ar em até 10°C acima da temperatura ambiente, para baixas vazões de ar, entretanto tem sua maior eficiência com a entrada definida para 25°C.

Além da vazão de ar, são medidas as temperaturas médias a montante e a jusante do trocador de calor. Para isso, em cada uma destas seções há uma malha de 12 termopares, dispostos simetricamente, posicionados de acordo com a norma ASHRAE 33 (1978).

Para a medição das temperaturas de bulbo úmido, foi utilizado um sensor termohigrômetro OMEGA RHXL3SD, Fig. 3.16, capaz de fornecer também a umidade relativa do ar. A medição é realizada na seção de entrada do túnel. Com as medidas de temperatura de bulbo seco e úmido na entrada do túnel, é possível determinar a umidade absoluta do ar. Além disso, como o túnel é vedado, podemos considerar que a umidade absoluta do ar se conserva ao passar pelo o trocador de calor.

O circuito de ar possui, ainda, 3 retificadores de ar, sendo um deles à jusante das resistências elétricas de aquecimento (a montante do radiador) e os outros 2 no pleno onde se localiza a placa de bocais, sendo um à montante e outro à jusante da placa de bocais. A

Fig. 3.17 apresenta uma perspectiva completa do túnel de vento, indicando o posicionamento de cada elemento do lado do ar.

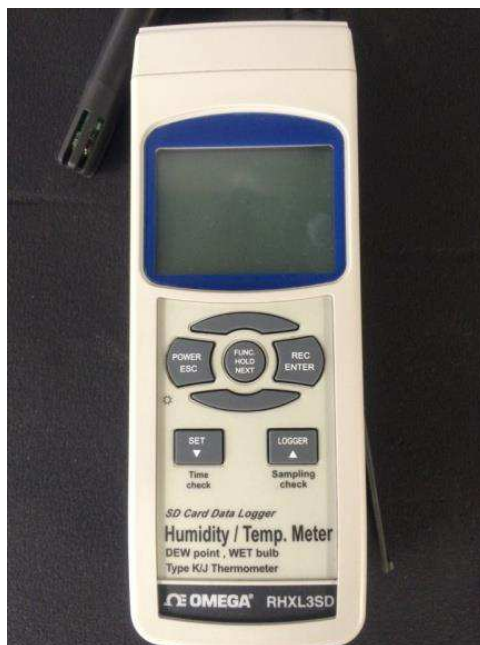


Figura 3.16 – Termohigrômetro digital.

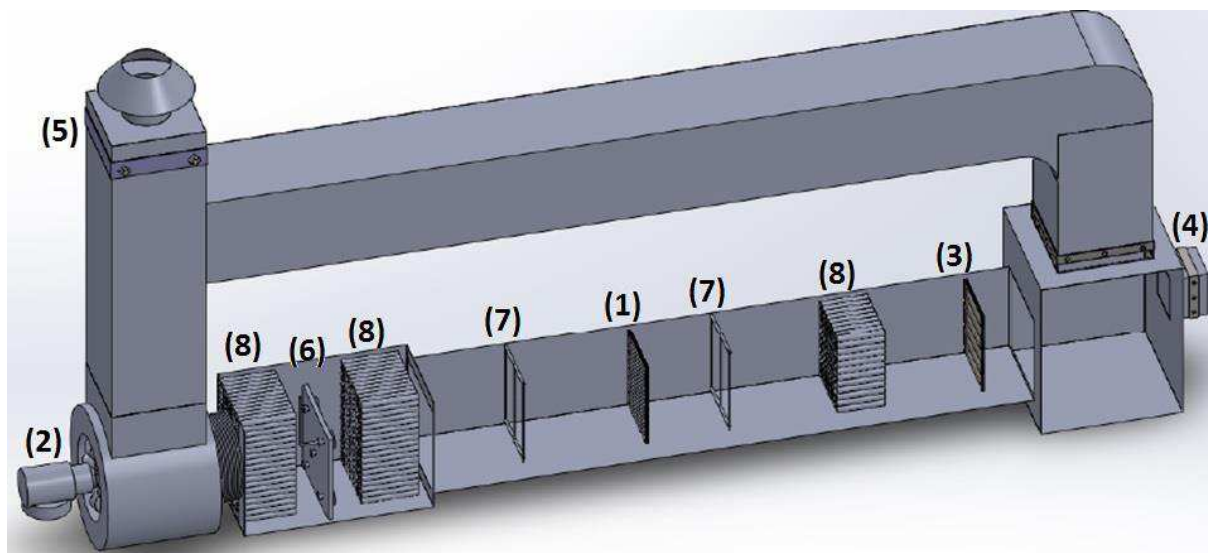


Figura 3.17– Circuito de ar: 1-Radiador;2-Ventilador; 3-Resistores elétricos; 4- Registro de admissão; 5- Registro de descarga; 6- Placa de bocais; 7-Malha de termopares; 8- Retificador de escoamento.

O circuito de fluido quente possui uma microbomba (MICROPUMP) com capacidade de fornecer vazões de até 12 litros/minuto, além de suportar líquidos em elevadas temperaturas. Trata-se de uma bomba de deslocamento positivo de engrenagens não

metálicas, adotada com o intuito de amenizar o efeito de pulsação na vazão. O motor que aciona a bomba está conectado a um inversor de frequência, com o objetivo de variar a vazão de líquido. A bomba e o inversor de frequência estão ilustrados nas Fig. 3.18 e Fig. 3.19.



Figura 3.18 – Microbomba e motor.



Figura 3.19 – Inversor de frequência do motor que aciona a bomba (Danfoss).

O aparato experimental conta ainda com um trocador de calor com temperatura de parede constante, que é, basicamente, um banho termostático de água. Este banho (desenvolvido no laboratório) é aquecido por uma resistência elétrica trifásica de 9kW. O fluido de trabalho escoar no interior do tubo de uma serpentina de cobre (diâmetro 3/8”), imersa no interior do banho termostático. Uma bomba é conectada ao banho e tem a função de homogeneizar a água do banho, mantendo a sua temperatura uniforme. A temperatura do banho é controlada por um termostato, que liga quando a água está a uma temperatura abaixo

de um valor estabelecido e desliga quando a água atinge a temperatura determinada. Este controle permite ajustar com precisão a temperatura de entrada do fluido de arrefecimento no radiador. O banho termostático e o termostato utilizados no controle são ilustrados nas Fig. 3.20 e Fig. 3.21.



Figura 3.20 – Banho termostático.



Figura 3.21 – Termostato utilizado no controle da temperatura do banho termostático.

A vazão de líquido é medida por um medidor de vazão tipo coriolis. O sensor utilizado é modelo RHM 12 da METROVAL. Este sensor possui elevada precisão em toda a faixa de vazões analisada. A Fig. 3.22 apresenta o medidor de vazão.



Figura 3.22 – Medidor de vazão Coriolis.

O circuito de fluido de arrefecimento possui também um reservatório de líquido, localizado logo antes da seção de entrada no radiador. O reservatório utilizado nos testes com nanofluidos baseados em água está ilustrado na Fig. 3.23 (no outro radiador testado, este reservatório é anexo às tubulações). Este elemento possui duas funções:

- Manter afogada a bomba de circulação do fluido de arrefecimento, assim como preencher com líquido todo o interior das tubulações do radiador;
- Controlar a pressão do sistema, por meio de sua tampa, que é uma válvula reguladora de pressão.



Figura 3.23 – Exemplo de reservatório e tampa.

O elemento central do aparato experimental, o radiador, está localizado na linha de líquido, entre o reservatório (que o mantém afogado) e a bomba de engrenagens. Os radiadores utilizados foram: radiador utilizado no veículo NOVO PALIO, para os testes com nanofluidos baseados em água, e radiador utilizado no UNO MILLE, nos testes com nanofluidos baseados em EG30%. Estes radiadores estão ilustrados, nesta ordem na Fig. 3.24. Para efeito de organização dados, os radiadores utilizados no NOVO PALIO e UNO MILLE serão chamados mais adiante por radiador 1 e radiador 2.



Figura 3.24 – Radiadores ensaiados (modelos NOVO PALIO e UNO MILLE).

Nas seções de entrada e saída do radiador, a linha de líquido possui sensores de temperatura do tipo RTD (resistive temperature detector), valores que permitem calcular o gradiente de temperatura do líquido no radiador. Na Fig. 3.25, é apresentado um esquema completo do circuito de líquido, indicando seus componentes principais.

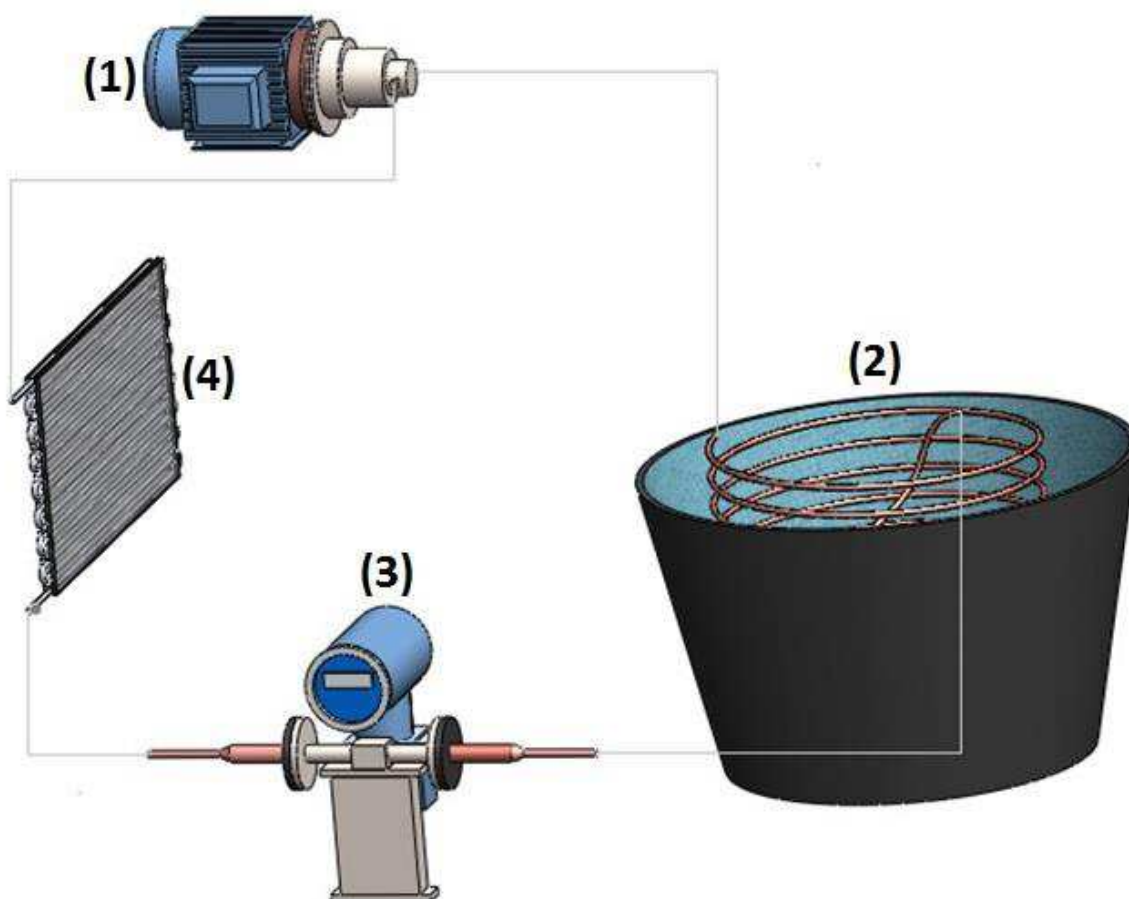


Figura 3.25– Esquema do circuito de fluido de arrefecimento: 1-Bomba; 2-Banho termostático; 3- Medidor de vazão; 4- radiador.

A Fig. 3.26 apresenta uma vista geral da bancada experimental, localizada no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia da Universidade Federal de Uberlândia. Nessa imagem é possível identificar todos os elementos descritos anteriormente.

O sistema de aquisição é constituído de módulos acoplados a um chassi NI Compact cDAQ-9178XT da marca NATIONAL INSTRUMENTS. Os módulos são, respectivamente, para aquisição de dados de termopares (tipo T ou K), entrada analógica para RTD de 100Ω com 24 bits; e um módulo para aquisição do sinal analógico com entrada de 20 mA, utilizado para os sensores de pressão (ou diferencial de pressão).

Os dados adquiridos são então, transferidos a um computador e, por meio de uma plataforma em LABVIEW, os sinais são condicionados e podem ser analisados. O chassi e módulos de aquisição estão ilustrados nas Fig. 3.27 e Fig. 3.28.



Figura 3.26 – Vista geral da bancada experimental.



Figura 3.27 – Chassi do sistema de aquisição (NATIONAL INSTRUMENTS).



Figura 3.28 – Módulos de aquisição (NATIONAL INSTRUMENTS).

Os sinais adquiridos foram monitorados em tempo real, como indicado na Fig. 3.29. É possível identificar todos os 12 valores de temperaturas de entrada e saída, bem como as temperaturas médias de entrada e saída do ar, temperaturas de entrada e saída de líquido, além da vazão de líquido.

O programa desenvolvido em plataforma LABVIEW está programado para salvar dados conforme comando do operador. Desta forma, quando os equipamentos atingem a condição de regime permanente, inicia-se a coleta de dados.

Uma interface secundária, Fig. 3.30, apresenta na forma de gráficos as temperaturas de entrada do ar e do fluido quente em função do tempo. Este monitoramento torna mais fácil a verificação das condições estacionárias.

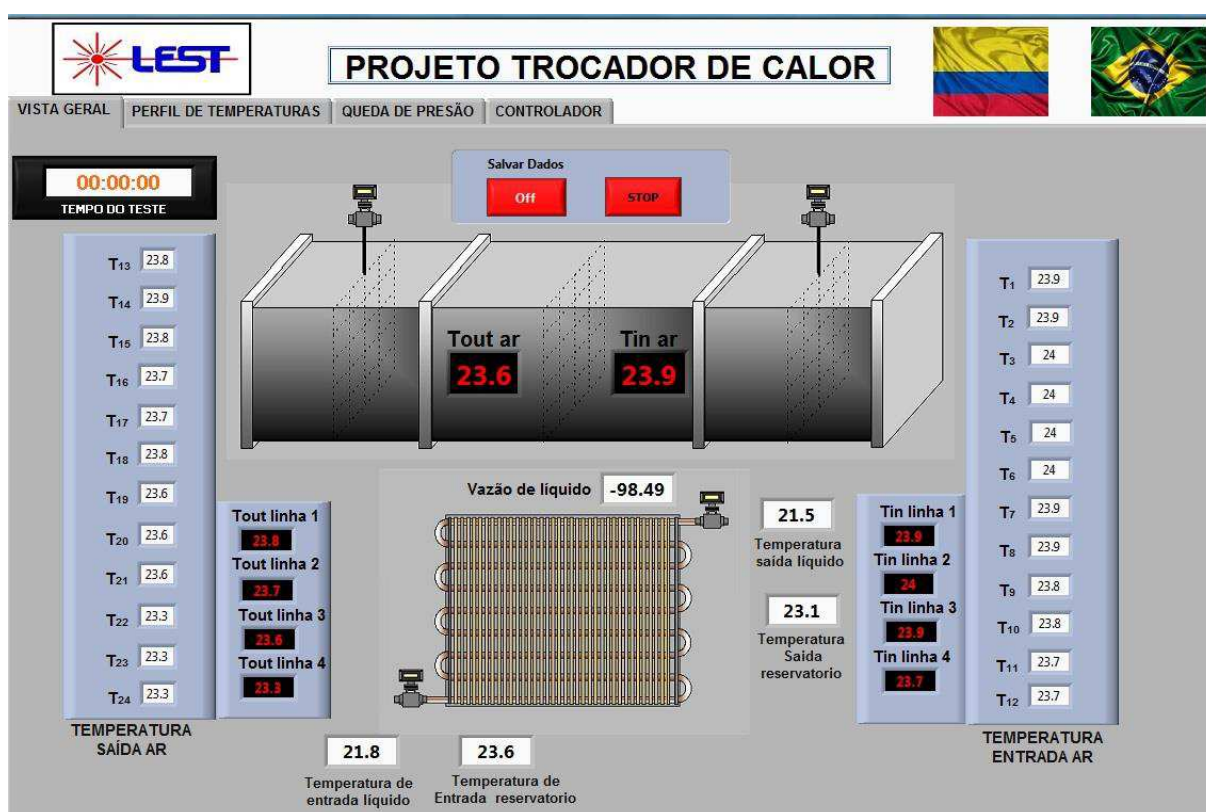


Figura 3.29 – Interface de monitoramento dos testes experimentais.



Figura 3.30– Interface de controle de temperatura e regime permanente dos testes experimentais.

3.4. Metodologia de Projeto e Análise dos Experimentos

A fim de analisar a importância dos principais parâmetros no desempenho térmico do fluido de arrefecimento convencional e, principalmente dos nanofluidos, os testes foram conduzidos em condições de regime permanente e as condições de testes foram variadas da seguinte forma:

- Vazão mássica e temperatura de incidência do ar no radiador: foram mantidos constantes, em 0,175 kg/s e 25°C, respectivamente. Como o objetivo deste trabalho é comparar apenas o desempenho dos fluidos de arrefecimento, os parâmetros do lado do ar foram mantidos os mesmos para todos os testes;

- Vazão mássica de fluido de arrefecimento:

- Radiador 1: 30, 40, 50, 60, 70 g/s;

- Radiador 2: 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130 g/s;

- Temperatura de entrada do fluido de arrefecimento no radiador: 50, 60, 70 e 80°C.

A Tab. 3.3 ilustra de forma sucinta as condições dos ensaios experimentais nos radiadores:

Tabela 3.3. – Condições de ensaios nos radiadores

	Condições de Ensaio	
	Radiador 1	Radiador 2
Vazão de ar (kg/s)	0,175	0,175
Temperatura de incidência do ar (°C)	25	25
Vazão de líquido (g/s)	30, 40, 50, 60 e 70	70, 80, 90, 100, 110, 120 e 130
Temperatura de entrada do líquido (°C)	50, 60, 70 e 80	50, 60, 70 e 80
Fluido base	Água	EG30%
Nanofluidos	MWCNT/água	MWCNT/EG30% e GRAFENO/EG30%
Concentração de nanopartículas	0,05; 0,08 e 0,16%	0,05; 0,1; 0,2 e 0,3%

Como foram produzidos 11 nanofluidos diferentes, sendo 3 destes (compostos por MWCNT/água) testados no radiador 1, e os demais 8 (compostos por MWCNT/EG30% e GRAFENO/EG30%) testados no radiador 2, totalizou-se 300 testes experimentais, sendo 20 ensaios para cada fluido baseado e 28 ensaios para cada fluido baseado em EG30%.

3.4.1. Condição de Regime Permanente

A condição de regime permanente é uma consideração que o sistema se encontra em operação estável, e o tempo médio para atingir tal condição foi de aproximadamente 1 hora.

A condição é estimada em função dos valores de oscilação de cada parâmetro do sistema (sensores de pressão, temperatura e vazão mássica) no intervalo de tempo corrido do ensaio. O efeito de pequenas variações nas condições do ar ambiente, a presença de bolhas no medidor de vazão e ruídos relacionados ao sistema de aquisição são barreiras à estabilidade do sistema.

Os pontos experimentais são obtidos por intermédio das médias dos valores em um intervalo de dez minutos após a bancada entrar em regime permanente.

3.4.2. Funções objetivo

A análise do desempenho dos fluidos de arrefecimento foi realizada utilizando como funções objetivo as taxas de transferência de calor (\dot{Q}), a condutância térmica (UA), o coeficiente de transferência de calor no lado do fluido de arrefecimento (h) e a potência de bombeamento (\dot{W}). No trocador de calor, a partir das temperaturas e vazões medidas, foi calculada a taxa de transferência de calor (\dot{Q}). Este cálculo foi possível para os dois circuitos térmicos (ar e fluido de arrefecimento) apenas nos testes com fluido base, para os quais são conhecidas as propriedades termodinâmicas. Desta forma, para os fluidos base, foi possível comparar as taxas de transferência de calor obtidas para o lado do ar e do fluido de arrefecimento, confirmando o balanço de energia, ou seja, que o calor perdido pelo fluido de arrefecimento é o mesmo ganho pelo ar. As taxas de transferência de calor podem ser determinadas pelas equações 3.6 e 3.7:

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air} \cdot (h_{out,air} - h_{in,air}) = \dot{m}_{air} \cdot c_{p,air} \cdot (T_{out,air} - T_{in,air}) \quad 3.6$$

$$\dot{Q}_{liq} = \dot{m}_{liq} \cdot (h_{in,liq} - h_{out,liq}) = \dot{m}_{liq} \cdot c_{p,liq} \cdot (T_{in,liq} - T_{out,liq}) \quad 3.7$$

Onde \dot{Q}_{air} e \dot{Q}_{liq} são as taxas de transferência de calor para os volumes de controle do ar e do fluido quente, respectivamente. Os parâmetros h e c_p denotam entalpia e calor específico.

O erro experimental do balanço de energia pode ser calculado pela Eq. 3.8:

$$erro\% = 100 \cdot \frac{|\dot{Q}_{liq} - \dot{Q}_{air}|}{\dot{Q}_{medio}} \quad 3.8$$

Na qual: $\dot{Q}_{medio} = 0,5 \cdot (\dot{Q}_{liq} + \dot{Q}_{air})$.

Por outro lado, nos testes, com nanofluidos, foi possível calcular o valor de \dot{Q} apenas para o lado do ar, visto que não foram determinadas entalpia e calor específico para os nanofluidos. Por este motivo, todas as comparações foram realizadas utilizando o calor determinado no lado do ar. Isso foi possível pois o erro experimental no balanço de energia obtido nos testes com fluido base foi, em quase todos os testes, inferior a 6% (e sempre inferior a 10%).

Em aplicações de trocadores de calor de escoamento cruzado, onde são conhecidas as temperaturas de entrada e saída dos dois fluidos, a forma mais adequada para determinar a condutância térmica, UA, é utilizar a média logarítmica da diferença de temperatura, ΔT_{lm} , de acordo com a Eq. 3.9.

$$\dot{Q}_{air} = F \cdot U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad 3.9$$

Onde a média logarítmica da diferença de temperatura é relacionada pela Eq. 3.10:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left[\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right]} \quad 3.10$$

O parâmetro F representa um fator de correção para o cálculo de U, visto que as equações originais foram desenvolvidas para trocadores de calor tubo em tubo. Porém, como para trocadores de calor de escoamento cruzado os valores de F são próximos de 1, este parâmetro foi desprezado. Os gradientes de temperatura ΔT_1 e ΔT_2 são determinados por meio das Eqs. 3.11 e 3.12:

$$\Delta T_1 = T_{in,liq} - T_{out,air} \quad 3.11$$

$$\Delta T_2 = T_{out,liq} - T_{in,air} \quad 3.12$$

O número de Reynolds para o escoamento interno é dado pela Eq. 3.13:

$$Re_{liq} = 4 \cdot \frac{\frac{m_{liq}}{n}}{\pi \cdot d_h \cdot \mu_{liq}} \quad 3.13$$

Nessa equação, d_h representa o diâmetro interno de cada tubo, μ_{liq} a viscosidade avaliada na temperatura de filme T_m (Eq. 3.14) e n é o número de tubos do trocador.

$$T_m = \frac{T_{in,liq} + T_{out,liq}}{2} \quad 3.14$$

O escoamento interno no interior dos tubos é laminar. Neste caso, o escoamento cruzado se aproxima à condição de temperatura de parede constante, condição onde o número de Nusselt (Nu) é constante e igual a 3,66. O valor do coeficiente de transferência de calor teórico pode ser obtido por meio da Eq. 3.15:

$$Nu = \frac{h_{teo} \cdot d_h}{k} \quad 3.15$$

Onde h_{teo} é o coeficiente de transferência de calor médio teórico, d_h o diâmetro de cada tubo e k a condutividade térmica do líquido, avaliada na temperatura de filme T_m .

O coeficiente de transferência de calor médio experimental foi calculado utilizando a diferença de temperatura média logarítmica, de acordo com a Eq. 3.16:

$$h_m = \frac{\dot{Q}_{air}}{A_{int} \cdot \Delta T_{lm}} \quad 3.16$$

Onde h_m representa o coeficiente de transferência de calor médio experimental no lado do líquido e A_{int} área lateral interna dos tubos. O valor do coeficiente de transferência de calor no lado do líquido foi determinado apenas para os testes realizados no radiador 2, devido à maior quantidade de dados de condutividade térmica obtidos, o que tornou possível correlacionar esta propriedade em função da temperatura.

Os coeficientes de transferência de calor teórico e experimental foram comparados, no caso do fluido base EG30%, para efeito de validação dos resultados experimentais e serão apresentados no capítulo 4. Foram comparados os coeficientes de transferência de calor experimental do fluido base (EG30%) e dos 8 nanofluidos em função do número adimensional de Reynolds (Re).

A potência de bombeamento foi medida por meio do inversor de frequência associado ao motor da bomba de engrenagens.

$$\dot{W} = V_1 \cdot i \cdot FP \quad (3.17)$$

Onde \dot{W} representa a potência de bombeamento, V_1 a tensão elétrica, i representa a corrente elétrica e FP o fator de potência.

3.4.3. Incerteza Experimental

As variáveis utilizadas neste trabalho podem ser classificadas em 2 grupos: medidas e calculadas. Os parâmetros considerados medidos são aqueles em que a instrumentação permitiu sua avaliação direta durante os ensaios (pressão, temperatura, vazão). Já os parâmetros calculados (taxa de transferência de calor, coeficiente de transferência de calor, gradiente de temperatura) estão correlacionados aos parâmetros medidos, consequentemente suas respectivas incertezas também dependem da incerteza dos parâmetros medidos. Os sensores de temperatura e pressão foram calibrados por meio de comparação com instrumentos padrão. Por meio desta calibração, foi possível determinar a

incerteza associada a cada medida em cada teste. De posse desses valores de incerteza, a determinação da incerteza dos parâmetros calculados foi realizada por de propagação de incerteza utilizando o software EES. O software EES utiliza o método descrito em uma norma técnica do NIST (Taylor, Kuyat, 1993). Segundo a norma, assumindo que as medidas individuais são independentes e aleatórias, a propagação de incerteza para uma variável calculada Y pode ser determinada por meio da Eq. 3.17:

$$U_Y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot U_{x_i}^2} \quad 3.17$$

Onde U_Y representa a incerteza da variável Y (calculada), U_{x_i} representa a incerteza na variável medida i (correlacionada com Y). A Tab. 3.4 mostra a incerteza dos principais parâmetros medidos e calculados.

Tabela 3.4 – Incertezas experimentais associadas aos parâmetros medidos e calculados.

Parâmetros medidos			Parâmetros calculados		
Parâmetro	Incerteza	Unidade	Parâmetro	Incerteza	Unidade
Temperatura (termopar) (T)	0,1	°C	Taxa de transferência de calor (\dot{Q})	2 a 3	%
Temperatura (PT100) (T)	0,1	°C	Condutância térmica (UA)	0,004	kW/K
Temperatura bulbo úmido (T_{BU})	1	°C	Coefficiente de transferência de calor (h_m)	7	W/m ² -K
Diferencial de pressão nos Bocais (ΔP)	2	mmH ₂ O	Vazão de Ar (\dot{m}_{air})	0,018	Kg/s
Condutividade térmica (k)	0,012	W/m-K	Potência	-	-
Viscosidade dinâmica (μ)	0,015	mPa-s	-	-	-
Densidade (ρ)	5	Kg/m ³	-	-	-
Vazão de líquido (\dot{m}_{liq})	0,2	g/s	-	-	-

CAPITULO IV

RESULTADOS

Os resultados da presente tese estão divididos em 2 etapas: a avaliação experimental das propriedades dos nanofluidos e a avaliação experimental do desempenho térmico dos mesmos nanofluidos em um radiador automotivo. O conhecimento das propriedades é fundamental para os cálculos dos coeficientes de transferência de calor. A partir do conhecimento das mesmas foram calculadas as taxas de transferência de calor e coeficientes de transferência de calor para os nanofluidos. Sendo assim, os resultados estão apresentados na seguinte sequência:

- Validação dos resultados;
- Propriedades térmicas dos nanofluidos;
- Desempenho dos nanofluidos no radiador.

Tabela 4.1 – Resultados gráficos apresentados neste capítulo.

Parâmetro obtido	Números das figuras	Equipamento Utilizado no teste	Resultado apresentado nas figuras
-	4.1 a 4.6	Todos*	Validação dos resultados
μ	4.7 a 4.9	Viscosímetro	Viscosidade dos nanofluidos
ρ	4.10 e 4.11	Viscosímetro	Densidade dos nanofluidos
k	4.12 e 4.14	Condutímetro	Condutividade térmica dos nanofluidos
\dot{Q} (1)	4.15 a 4.18	Radiador 1	Taxa de transferência de calor
UA (1)	4.19 a 4.22	Radiador 1	Condutância térmica
\dot{Q} (2)	4.23 a 4.30	Radiador 2	Taxa de transferência de calor
UA (2)	4.31 a 4.38	Radiador 2	Condutância térmica
h	4.37 a 4.44	Radiador 2	Coefficiente de transferência de calor para os nanofluidos
\dot{W}	4.45 a 4.52	Radiador 2	Potência de bombeamento para os nanofluidos
\dot{Q} (2)	4.55 e 4.56	Radiador 2	Taxa de transferência de calor

Legenda: *condutímetro, viscosímetro, túnel de vento com radiadores 1 e 2

4.1. Validação dos resultados experimentais

No presente trabalho foram determinadas experimentalmente as principais propriedades térmicas dos nanofluidos ensaiados (viscosidade, densidade e condutividade térmica). Visando garantir a exatidão dos resultados apresentados, as propriedades dos fluidos base foram comparadas com os valores apresentados nas tabelas termodinâmicas.

Da mesma forma, como são conhecidas as propriedades dos fluidos base, os resultados no túnel de vento também foram comparados segundo uma estimativa teórica, comparando o balanço de energia, por intermédio da primeira lei da termodinâmica, para os lados do ar e do fluido quente. Além disso, foi também comparado o adimensional Nusselt obtido experimentalmente com uma estimativa teórica.

A viscosidade e a densidade dos fluidos foram medidas por meio do viscosímetro Anton Paar SVM 3000. A Fig. 4.1 mostra a comparação da viscosidade obtida experimentalmente para o etilenoglicol (tanto puro quanto o fluido EG30%) com a viscosidade experimental destes fluidos segundo as tabelas termodinâmicas. Pode-se observar que os valores concordam satisfatoriamente com os teóricos, boa exatidão na obtenção dos valores de viscosidade.

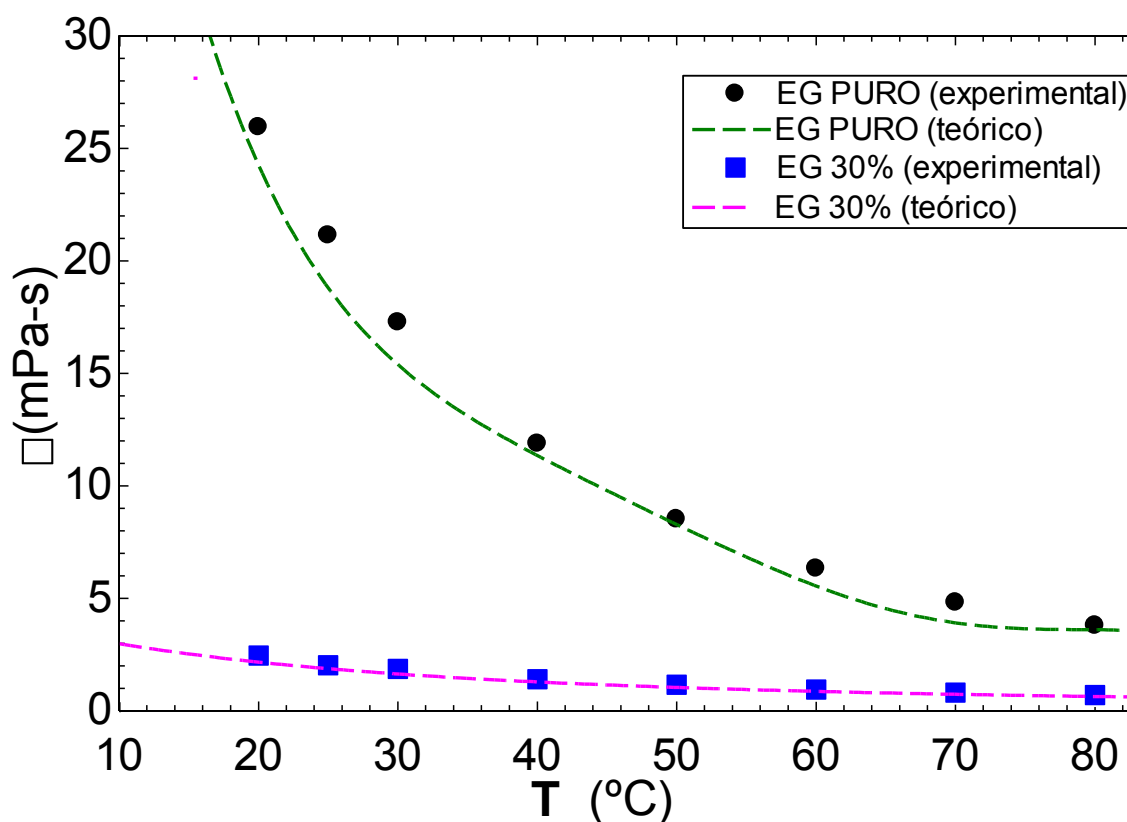


Figura 4.1 – Validação dos resultados para viscosidade.

A Fig. 4.2 ilustra a densidade do EG puro e do EG30% em função da temperatura. No gráfico, é possível comparar os resultados obtidos experimentalmente com os valores das tabelas termodinâmicas. Os desvios obtidos são reduzidos, evidenciando a exatidão da densidade medida experimentalmente.

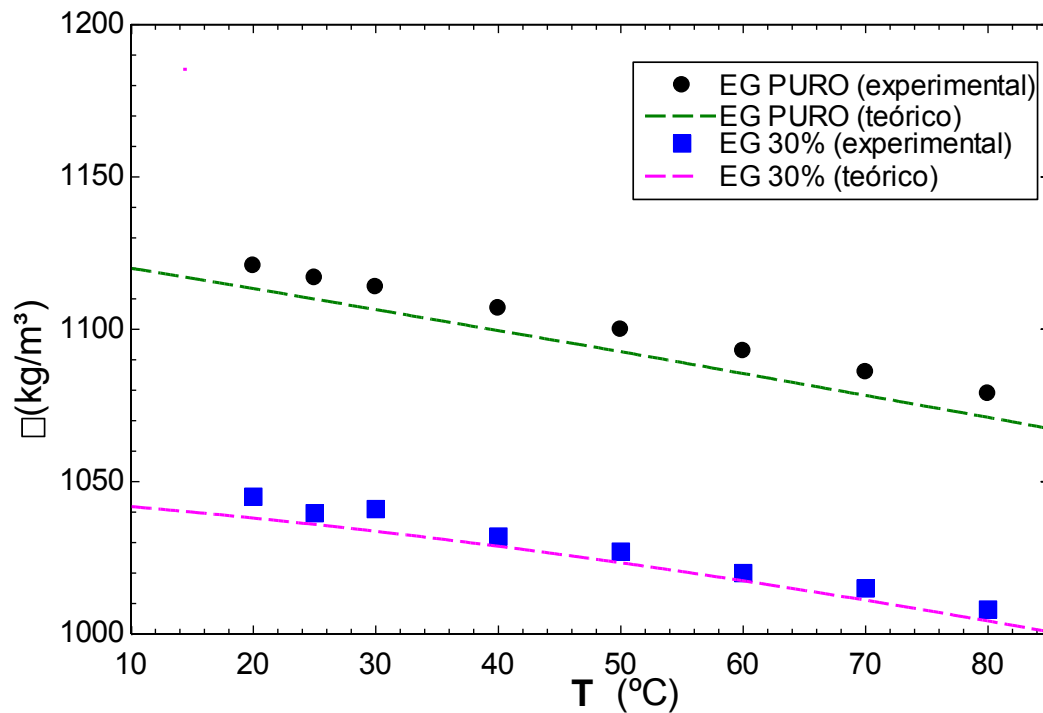


Figura 4.2 – Validação dos resultados para densidade.

A condutividade térmica foi medida por intermédio do sensor Linseis THB-1. Os resultados obtidos para o EG puro e o EG30% mostram elevada exatidão nas medições deste parâmetro.

Os resultados obtidos para a condutividade térmica do fluido base estão comparados com os valores teóricos para esta propriedade, podem ser observados na Fig. 4.3. É importante ressaltar que devido às limitações do aparato experimental, a condutividade térmica foi medida apenas para temperaturas de até 50°C.

O fluido base e todos os nanofluidos foram submetidos a testes em dois radiadores automotivos. Para a validação dos resultados, foram comparadas as taxas de transferência de calor nos volumes de controle do ar e fluido de arrefecimento. Como as propriedades dos fluidos base, ou seja, sem nanopartículas dispersas, são conhecidas, é possível estimar o calor perdido pelo fluido ao passar pelo radiador por meio da primeira lei da termodinâmica. A Fig. 4.4 mostra o balanço de energia para os testes com EG30%, para os volumes de controle do ar e fluido de arrefecimento. Observa-se um pequeno desvio na taxa de transferência de calor entre os dois fluidos.

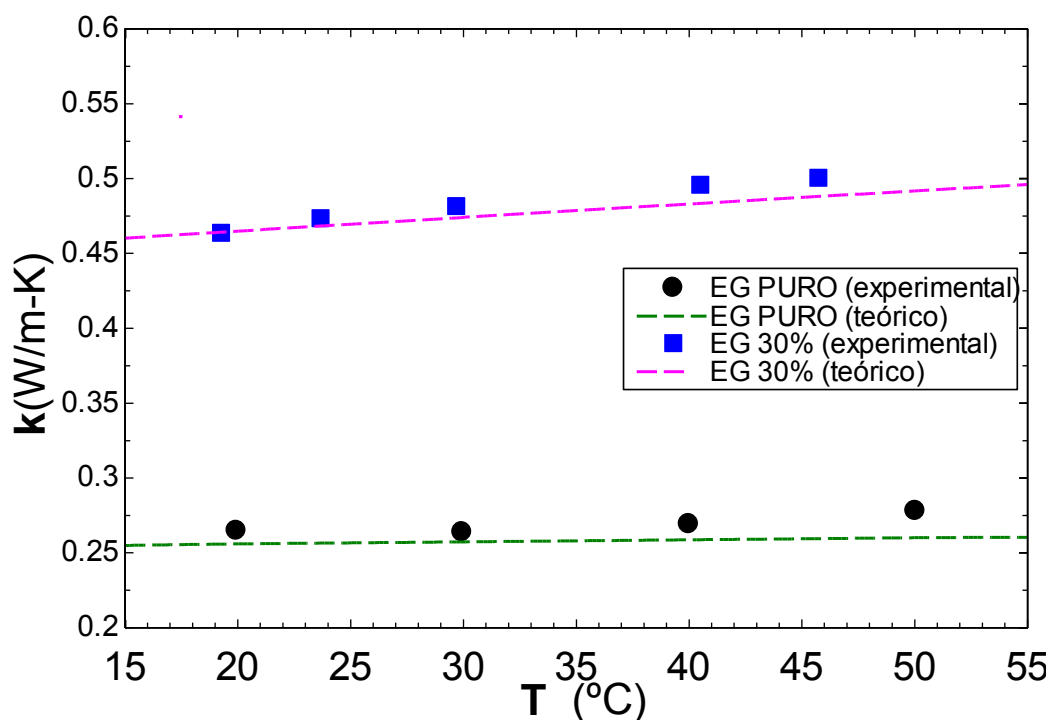


Figura 4.3 – Validação dos resultados para condutividade térmica.

A Fig. 4.5 apresenta o erro percentual no balanço de energia. Verificou-se que para todos os testes com fluido base o erro foi inferior a 10% na taxa de transferência de calor.

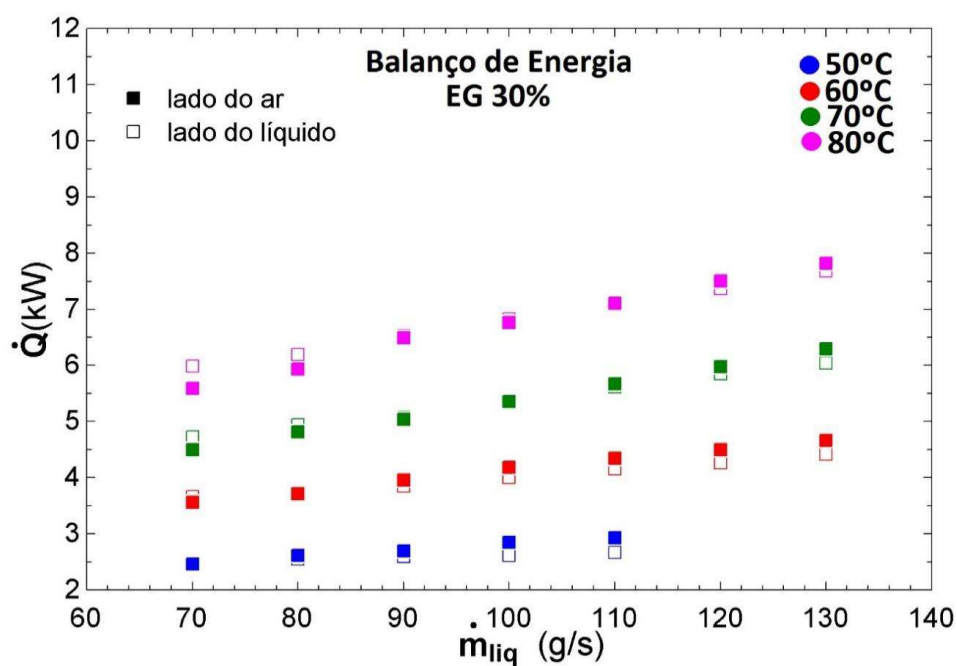


Figura 4.4 – Balanço de energia para os lados do ar e fluido quente para os testes com etilenoglicol.

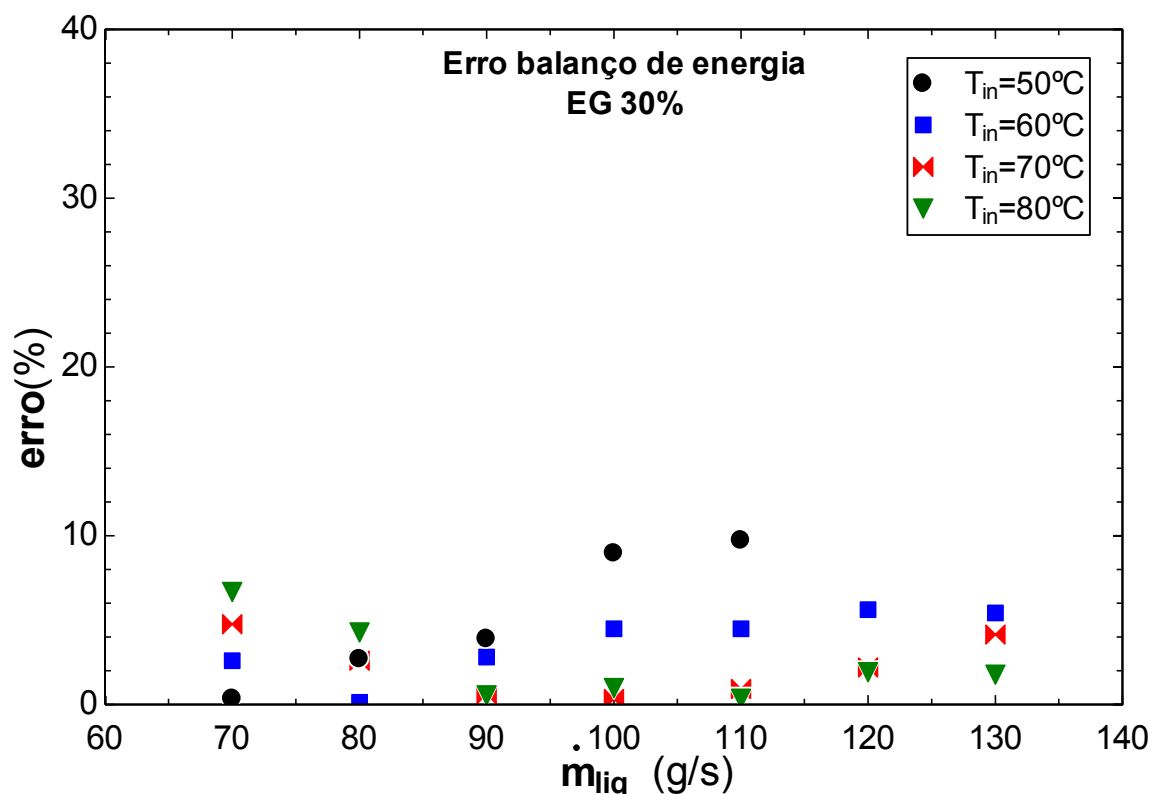


Figura 4.5 – Erro percentual no balanço de energia para os testes com etilenoglicol.

Os resultados, para os ensaios realizados no radiador 2, também foram analisados em função dos números adimensionais Reynolds (Re) e Nusselt (Nu), em termos do coeficiente de transferência de calor (h). Para os testes com etilenoglicol 30% e seus respectivos nanofluidos, o regime de escoamento foi laminar ($Re < 2300$). Para este regime de escoamento, o número de Nusselt (Nu) é constante para uma determinada condição de contorno. Desta forma, é possível calcular um coeficiente de transferência de calor teórico para compará-lo com o experimental. A Fig. 4.6 mostra os coeficientes de transferência de calor obtidos para o etilenoglicol 30% e os valores correspondentes do coeficiente de transferência de calor teórico (obtidos para um $Nu=3,66$, que é na condição de contorno de temperatura de superfície constante). Para todos os dados com exceção de 2 testes, o erro no cálculo do coeficiente de transferência de calor foi inferior a 10%.

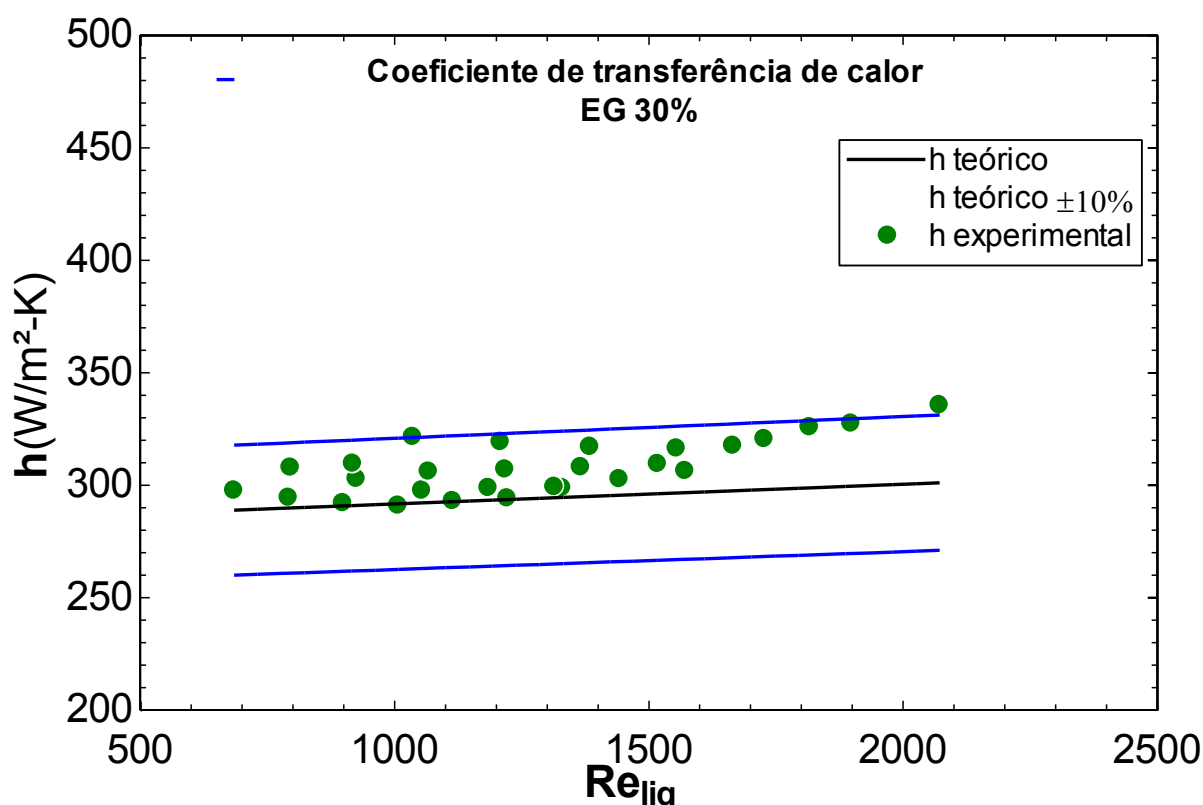


Figura 4.6– Validação dos resultados do coeficiente de transferência de calor para o etilenoglicol 30%.

4.2. Propriedades térmicas dos nanofluidos

A avaliação das propriedades térmicas é de fundamental importância na análise do desempenho de fluidos em transferência de calor. Neste trabalho, foram experimentalmente avaliadas: viscosidade, densidade e condutividade térmica de todos os fluidos analisados.

Viscosidade e densidade

A viscosidade dos nanofluidos foi avaliada e verificou-se um incremento discreto nesta propriedade com relação ao fluido base, para os nanofluidos baseados em EG30%, principalmente em baixas temperaturas. Por outro lado, os nanofluidos baseados em água apresentaram uma viscosidade significativamente superior à da água. A Fig. 4.7 ilustra os resultados obtidos para a viscosidade dos nanofluidos MWCNT/ÁGUA. O nanofluido com maior concentração, 0,16%, apresentou os maiores valores de viscosidade e o aumento relativo à água pura variou entre 39 e 54%, ou seja, o incremento da viscosidade foi significativo. Além disso, a viscosidade se mostrou crescente com a concentração de

nanopartículas. Esses resultados indicam que seria necessária uma maior potência de bombeamento para escoar os nanofluidos, em comparação com a água.

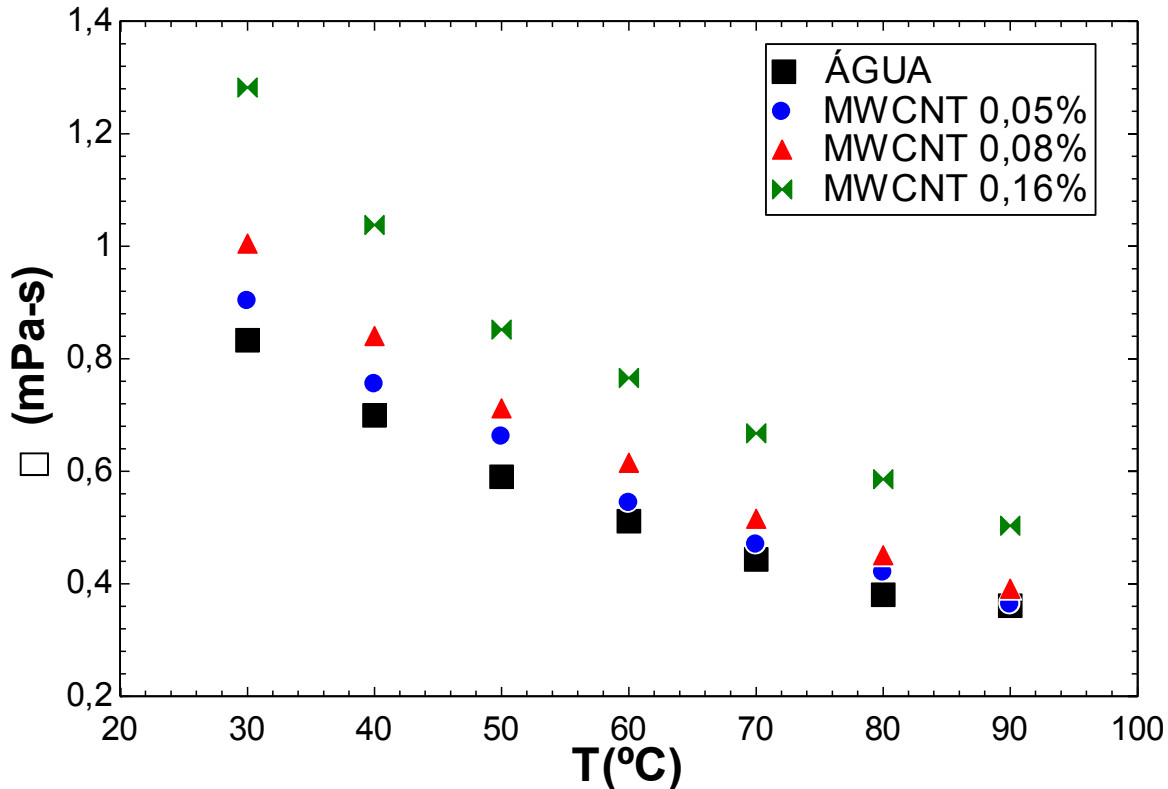


Figura 4.7 – Viscosidade obtida para os nanofluidos MWCNT/ÁGUA.

Os nanofluidos MWCNT/EG30% se mostraram ligeiramente mais viscosos que o EG30% para temperaturas até 50°C, na qual o maior aumento na viscosidade foi de 9,2%, obtido para o nanofluido de concentração 0,05%. Porém não há uma tendência clara na viscosidade relativa com relação à temperatura e concentração de nanopartículas. Já para as maiores temperaturas analisadas, 60, 70 e 80°C, o incremento na viscosidade destes nanofluidos se acentuou, ocorrendo alguns resultados significativamente superiores ao EG30%. O nanofluido MWCNT2 obteve significativos incrementos na viscosidade nos testes à temperatura 70 e 80 °C, sendo este aumento de 14,5 e 29,7%, respectivamente. Na maior temperatura analisada, 80°C, apenas o nanofluido de menor concentração, MWCNT05 apresentou um incremento discreto na viscosidade, 6,7%, enquanto os nanofluidos MWCNT1 e MWCNT3 apresentaram viscosidades 19,2 e 17,7% superiores à do EG30%. Estes resultados são apresentados na Fig. 4.8. Os resultados sugerem que seriam necessárias potências de bombeamento mais próximas à do fluido base, para utilização de nanofluidos, principalmente em temperaturas inferiores à 60°C.

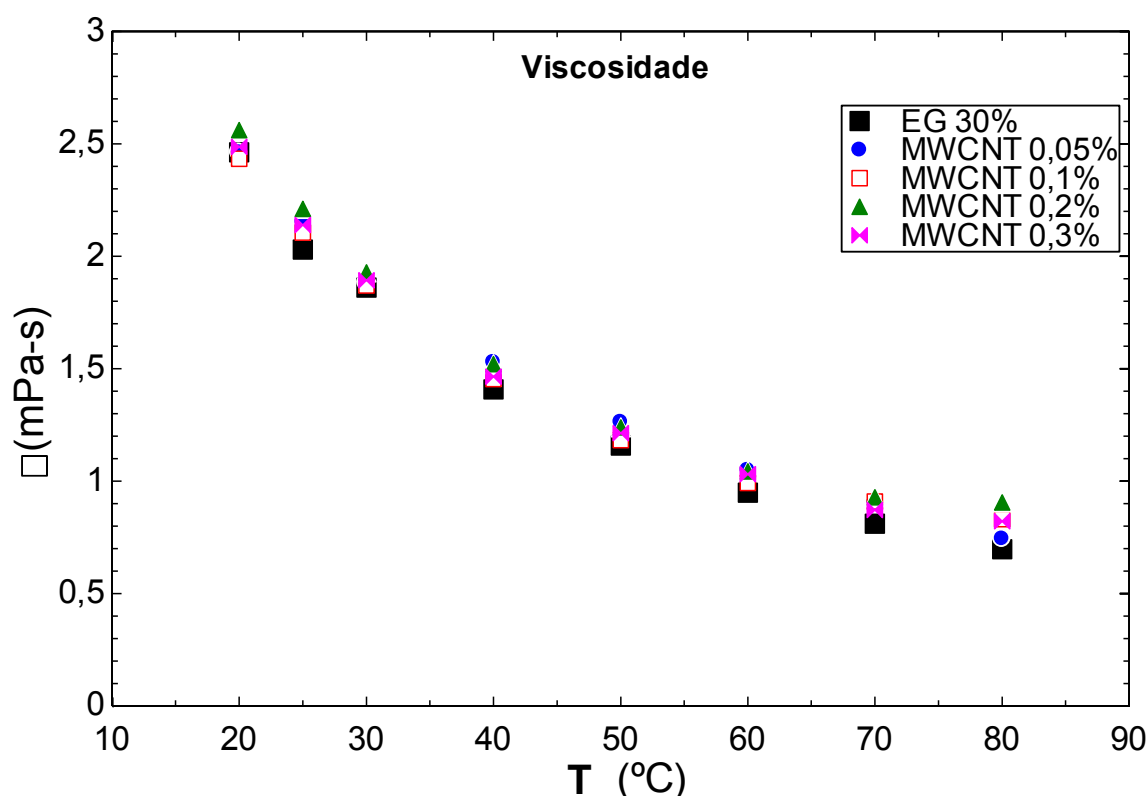


Figura 4.8 – Viscosidade obtida para os nanofluidos MWCNT/EG30%

Os nanofluidos de grafeno apresentaram valores de viscosidade próximos aos do fluido base em toda a faixa de temperaturas analisada, como ilustrado na Fig. 4.9. O nanofluido GRF1 apresentou viscosidade ligeiramente maior que o EG30% em quase todas as temperaturas, sendo o maior incremento de 4,7% à 25°C. Por outro lado, o nanofluido (GRF2) apresentou viscosidade ligeiramente inferior à do fluido base em todas as temperaturas analisadas, exceto 40°C. Já os nanofluidos GRF05 e GRF3 apresentaram valores de viscosidade muito próximos ao fluido base, com diminuições máximas de 3,9 e 3,8%. Os demais resultados foram ainda mais próximos aos do fluido base, o que indica um potencial de aplicação dos nanofluidos sem efeitos significativos na perda de carga.

A densidade dos nanofluidos baseados em EG30% também foi avaliada e os resultados obtidos para esta propriedade foram próximos aos do fluido base. A Fig. 4.10 mostra a densidade dos nanofluidos de MWCNT/EG30%. O máximo incremento na densidade observado para estes nanofluidos foi de 0,3%. A densidade dos nanofluidos de grafeno foi ainda mais próxima do EG30%, sendo o máximo incremento observado de 0,25%. Estes resultados mostram que a densidade dos nanofluidos, nesta faixa de concentrações, tem incremento desprezível e sua estimativa por meio do balanço de concentração e conservação de energia já pode ser considerado conservador. Estes resultados complementares estão mostrados na Fig. 4.11.

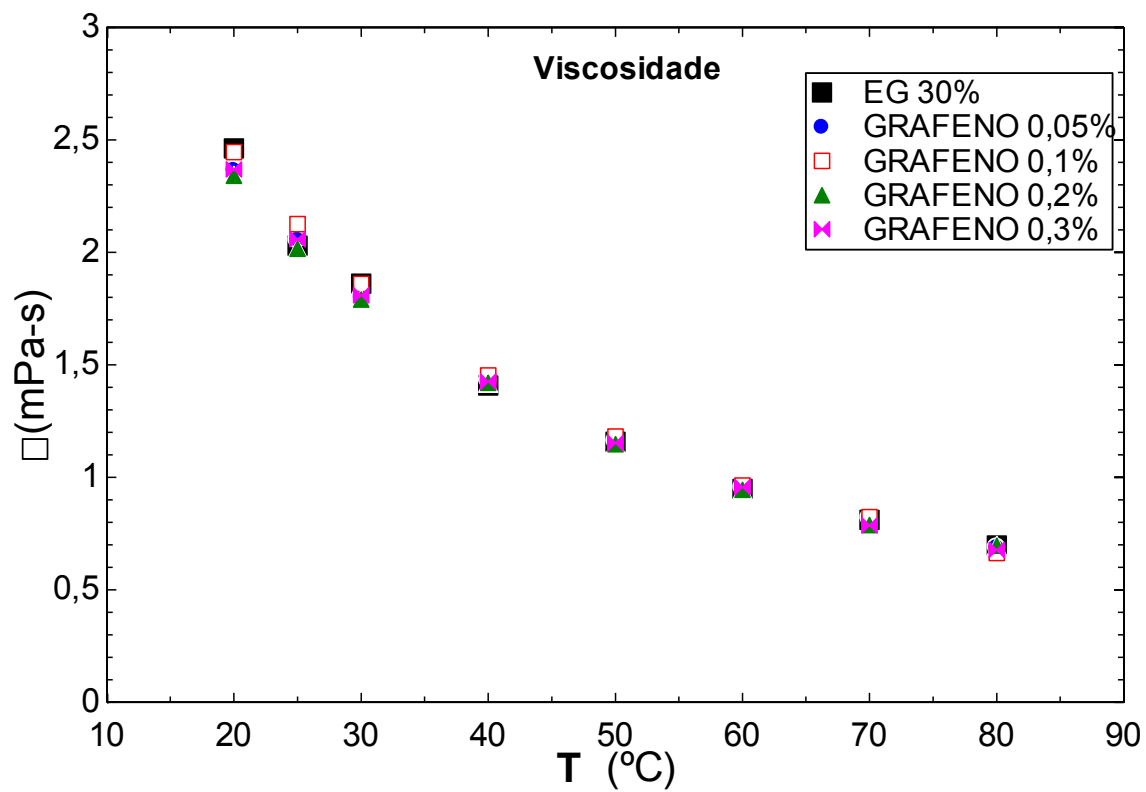


Figura 4.9 – Viscosidade obtida para os nanofluidos GRAFENO/EG30%

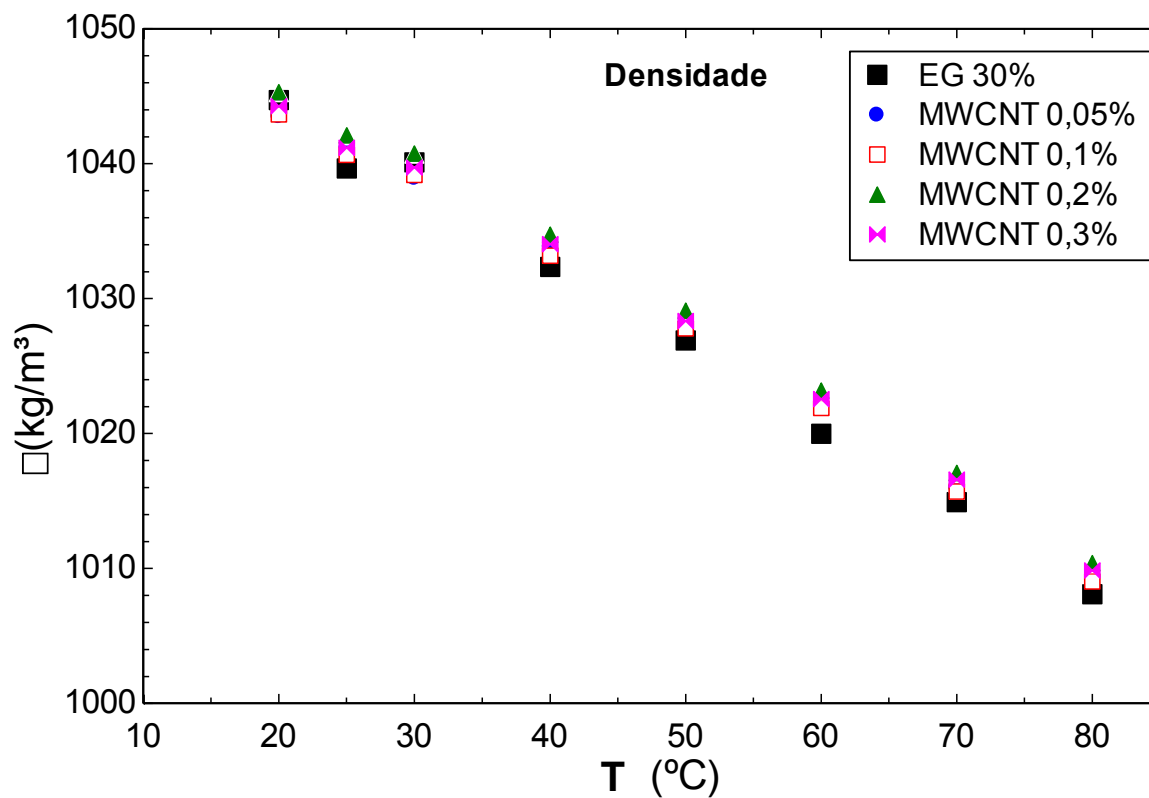


Figura 4.10 – Densidade obtida para os nanofluidos MWCNT/EG30%

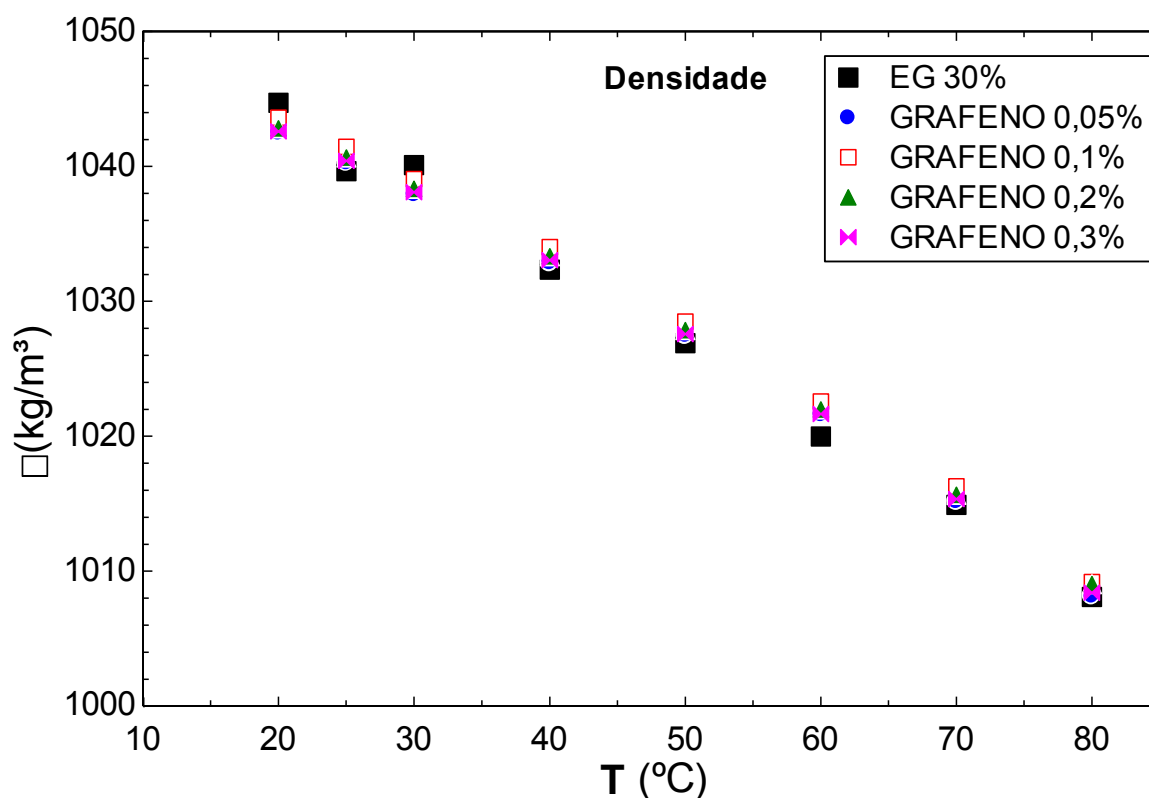


Figura 4.11 – Densidade dos nanofluidos GRAFENO/EG30%

Condutividade térmica

A condutividade térmica dos nanofluidos se mostrou superior à do fluido base na maioria dos casos. No caso dos nanofluidos MWCNT/água, o incremento foi discreto. O nanofluido com maior concentração apresentou a maior condutividade térmica, como ilustrado na Fig. 4.12. O incremento relativo ao fluido base foi de 2,9 e 3,5% a 25 e 50°C, respectivamente. O leve aumento pode ser atribuído à baixa concentração dos nanofluidos analisado. Estes aumentos são inferiores à maioria dos resultados da literatura, conforme já apresentado na Tab. 2.4, onde observam-se aumentos anômalos relativo ao fluido base em várias pesquisas. Este incremento discreto pode ser explicado pela elevada condutividade térmica da água, em relação a outros fluidos utilizados como fluido base, e à baixa concentração dos nanofluidos analisada.

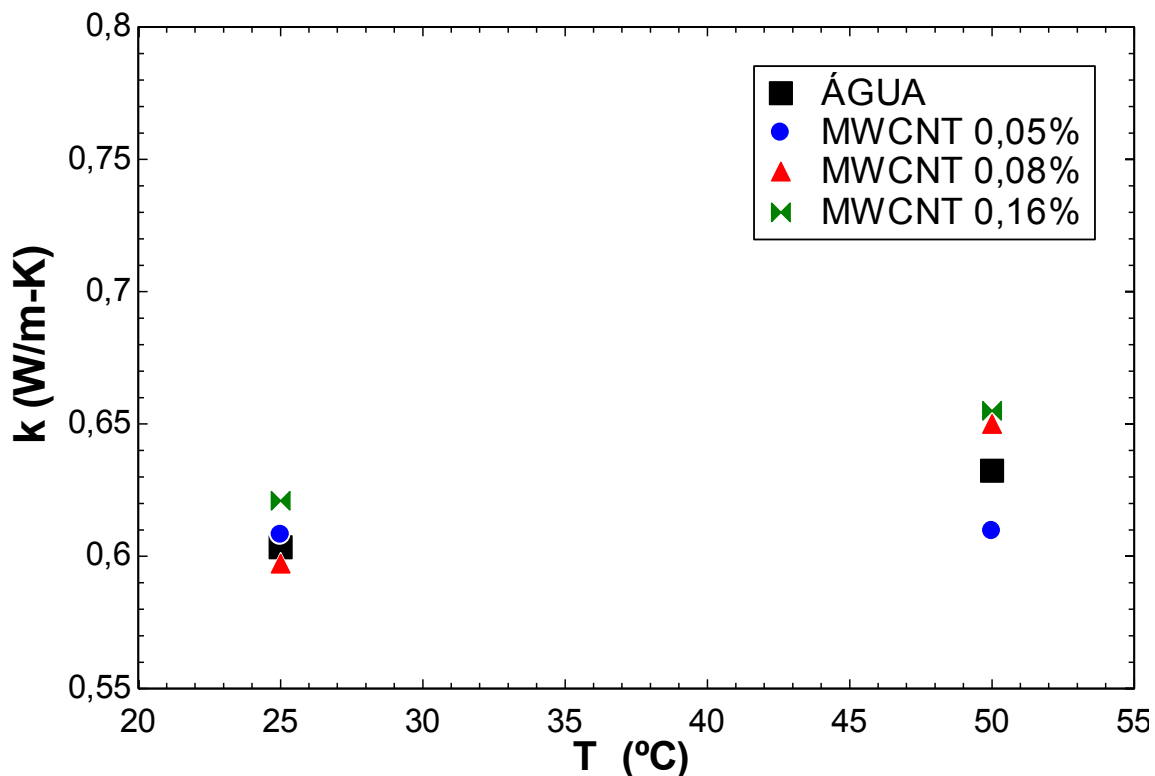


Figura 4.12 – Condutividade térmica dos nanofluidos MWCNT/ÁGUA

Para os nanofluidos baseados em EG30%, os incrementos na condutividade térmica observados foram maiores, porém ainda discretos. A condutividade térmica do EG30% é cerca de 25% inferior à da água pura, o que pode explicar o maior incremento relativo desta propriedade para os nanofluidos. A Fig. 4.13 mostra a condutividade térmica obtida para os nanofluidos de MWCNT. Nos testes com temperatura de 20°C, o nanofluido que apresentou a maior condutividade térmica foi o MWCNT05, 0,491W/m-K, 5,8% superior ao EG30%. Os demais nanofluidos apresentaram incrementos mais discretos, de até 3,5%. Na temperatura 30°C, os nanofluidos MWCNT1, MWCNT2 e MWCNT3 obtiveram seus respectivos picos de ganho na condutividade relativo ao fluido base, ainda que discretos (5,0, 4,0, e 7,7%, respectivamente). Nos testes com 40°C e 50°C, o nanofluido MWCNT05 mostrou os maiores valores de condutividade térmica, com aumento de 5,5% à 40°C e 4,6% à 50°C.

Para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, a condutividade térmica obtida foi próxima à dos nanofluidos MWCNT. O maior incremento na condutividade térmica (5,9%) foi observado para o nanofluido de concentração 0,2%, à 40°C. Não é possível identificar uma tendência na condutividade térmica relativa com relação a temperatura ou com relação à concentração. Nos testes com 20 e 30°C, os nanofluidos que apresentaram maior ganho na condutividade térmica foram GRF2 e GRF05, respectivamente, enquanto a 40 e 50°C, o nanofluido GRF3 obteve os melhores resultados para esta propriedade. Não se observa uma tendência de

incremento da condutividade relativa com o aumento da temperatura, como sugerem diversos autores da literatura. Estes resultados podem ser visualizados na Fig. 4.16.

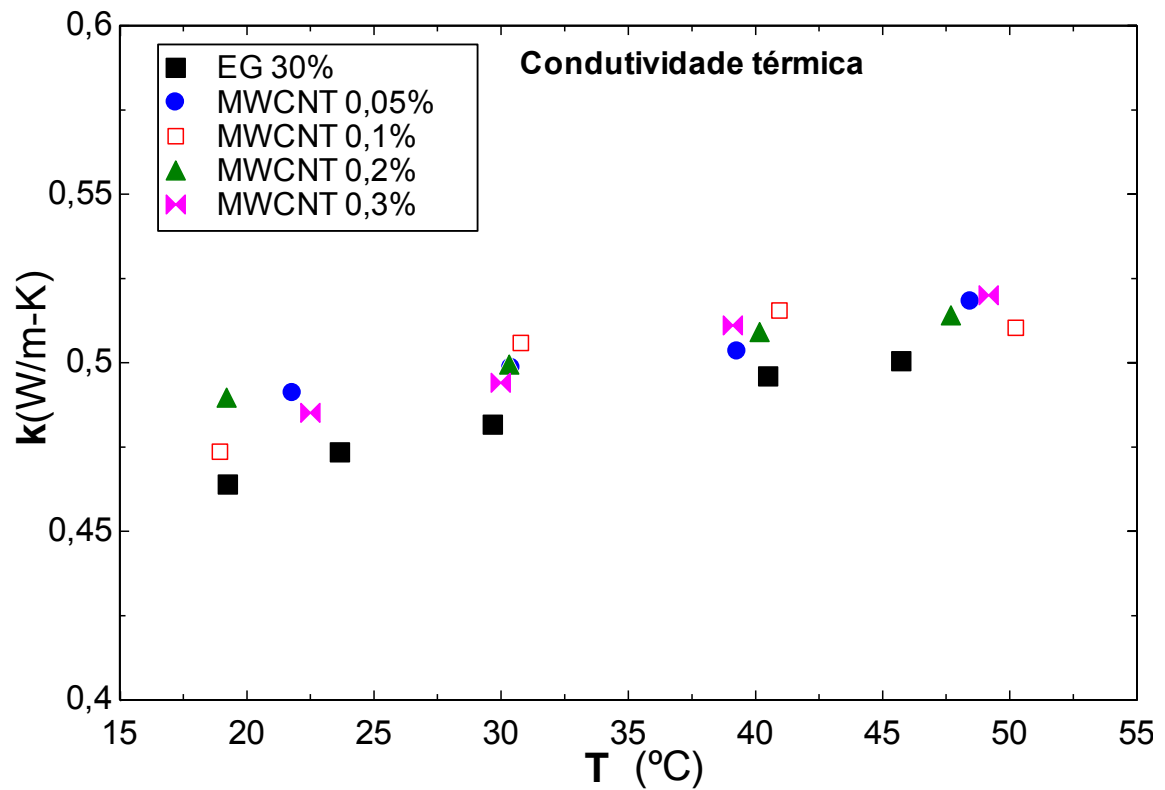


Figura 4.13 – Condutividade térmica dos nanofluidos de MWCNT.

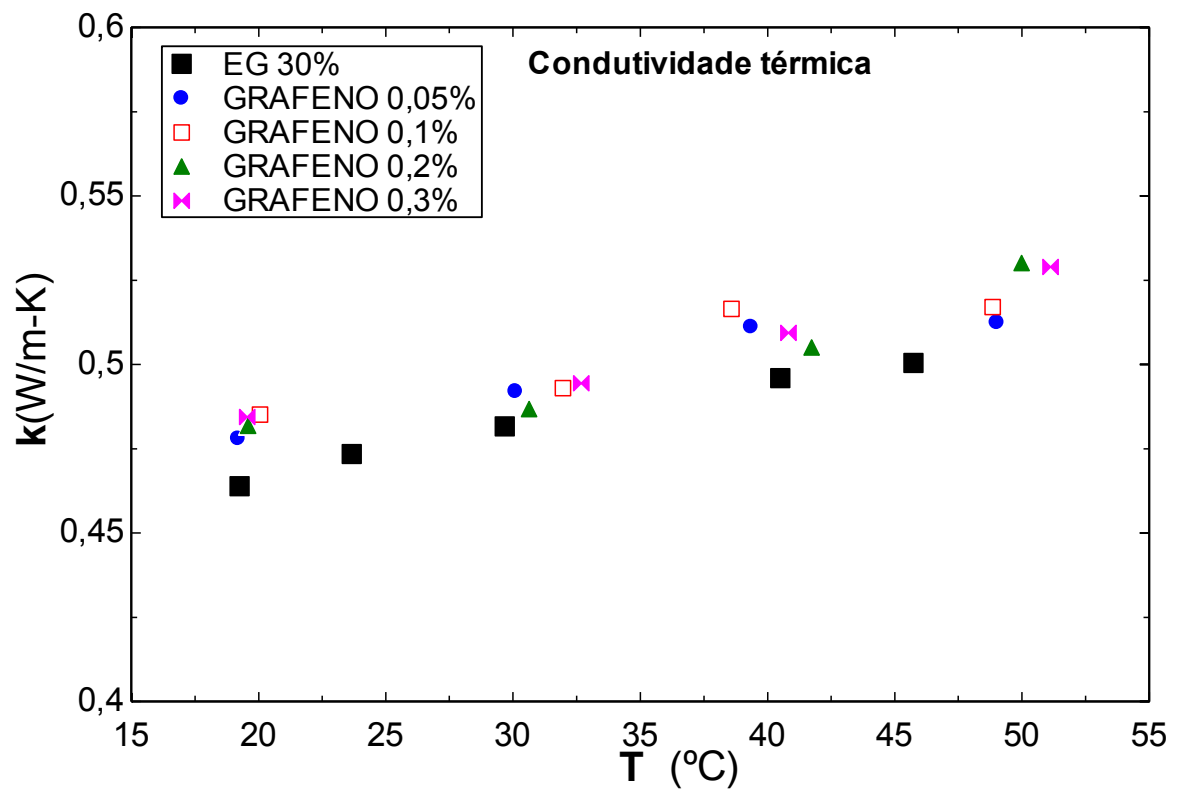


Figura 4.14 – Condutividade térmica dos nanofluidos de grafeno.

4.3. Desempenho dos nanofluidos nos radiadores

O desempenho térmico dos nanofluidos nos radiadores automotivos foi analisado em termos dos seguintes parâmetros:

- Taxa de transferência de calor obtidas para cada nanofluido;
- Condutância térmica;
- Coeficiente de transferência de calor (h) no lado do líquido;
- Potência de bombeamento.

Os gráficos que ilustram o gradiente de temperatura do líquido em todos os testes estão apresentados no Anexo 2.

4.3.1. Radiador 1

As Figuras 4.15 a 4.22 ilustram o desempenho dos nanofluidos MWCNT/água nos testes realizados com o radiador 1 (PALIO). Pode-se observar na Fig. 4.15 que o nanofluido de concentração 0,05% obteve desempenho próximo ao do fluido base nos testes com temperatura de entrada 50°C. Os nanofluidos de concentração 0,08% e 0,16% apresentaram decrementos de até 8,8 e 15,5%, respectivamente, no valor de \dot{Q} . A queda no desempenho dos nanofluidos possivelmente se deve à utilização de água como fluido base, a qual é um fluido de elevada condutividade térmica e eficiência nesta faixa de temperatura. Os ganhos percentuais são apresentados na Tab. 4.2.

Tabela 4.2 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 50°C (radiador 1), para os nanofluidos MWCNT/água.

ϕ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{água}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{água}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{água}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{água}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{água}}}$ (%)
0	30	1,00	-	40	1,39	-	50	1,78	-	60	2,14	-	70	2,49	-
0,05	30	0,97	-2,9	40	1,37	-1,4	50	1,76	-1,1	60	2,17	1,6	70	2,49	0,0
0,08	30	0,91	-8,8	40	1,30	-6,7	50	1,69	-5,3	60	2,01	-5,8	70	2,37	-4,7
0,16	30	0,84	-15,5	40	1,20	-13,9	50	1,59	-10,9	60	1,96	-8,4	70	2,30	-7,8

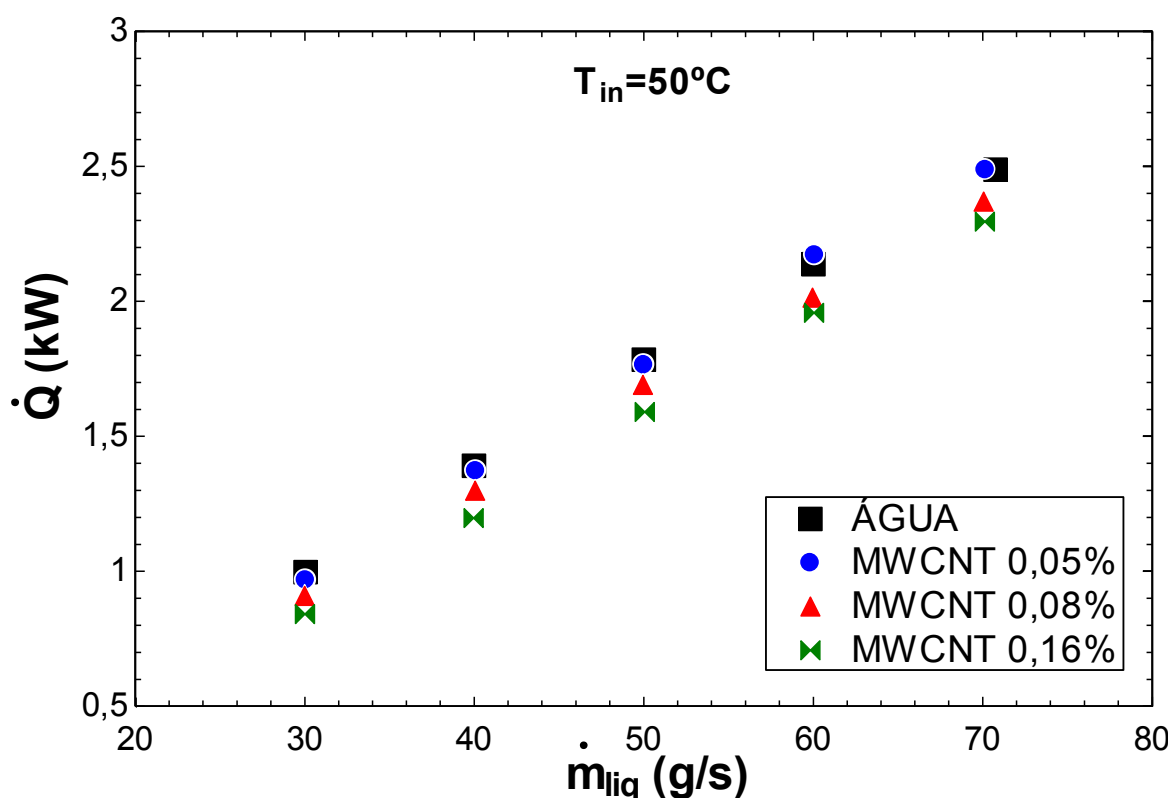


Figura 4.15 – Taxa de transferência de calor para os nanofluidos de MWCNT/água, para temperatura de entrada no radiador 50°C

Na condição de temperatura de entrada 60°C, Fig. 4.16, os nanofluidos apresentaram desempenho, geralmente, decrescente ao incrementar-se a concentração de nanopartículas. A máxima perda na taxa de transferência de calor ocorreu para a vazão 40 g/s, este decremento foi 16% para o nanofluido de concentração 0,16%. Estes decrementos são apresentados na Tab. 4.3. A taxa de transferência de calor relativa para os nanofluidos foi inferior, comparado aos testes com temperatura de entrada 50°C.

Tabela 4.3 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 60°C (radiador 1), para os nanofluidos MWCNT/água.

ϕ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{relativo}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{relativo}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{relativo}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{relativo}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{relativo}}}$ (%)
0	30	1,53		40	2,18		50	2,74		60	3,30		70	3,59	-
0,05	30	1,45	-5,1	40	2,08	-4,6	50	2,72	-0,7	60	3,19	-3,2	70	3,59	-
0,08	30	1,43	-6,6	40	1,98	-9,2	50	2,54	-7,3	60	3,51	6,6	70	3,49	-
0,16	30	1,33	-13,0	40	1,83	-16,0	50	2,36	-13,8	60	2,86	-13,3	70	3,31	-

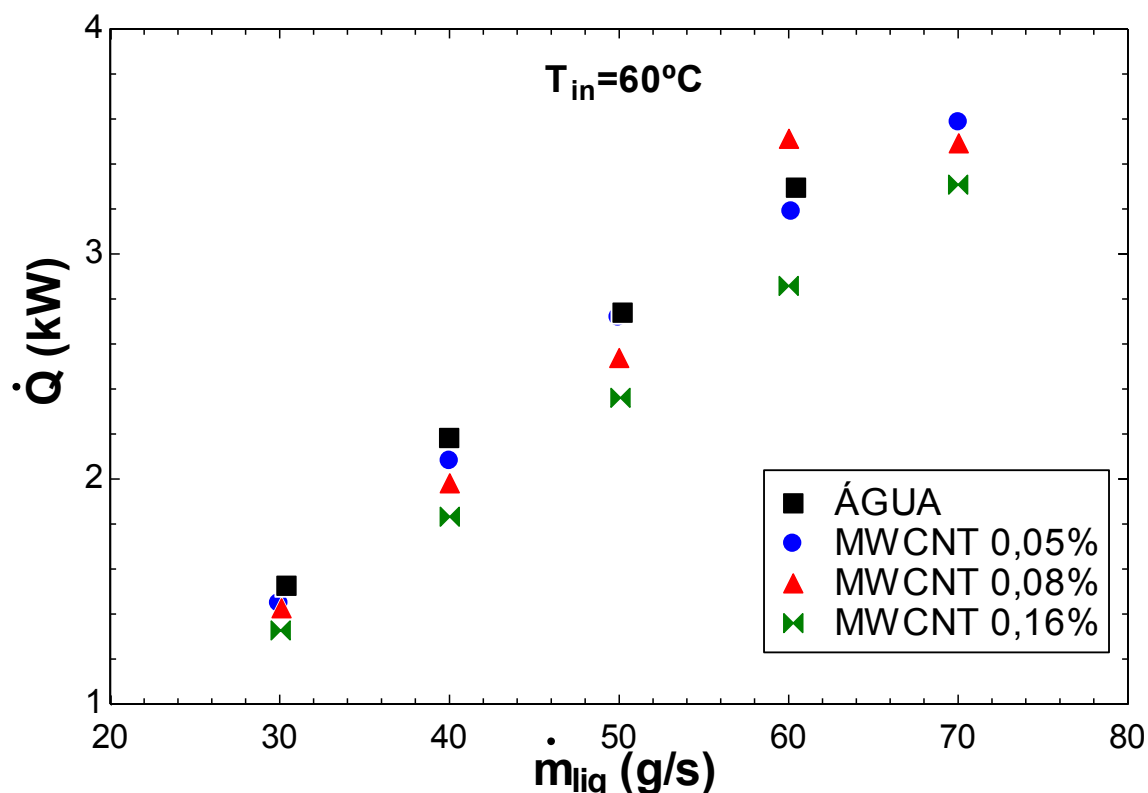


Figura 4.16 – Taxa de transferência de calor para os nanofluidos de MWCNT/água, para temperatura de entrada no radiador 60°C

Para os testes com temperatura de entrada 70°C, Fig. 4.17, os nanofluidos de concentração 0,05 e 0,08% apresentaram ligeiros decrementos no valor de \dot{Q} , os quais apresentaram um decréscimo máximo de 6,3% no valor de \dot{Q} à uma vazão 30 g/s. Já o nanofluido de concentração 0,16% apresentou um decremento de 22,2% no valor de \dot{Q} para a vazão 30 g/s. Para as 3 concentrações o decréscimo percentual relativo ao fluido base diminuiu com o incremento da vazão mássica, como ilustrado na Tab. 4.4. De forma geral, o desempenho dos nanofluidos relativo ao fluido base piorou comparado aos ensaios com temperatura de entrada 60°C

Tabela 4.4 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 70°C (radiador 1), para os nanofluidos MWCNT/água.

ϕ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{base}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{base}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{base}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{base}}}$ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{base}}}$ (%)
0	30	2,17		40	2,85		50	3,60		60	4,26		70	4,83	
0,05	30	2,08	-4,2	40	2,79	-2,1	50	3,49	-3,1	60	4,13	-3,0	70	4,76	-1,5
0,08	30	2,03	-6,3	40	2,70	-5,1	50	3,42	-5,1	60	4,08	-4,3	70	4,61	-4,5
0,16	30	1,69	-22,2	40	2,34	-17,7	50	3,18	-11,8	60	3,83	-10,1	70	4,45	-7,9

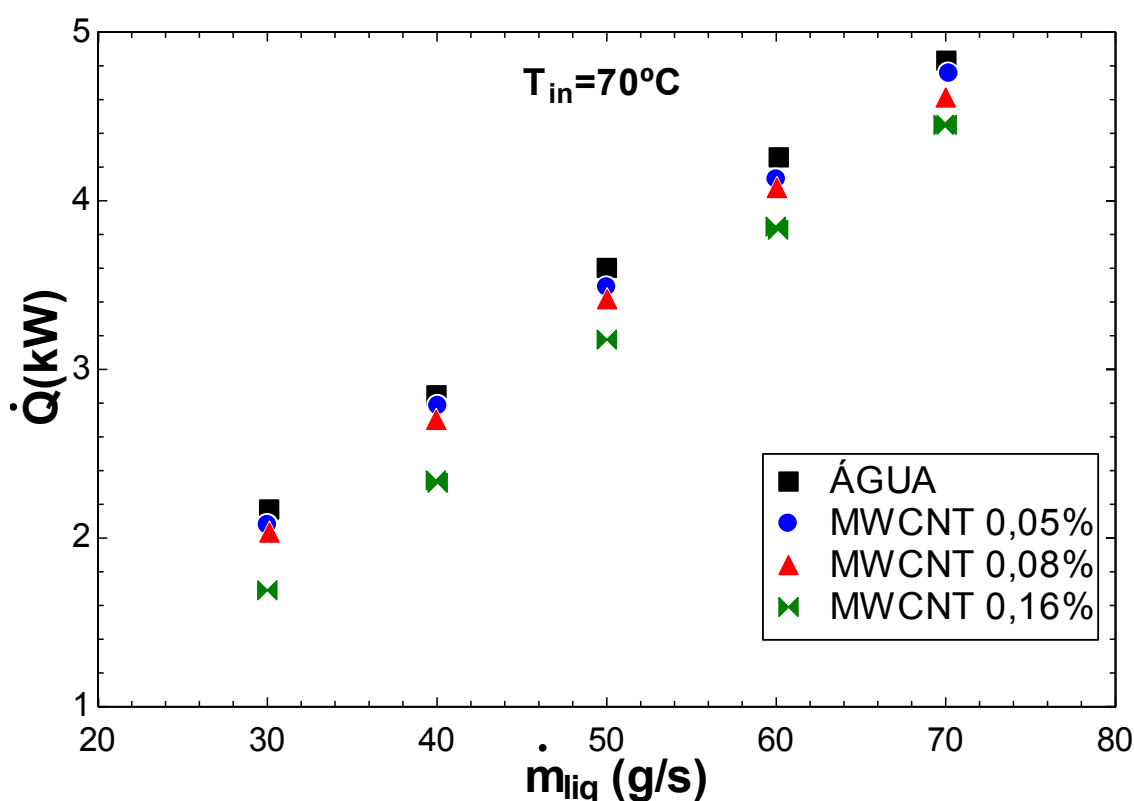


Figura 4.17 – Taxa de transferência de calor para os nanofluidos de MWCNT/água, para temperatura de entrada no radiador 70°C

Por fim, para os testes com temperatura de entrada 80°C, os nanofluidos de concentração 0,05 e 0,08% apresentaram valores de \dot{Q} mais próximos aos da água pura, como apresentado na Fig. 4.18. Observa-se um decréscimo máximo de 4,6% à vazão 60 g/s. Já o nanofluido de concentração 0,16% apresentou decréscimos mais elevados, de até 17,1%. O desempenho relativo dos nanofluidos foi ligeiramente superior comparado aos ensaios com entrada à 70°C, porém, para a maior concentração analisada, esse desempenho ainda foi significativamente inferior ao fluido base. Os decrementos são apresentados na Tab. 4.5.

Tabela 4.5 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 80°C (radiador 1), para os nanofluidos MWCNT/água.

ϕ (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{m} (g/s)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)
0	30	2,81		40	3,65		50	4,48		60	5,41		70	6,09	
0,05	30	2,87	1,9	40	3,57	-2,2	50	4,44	-0,8	60	5,28	-2,4	70	5,98	-1,8
0,08	30	2,72	-3,3	40	3,51	-3,7	50	4,33	-3,4	60	5,16	-4,6	70	5,94	-2,4
0,16	30	2,33	-17,1	40	3,09	-15,3	50	3,93	-12,2	60	4,89	-9,6	70	5,64	-7,3

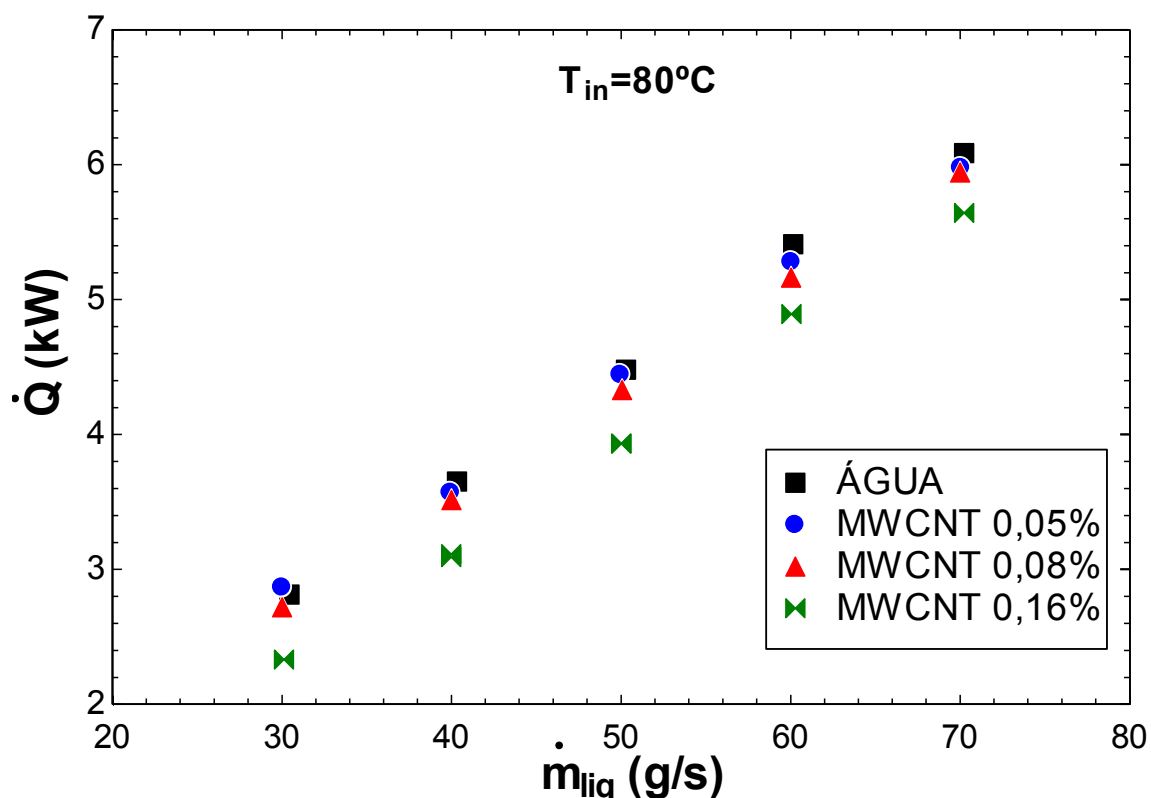


Figura 4.18 – Taxa de transferência de calor para os nanofluidos de MWCNT/água, para temperatura de entrada no radiador 80°C

Os valores obtidos para a condutância térmica (UA) do radiador 1 reforçam a ideia que os nanofluidos de MWCNT baseados em água pioraram o desempenho de transferência de calor, comparado com a água pura, além disso, o desempenho dos nanofluidos foi decrescente ao aumentar-se a concentração de nanopartículas. O desempenho relativo dos nanofluidos também se mostrou, de forma geral, decrescente com a temperatura de entrada, fato que sugere uma degradação dos nanofluidos em elevadas temperaturas. Além disso, destaca-se que a viscosidade relativa dos nanofluidos foi crescente com a temperatura, o que pode ter contribuído para esta queda no desempenho.

Todos os nanofluidos apresentaram condutância térmica inferior ao fluido base nos testes à 50°C, como pode ser observado na Fig. 4.19. Como a área do radiador é constante para todos os testes optou-se por apresentar os resultados na forma de condutância térmica (UA). Uma tendência similar à observada na Fig. 4.19 pode ser constatada nos testes com temperatura de entrada 60, 70 e 80°C, ilustrados nas Fig. 4.20, Fig. 4.21 e Fig. 4.22. A diferença entre o valor de U obtido para a água e o valor obtido para o nanofluido foi praticamente constante para cada concentração, mesmo variando a vazão mássica de líquido, indicando que a perda relativa neste parâmetro foi decrescente com o incremento da vazão de nanofluido.

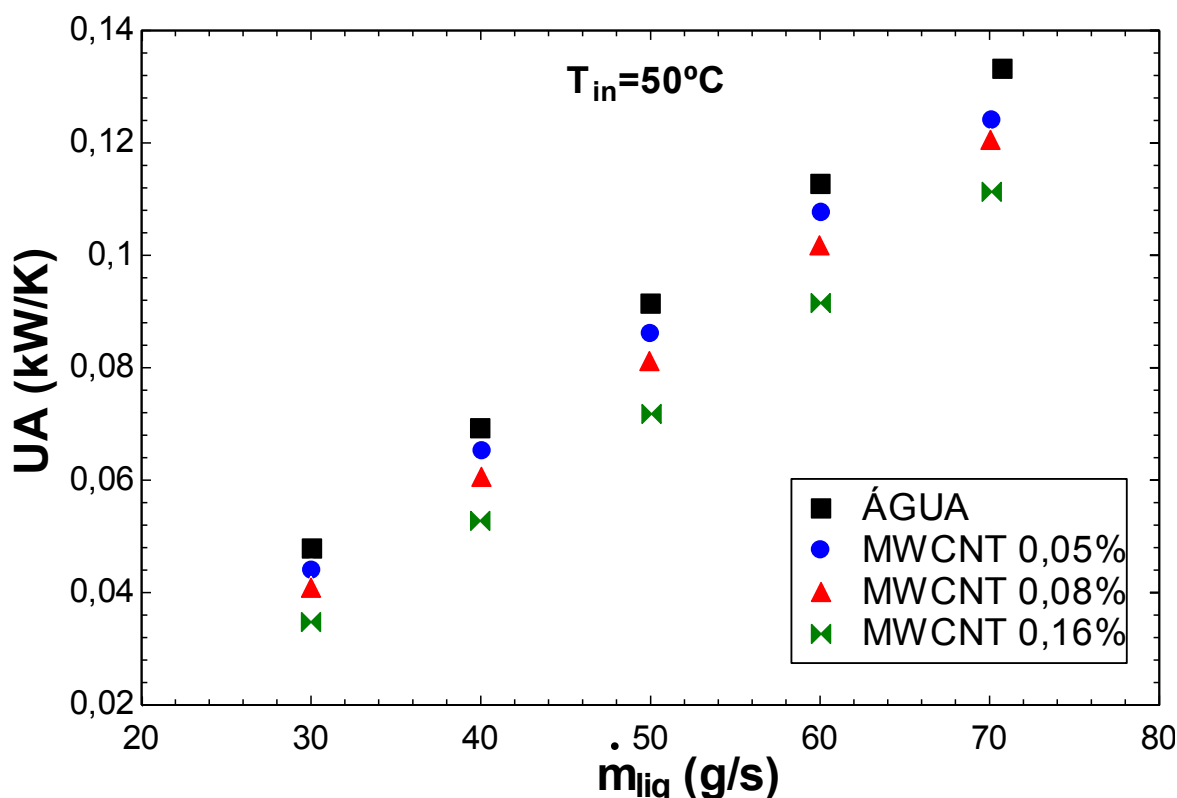


Figura 4.19 – Condutância térmica para os nanofluidos MWCNT/água nos testes com temperatura de entrada 50°C

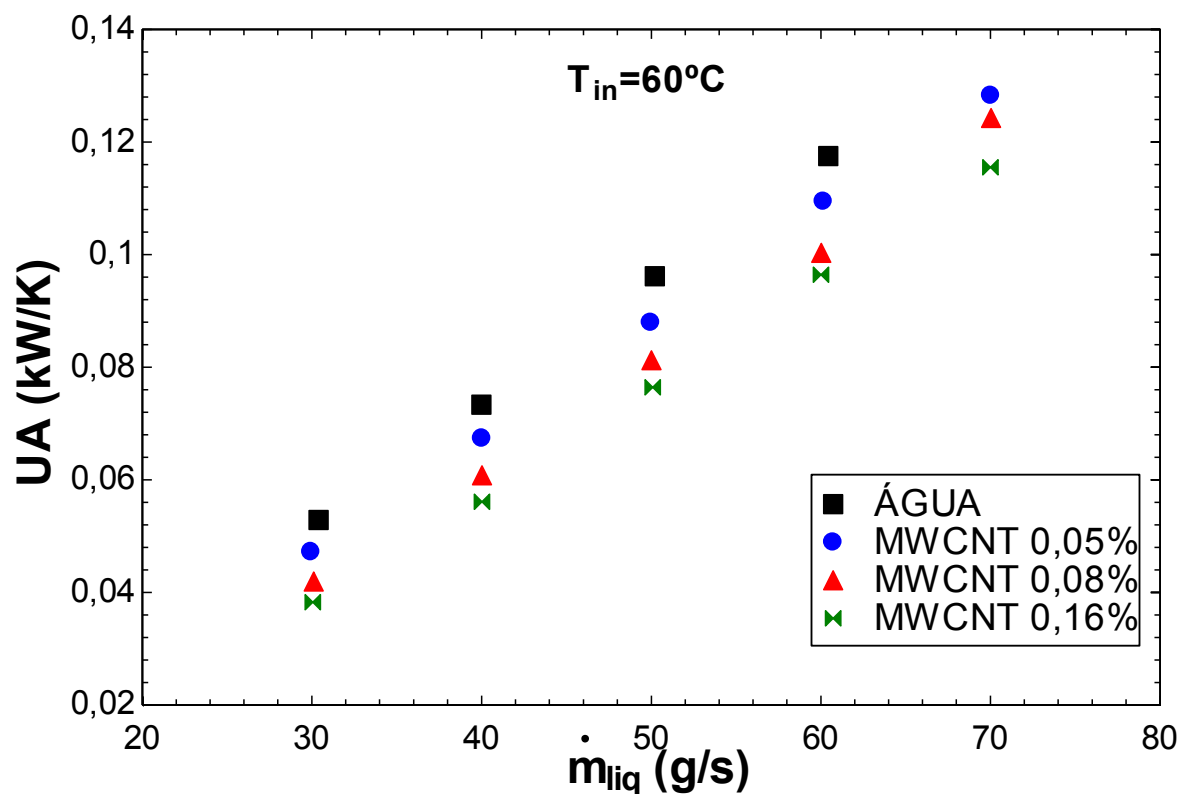


Figura 4.20 – Condutância térmica para os nanofluidos MWCNT/água nos testes com temperatura de entrada 60°C

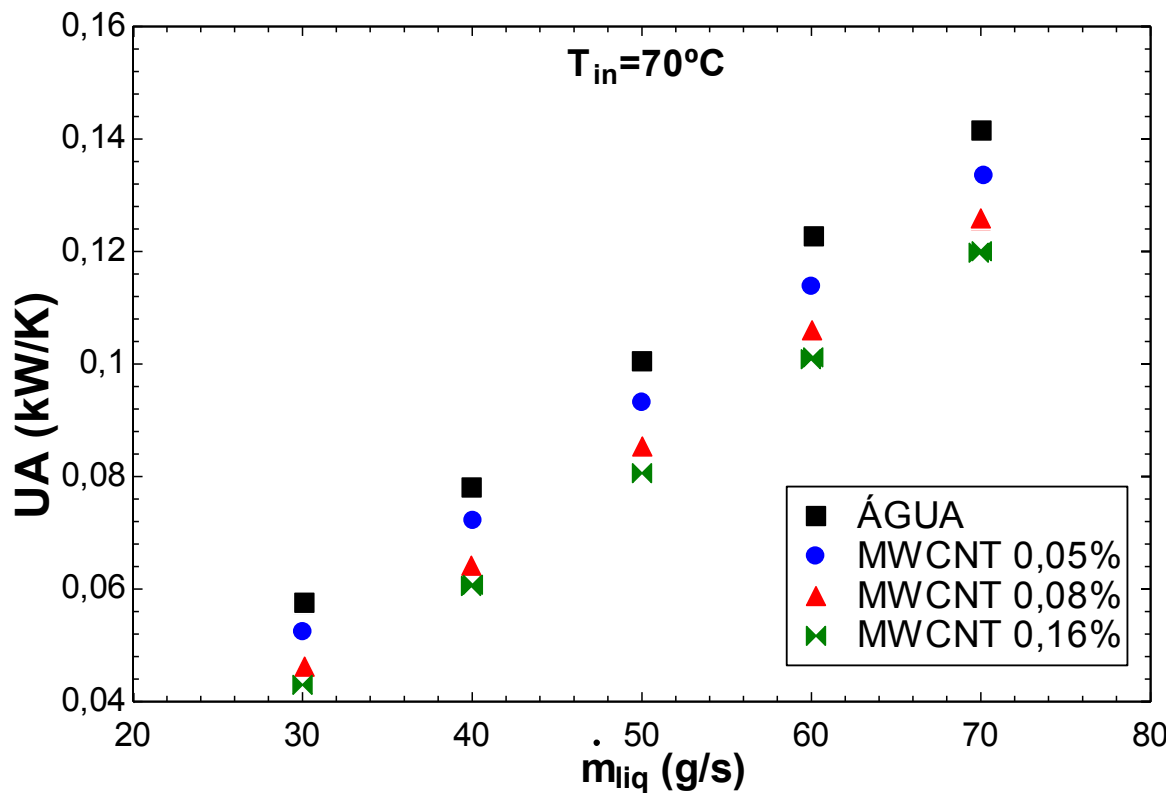


Figura 4.21 – Condutância térmica para os nanofluidos MWCNT/água nos testes com temperatura de entrada 70°C

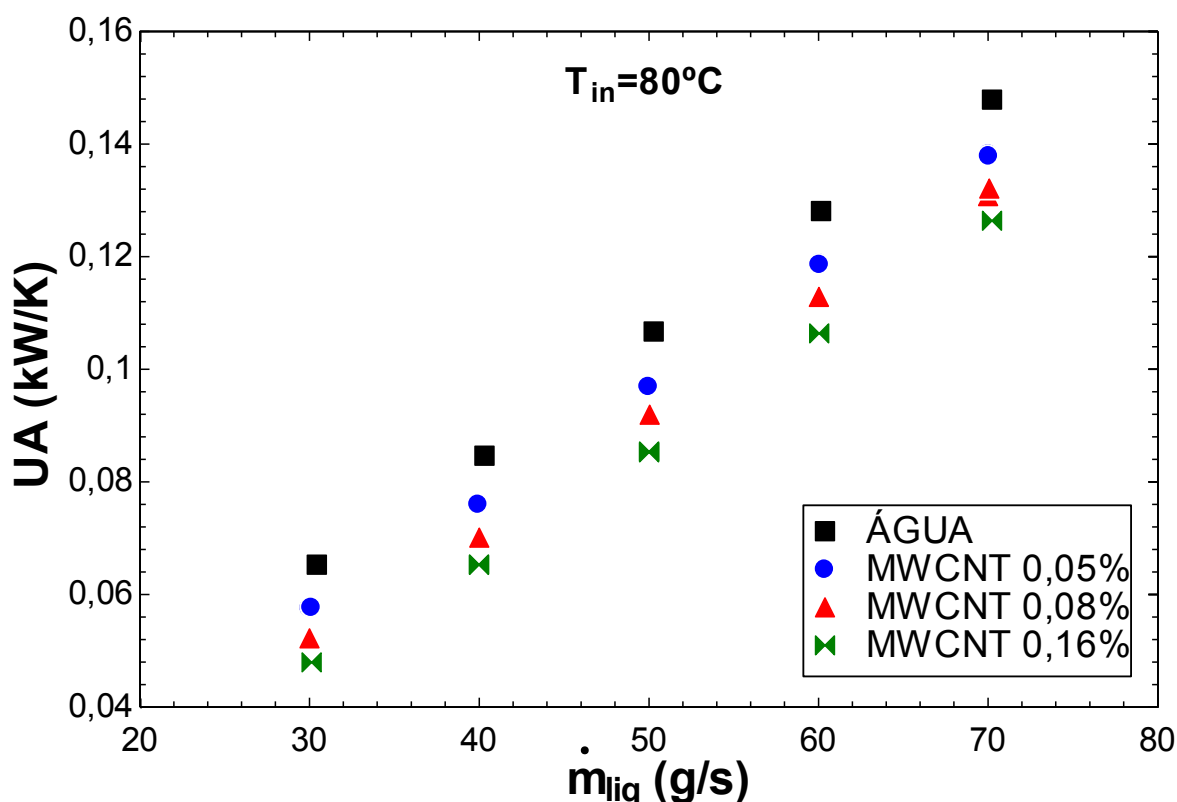


Figura 4.22 – Condutância térmica para os nanofluidos MWCNT/água nos testes com temperatura de entrada 80°C

4.3.2. Radiador 2

De forma análoga à realizada para o radiador 1, a análise seguinte representa os parâmetros de transferência de calor com relação ao radiador 2, no qual foram ensaiados nanofluidos baseados em EG30%. As Figs. 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26 mostram a taxa de transferência de calor no radiador utilizando EG30% e nanofluidos compostos por nanotubos de carbono (MWCNT), para temperaturas de entrada do líquido de 50, 60, 70 e 80°C, enquanto as Figs. 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30 apresentam resultados para o valor de \dot{Q} obtido para os nanofluidos de grafeno.

Nas figuras 4.31 a 4.38 são apresentados os resultados para a condutância térmica para os nanofluidos de MWCNT e grafeno, para todas as condições de testes. Já nas figuras 4.39 a 4.46 são ilustrados os coeficientes de transferência de calor no lado do líquido.

Pode-se observar que para a temperatura de entrada 50°C, Fig. 4.23, os nanofluidos MWCNT/EG30% obtiveram um desempenho superior ao do fluido base para as concentrações 0,05, 0,2 e 0,3%, sendo o incremento máximo de 7% para a concentração 0,2%, na vazão mássica 70 g/s. O nanofluido de concentração 0,1% foi o de pior desempenho, desempenho que se manteve para as demais condições de testes. Em geral, os resultados obtidos para esta condição indicaram menores incrementos na taxa de transferência de calor dos nanofluidos diminuiu ao aumentar-se a vazão mássica, como apresentado na Tab. 4.6.

Tabela 4.6 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 50°C (radiador 2), para os nanofluidos MWCNT/EG30%.

Vazão	$\dot{m}=70\text{ g/s}$		$\dot{m}=80\text{ g/s}$		$\dot{m}=90\text{ g/s}$		$\dot{m}=100\text{ g/s}$		$\dot{m}=110\text{ g/s}$		$\dot{m}=120\text{ g/s}$		$\dot{m}=130\text{ g/s}$	
Φ (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)
0	2,32	-	2,48	-	2,56	-	2,71	-	2,79	-	2,88	-	2,96	-
0,05	2,48	7,0	2,55	3,1	2,63	3,1	2,71	-0,1	2,87	2,8	2,95	2,6	3,03	2,5
0,1	2,40	3,7	2,48	0,2	2,56	0,2	2,56	-5,7	2,80	0,3	2,80	-2,6	2,88	-2,5
0,2	2,48	7,0	2,64	6,5	2,71	6,2	2,87	5,9	2,95	5,7	2,95	2,7	3,03	2,6
0,3	2,40	3,7	2,56	3,4	2,64	3,4	2,72	0,2	2,88	3,1	2,88	0,1	3,04	2,8

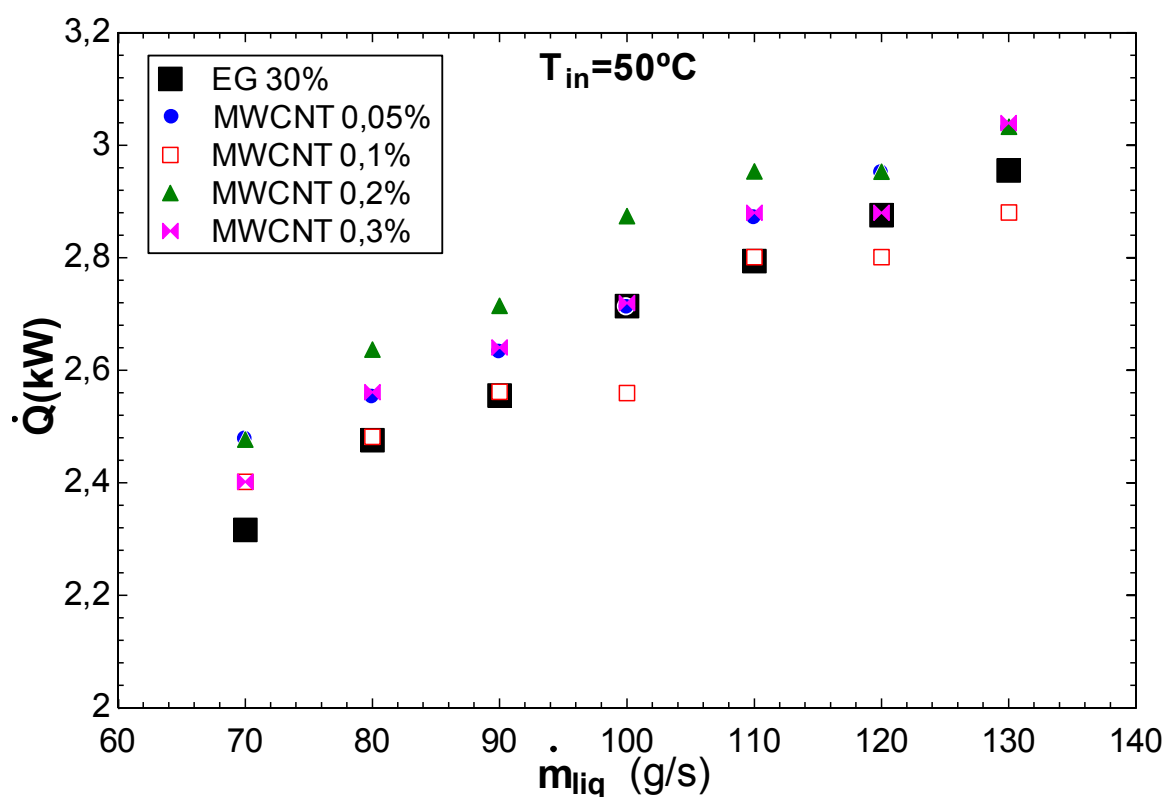


Figura 4.23 – Taxa de transferência de calor para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada no radiador 50°C

Nos testes com temperatura de entrada 60°C, resultados apresentados na Fig. 4.24, apenas o nanofluido com concentração 0,2% obteve taxa de transferência de calor superior à do fluido base, com incremento de até 4,5%. Os demais nanofluidos obtiveram desempenho muito semelhante ao do fluido base, conforme apresentado na Tab. 4.7. Esses resultados relativos foram inferiores aos de temperatura de entrada 50°C, o que sugere que da mesma forma que para os nanofluidos baseados em água, o desempenho dos nanofluidos baseados em EG30% também piora com a temperatura, fato que limitaria sua faixa de aplicação.

Tabela 4.7 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 60°C (radiador 2), para os nanofluidos MWCNT/EG30%.

Vazão	$\dot{m}=70$ g/s		$\dot{m}=80$ g/s		$\dot{m}=90$ g/s		$\dot{m}=100$ g/s		$\dot{m}=110$ g/s		$\dot{m}=120$ g/s		$\dot{m}=130$ g/s	
ϕ (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)
0	3,51	-	3,74	-	3,90	-	4,06	-	4,22	-	4,37	-	4,53	-
0,05	3,58	2,2	3,74	-0,1	3,90	-0,1	4,06	0,0	4,21	0,0	4,37	0,0	4,53	0,0
0,1	3,59	2,5	3,75	0,2	3,91	0,2	4,07	0,3	4,15	-1,6	4,31	-1,6	4,47	-1,5
0,2	3,66	4,5	3,90	4,1	4,06	4,1	4,22	3,9	4,30	1,9	4,45	1,8	4,61	1,8
0,3	3,51	0,2	3,75	0,2	3,91	0,2	4,07	0,2	4,15	-1,7	4,38	0,2	4,54	0,2

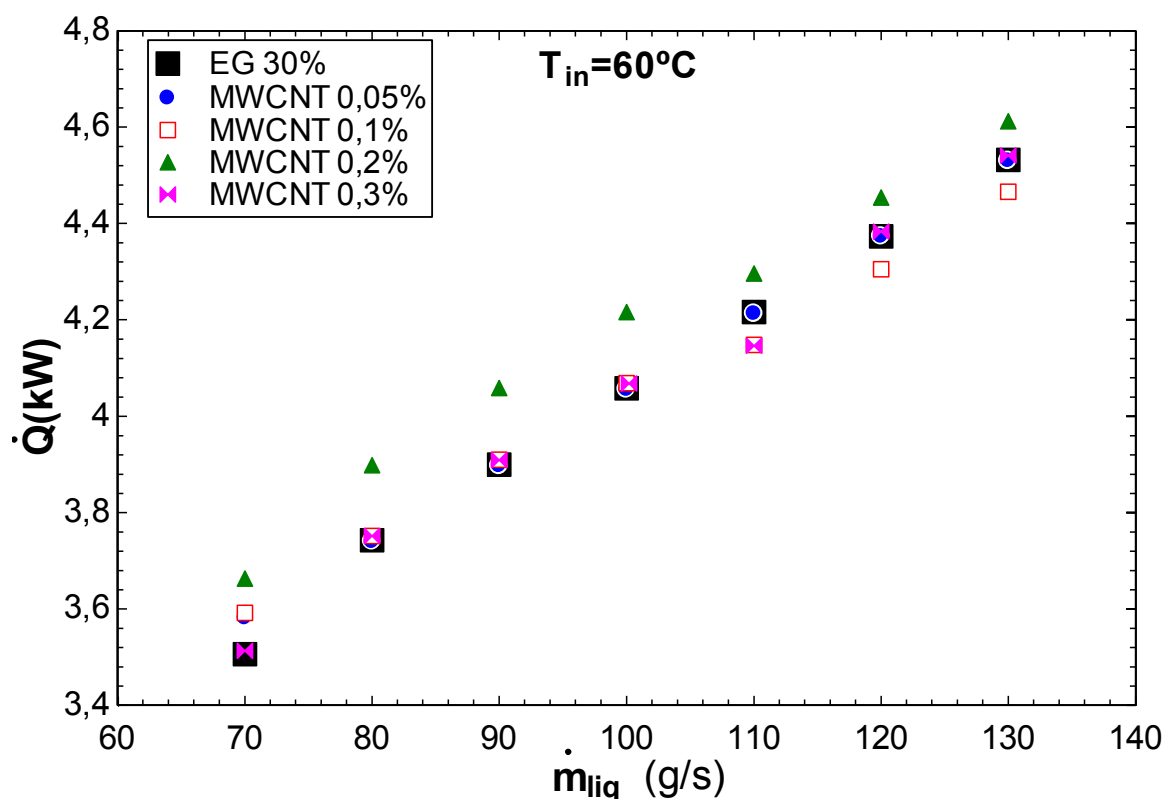


Figura 4.24 – Taxa de transferência de calor para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada no radiador 60°C

A taxa de transferência de calor nos testes com temperatura de entrada 70°C, para todos os nanofluidos MWCNT foi próxima à do fluido base, como ilustra a Fig. 4.25, de forma que o incremento máximo obtido foi 3%, encontrado para o nanofluido de concentração 0,2% na vazão 90 g/s, enquanto o nanofluido 0,3% obteve um decremento máximo 2,9% no calor removido. Porém estas diferenças relativas ao fluido base não foram significativas, e indicam que nesta faixa de concentração e temperatura o desempenho do fluido base e dos nanofluidos são semelhantes. Estes incrementos estão apresentados na Tab. 4.8.

Tabela 4.8 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 70°C (radiador 2), para os nanofluidos MWCNT/EG30%.

vazão	$\dot{m}=70$ g/s		$\dot{m}=80$ g/s		$\dot{m}=90$ g/s		$\dot{m}=100$ g/s		$\dot{m}=110$ g/s		$\dot{m}=120$ g/s		$\dot{m}=130$ g/s	
ϕ (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)
0	4,92		5,16		5,31		5,55		5,79		6,02		6,18	
0,05	4,84	-1,7	5,08	-1,6	5,39	1,4	5,55	-0,1	5,78	-0,1	5,94	-1,3	6,18	0,0
0,1	4,92	0,0	5,15	-0,1	5,32	0,1	5,55	-0,1	5,71	-1,4	5,86	-2,6	6,10	-1,3
0,2	5,00	1,6	5,24	1,5	5,47	3,0	5,63	1,4	5,79	0,0	6,02	0,0	6,26	1,3
0,3	4,78	-2,9	5,02	-2,7	5,33	0,3	5,49	-1,1	5,65	-2,5	5,88	-2,3	6,04	-2,3

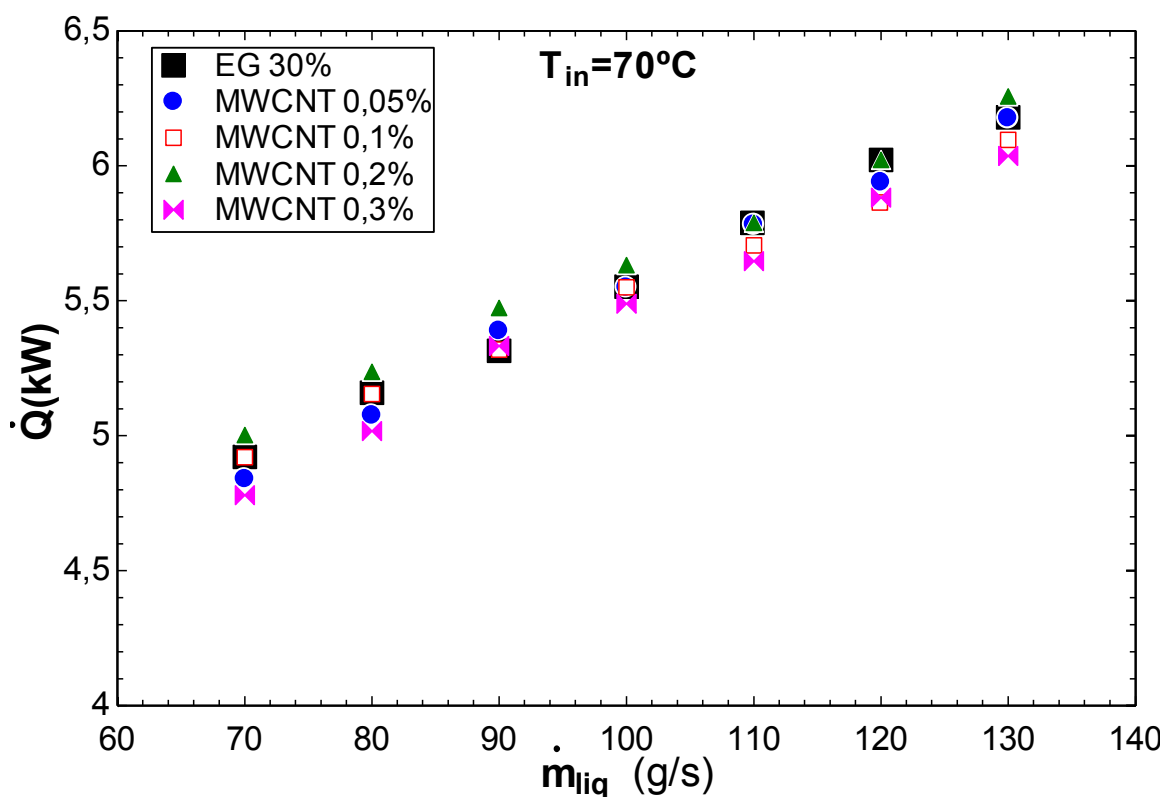


Figura 4.25 – Taxa de transferência de calor para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada no radiador 70°C.

Para a temperatura de entrada 80°C, foi obtida uma tendência semelhante aos ensaios com 70°C, como apresentado na Fig. 4.26. O nanofluido MWCNT2 foi ligeiramente superior aos demais, porém com incrementos discretos no valor de \dot{Q} . Verifica-se uma queda no desempenho relativo dos nanofluidos para vazões mais elevadas. Para a vazão 130g/s, pode-se observar um decremento na taxa de transferência de calor de até 7,3%. Os decrementos percentuais podem ser visualizados na Tab. 4.9. Já para vazões menores o desempenho relativo foi superior, porém sem apresentar ganhos expressivos com relação ao fluido base.

Tabela 4.9 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 80°C (radiador 2), para os nanofluidos MWCNT/EG30%.

vazão	$\dot{m}=70$ g/s		$\dot{m}=80$ g/s		$\dot{m}=90$ g/s		$\dot{m}=100$ g/s		$\dot{m}=110$ g/s		$\dot{m}=120$ g/s		$\dot{m}=130$ g/s	
Φ (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)
0	6,18	-	6,49	-	6,80	-	7,11	-	7,42	-	7,73	-	8,12	-
0,05	6,21	0,5	6,53	0,6	6,83	0,5	7,04	-1,0	7,35	-1,0	7,66	-0,9	7,81	-3,8
0,1	6,26	1,3	6,49	0,0	6,72	-1,1	7,04	-1,0	6,90	-7,0	7,21	-6,7	7,53	-7,3
0,2	6,34	2,6	6,65	2,4	6,88	1,2	7,19	1,2	7,50	1,1	7,74	0,1	8,12	0,1
0,3	6,28	1,6	6,59	1,6	6,90	1,5	7,14	0,4	7,45	0,4	7,61	-1,6	7,84	-3,5

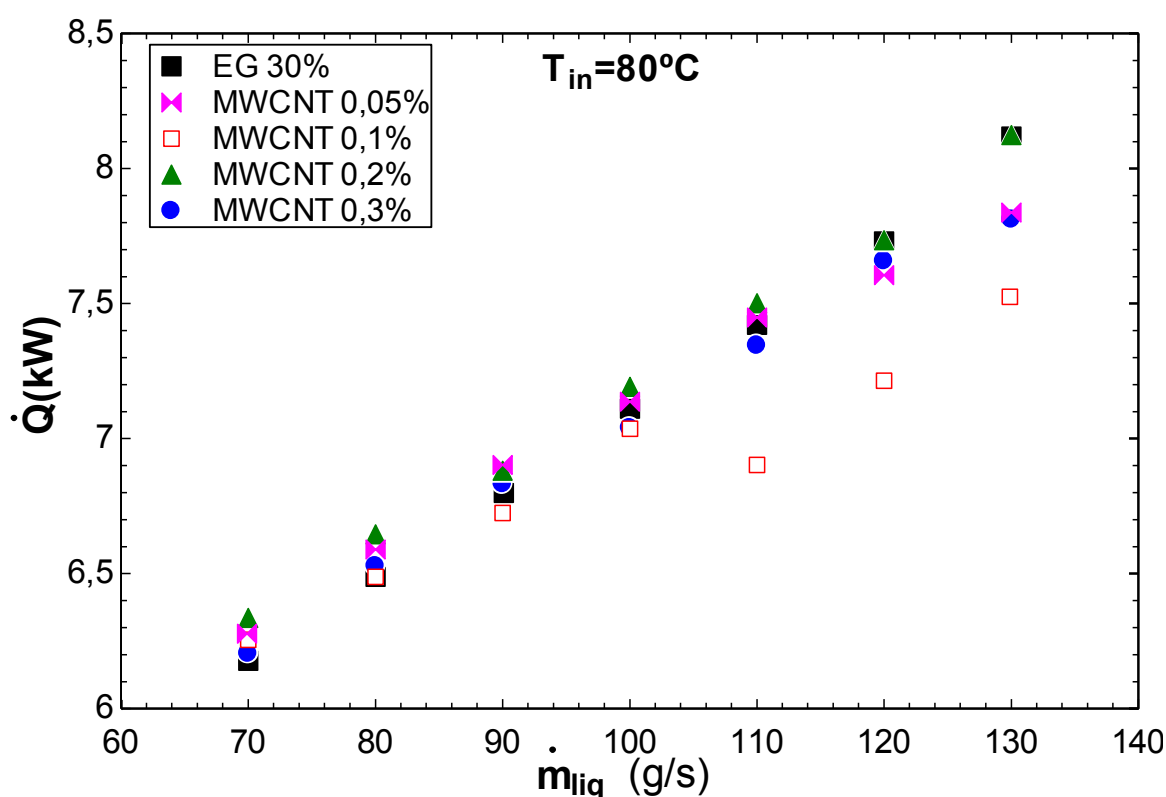


Figura 4.26 – Taxa de transferência de calor para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada no radiador 80°C.

As Figs. 4.27 a 4.30 apresentam a taxa de transferência de calor para os nanofluidos de grafeno. De forma geral o desempenho foi superior para as maiores concentrações analisadas. Nos testes com temperatura de entrada 50°C (Fig. 4.27), os nanofluidos mais concentrados, 0,2 e 0,3%, apresentaram incremento na transferência de calor, e o incremento máximo foi de 9,4% para a concentração 0,2% (vazão 90 g/s) e 7,1% para a concentração 0,3% (70 g/s). Por outro lado, os nanofluidos de concentração 0,05 e 0,1% apresentaram um decréscimo no valor de \dot{Q} , de até 7% para o nanofluido de concentração 0,1%. Estes percentuais podem ser visualizados na Tab. 4.10.

Tabela 4.10 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 50°C (radiador 2), para os nanofluidos GRAFENO/EG30%.

vazão	$\dot{m}=70$ g/s		$\dot{m}=80$ g/s		$\dot{m}=90$ g/s		$\dot{m}=100$ g/s		$\dot{m}=110$ g/s		$\dot{m}=120$ g/s		$\dot{m}=130$ g/s	
ϕ	\dot{Q}	\dot{Q} relativo	\dot{Q}	\dot{Q} relativo	\dot{Q}	\dot{Q} relativo	\dot{Q}	\dot{Q} relativo	\dot{Q}	\dot{Q} relativo	\dot{Q}	\dot{Q} relativo	\dot{Q}	\dot{Q} relativo
(%)	(kW)	(%)	(kW)	(%)	(kW)	(%)	(kW)	(%)	(kW)	(%)	(kW)	(%)	(kW)	(%)
0	2,32	-	2,48	-	2,56	-	2,71	-	2,79	-	2,88	-	2,96	-
0,05	2,15	-7,0	2,39	-3,4	2,55	-0,2	2,63	-3,1	2,79	-0,2	2,87	-0,2	2,95	-0,2
0,1	2,16	-6,8	2,40	-3,2	2,56	0,0	2,63	-2,9	2,71	-2,9	2,87	-0,1	2,87	-2,7
0,2	2,48	6,9	2,63	6,4	2,79	9,4	2,87	5,9	2,95	5,7	3,03	5,4	3,19	8,0
0,3	2,48	7,1	2,56	3,4	2,72	6,4	2,80	3,1	2,96	5,9	3,04	5,6	3,12	5,5

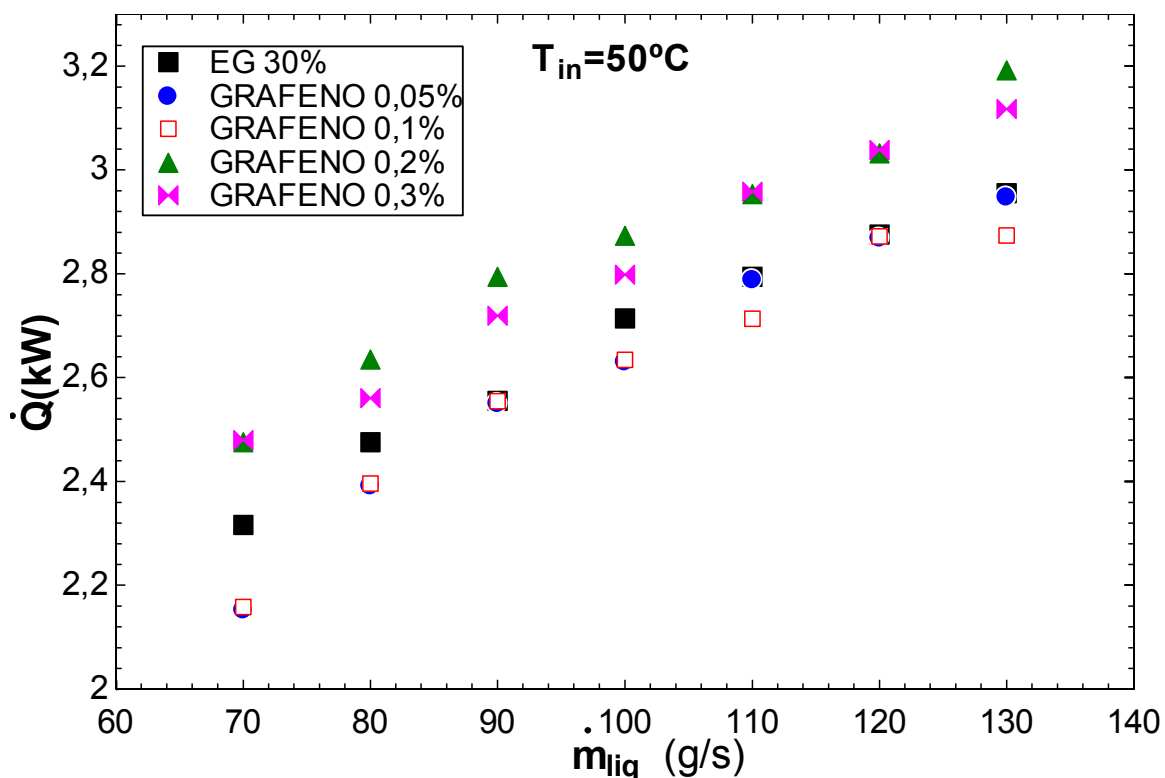


Figura 4.27– Taxa de transferência de calor para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada no radiador 50°C.

A fig. 4.28 mostra a taxa de transferência de calor para os nanofluidos de grafeno nos testes com temperatura de entrada 60°C. O desempenho dos nanofluidos GRF2 e GRF3 foi pior comparado aos testes com temperatura de entrada 50°C, visto os menores ganhos no valor de \dot{Q} , reforçando a tendência de queda no desempenho com a temperatura. Já os nanofluidos de concentração 0,1 e 0,05% apresentaram, assim como nos testes à 50°C decrementos na taxa de transferência de calor, neste caso com quedas ainda superiores, de até 6,9%. As taxas de transferência de calor relativas estão apresentadas na Tab. 4.11.

Tabela 4.11 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 60°C (radiador 2), para os nanofluidos GRAFENO/EG30%.

vazão	$\dot{m}=70$ g/s		$\dot{m}=80$ g/s		$\dot{m}=90$ g/s		$\dot{m}=100$ g/s		$\dot{m}=110$ g/s		$\dot{m}=120$ g/s		$\dot{m}=130$ g/s	
Φ (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)
0	3,51	-	3,74	-	3,90	-	4,06	-	4,22	-	4,37	-	4,53	-
0,05	3,26	-6,9	3,58	-4,4	3,74	-4,2	3,89	-4,0	4,13	-2,0	4,21	-3,8	4,29	-5,4
0,1	3,27	-6,7	3,51	-6,3	3,75	-3,9	3,91	-3,8	4,06	-3,6	4,22	-3,5	4,30	-5,1
0,2	3,59	2,3	3,75	0,1	3,90	0,1	4,06	0,1	4,14	-1,8	4,30	-1,7	4,46	-1,7
0,3	3,59	2,4	3,83	2,3	3,99	2,2	4,14	2,1	4,30	2,0	4,46	2,0	4,54	0,1

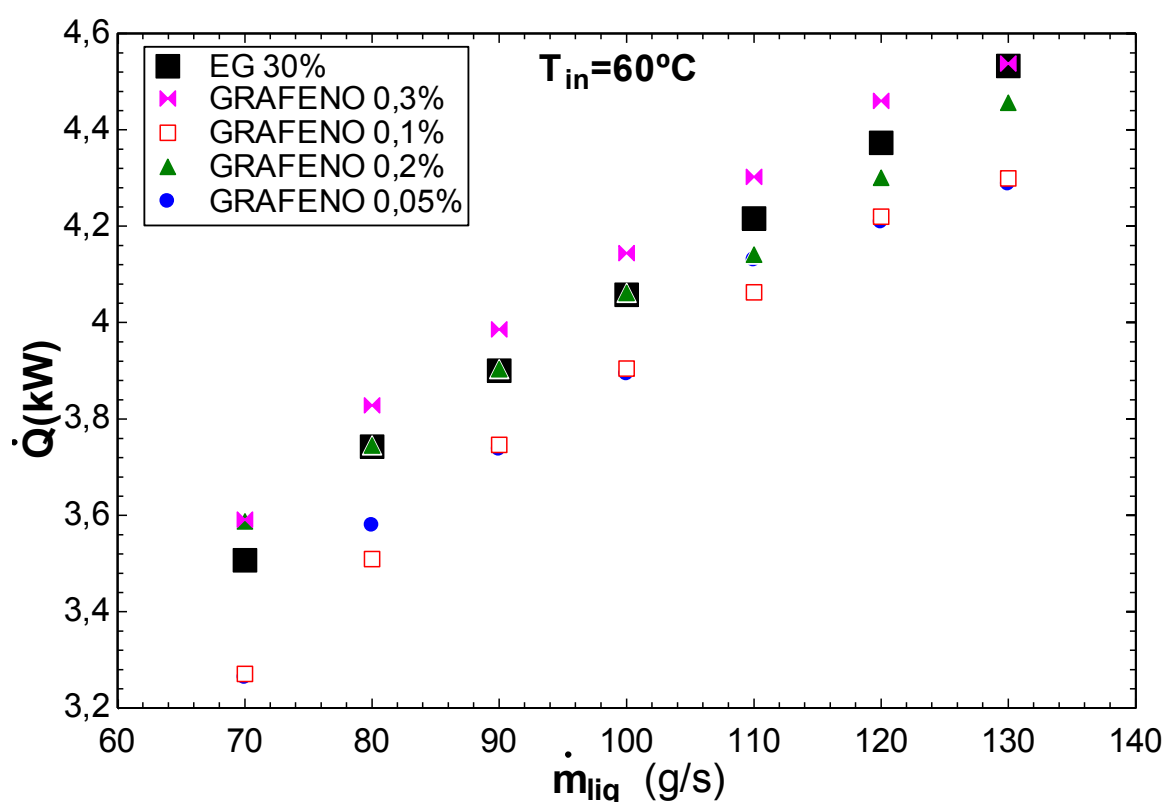


Figura 4.28– Taxa de transferência de calor para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada no radiador 60°C

Os nanofluidos de grafeno apresentaram diminuição no calor transferido em todas as condições com temperatura de entrada 70°C, o que pode ser verificado na Fig. 4.29. O desempenho relativo foi ainda pior comparado com os testes com entrada à 60°C. O nanofluido de concentração 0,3% apresentou os resultados mais próximos ao do fluido base, porém inferiores em até 1,4%, enquanto para as outras concentrações a perda de rendimento foi mais significativa, de até 9,7 e 9,5% para os nanofluidos de concentração 0,05% e 0,1%, respectivamente, para a vazão 70 g/s. Estes resultados podem ser visualizados na Tab. 4.12.

Tabela 4.12 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 70°C (radiador 2), para os nanofluidos GRAFENO/EG30%.

vazão	$\dot{m}=70$ g/s		$\dot{m}=80$ g/s		$\dot{m}=90$ g/s		$\dot{m}=100$ g/s		$\dot{m}=110$ g/s		$\dot{m}=120$ g/s		$\dot{m}=130$ g/s	
ϕ (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)
0	4,92	-	5,16	-	5,31	-	5,55	-	5,79	-	6,02	-	6,18	-
0,05	4,45	-9,7	4,76	-7,7	5,08	-4,5	5,31	-4,3	5,47	-5,5	5,70	-5,3	5,86	-5,2
0,1	4,46	-9,5	4,77	-7,5	4,93	-7,3	5,24	-5,6	5,40	-6,7	5,64	-6,4	5,79	-6,2
0,2	4,69	-4,7	4,93	-4,5	5,16	-2,8	5,40	-2,8	5,64	-2,6	5,79	-3,8	5,95	-3,8
0,3	4,85	-1,4	5,17	0,2	5,33	0,2	5,56	0,2	5,72	-1,2	5,95	-1,1	6,11	-1,1

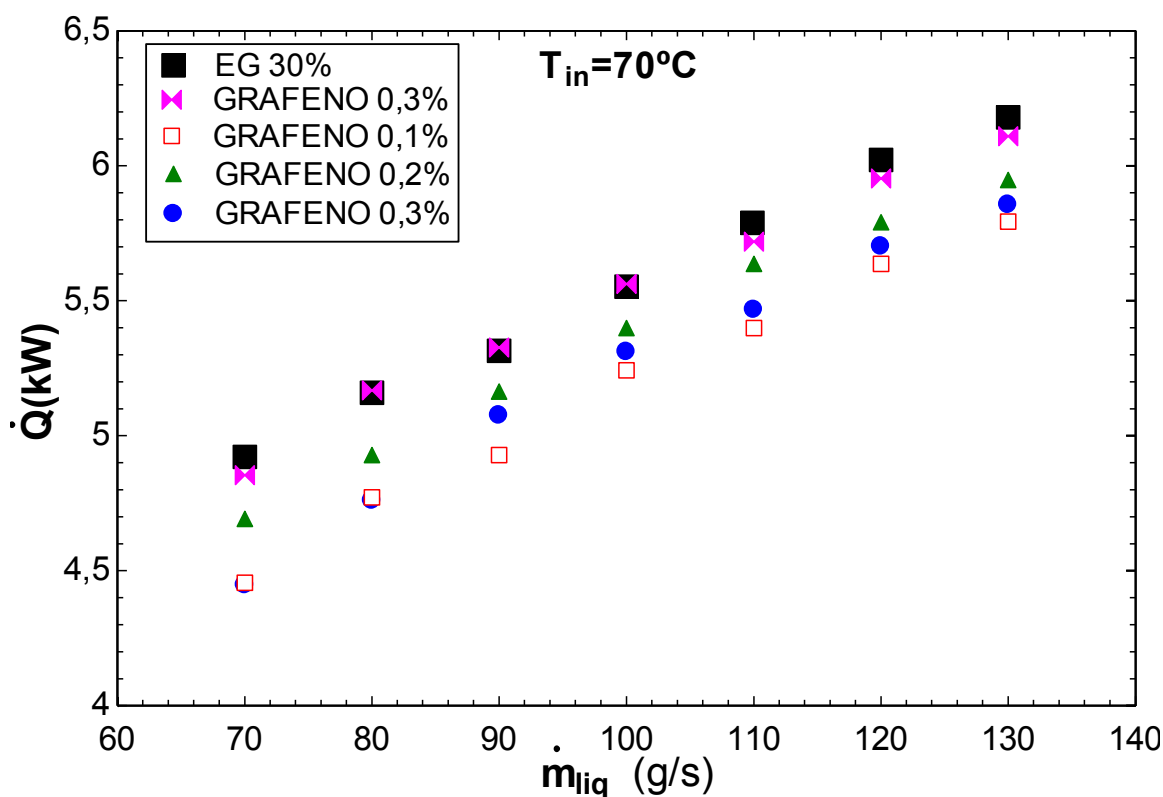


Figura 4.29 – Taxa de transferência de calor para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada no radiador 70°C

A Fig. 4.30 apresenta a taxa de transferência de calor para a temperatura de entrada do líquido 80°C. Assim como nos testes com temperatura de entrada 70°C, o nanofluido com concentração 0,3% foi o que mais se aproximou do fluido base, com diminuição na taxa de transferência de calor de até 2,6%, enquanto para os demais nanofluidos foram verificadas quedas na taxa de transferência de calor, de até 8%. Os valores relativos, nos testes à 80°C, foram próximos aos obtidos com temperatura de entrada 70°C. Estes resultados podem ser observados na Tab. 4.13.

Tabela 4.13 – Taxa de transferência de calor relativa nos ensaios com temperatura de entrada 80°C (radiador 2), para os nanofluidos GRAFENO/EG30%.

vazão ϕ (%)	$\dot{m}=70$ g/s		$\dot{m}=80$ g/s		$\dot{m}=90$ g/s		$\dot{m}=100$ g/s		$\dot{m}=110$ g/s		$\dot{m}=120$ g/s		$\dot{m}=130$ g/s	
	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)	\dot{Q} (kW)	\dot{Q} relativo (%)
0	6,18	-	6,5	-	6,8	-	7,11	-	7,42	-	7,7	-	8,1	-
0,05	5,71	-7,6	6,0	-7,2	6,4	-5,7	6,72	-5,5	6,95	-6,3	7,2	-7,0	7,5	-7,6
0,1	5,63	-8,8	6,0	-7,2	6,3	-6,8	6,57	-7,6	6,80	-8,4	7,1	-8,0	7,4	-8,5
0,2	5,95	-3,7	6,2	-4,7	6,5	-4,5	6,81	-4,3	7,04	-5,2	7,4	-5,0	7,7	-5,7
0,3	6,11	-1,1	6,5	0,2	6,8	0,3	7,05	-0,8	7,36	-0,8	7,6	-1,7	7,9	-2,6

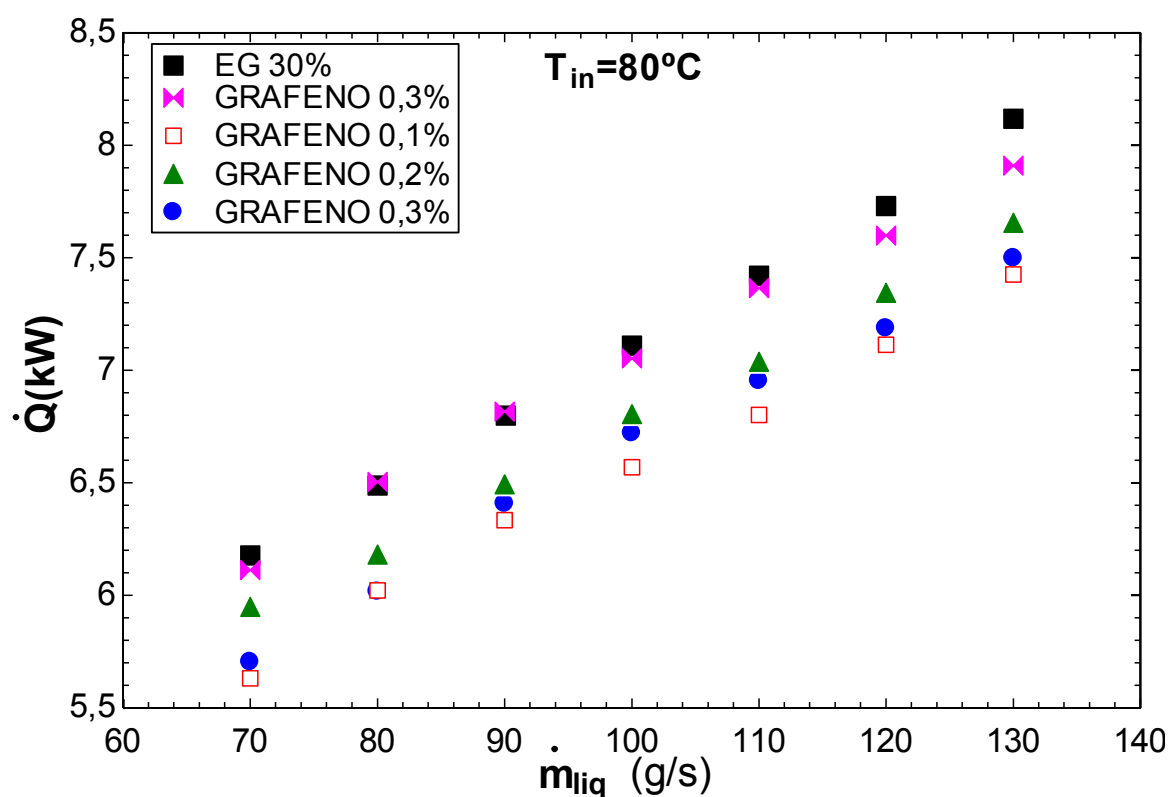


Figura 4.30 – Taxa de transferência de calor para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada no radiador 80°C.

De forma análoga à análise para o radiador 1, os próximos resultados apresentam a condutância térmica (UA), a qual permanece constante para todos os testes. As figuras 4.31 a 4.34 mostram o coeficiente UA para os nanofluidos de MWCNT, para as diversas condições de entrada. Os nanofluidos de concentração 0,05%, 0,2% e 0,3% apresentaram valores de UA superiores ao do fluido base para os testes com temperatura de entrada 50°C, enquanto apenas o nanofluido 0,1% apresentou UA menor, como mostrado na Fig. 4.31. Apenas nesta condição de entrada o nanofluido apresentou algum potencial de melhora significativa no desempenho do fluido base.

Já a Fig. 4.32 mostra os resultados para a condição de entrada 60°C, em que apenas o nanofluido 0,02% apresentou valores de UA ligeiramente superiores ao do EG30%, enquanto o nanofluido 0,05% apresentou valores praticamente iguais ao do fluido base. Os nanofluidos 0,1 e 0,3% obtiveram valores de UA inferiores ao do fluido base para esta condição de entrada.

Nos testes com temperatura de entrada 70°C, cujos resultados podem ser observados na Fig. 4.33, o nanofluido de concentração 0,2% obteve valores de UA próximos ao do fluido base. Já o nanofluido de concentração 0,05% obteve valores inferiores ao EG30% nas vazões 70 e 80 g/s, e valores próximos ao fluido base nas demais vazões analisadas. Os nanofluidos de concentração 0,1 e 0,3% apresentaram valores de UA cerca de 6% inferiores ao fluido base.

Para a temperatura de entrada 80°C, os nanofluidos de MWCNT apresentaram os resultados mais próximos do fluido base. Nas concentrações 0,05, 0,2 e 0,3%, para vazões inferiores à 100 g/s, os valores da condutância térmica foram muito próximos ao do EG30%. Para vazões superiores a 100 g/s, observa-se uma queda de rendimento destes nanofluidos, que se deve à uma mudança climática repentina na data de realização destes testes. O nanofluido de 0,1% concentração se mostrou ligeiramente menos eficiente que o fluido base em toda a faixa de vazões analisada. Estes resultados podem ser visualizados na Fig. 4.34.

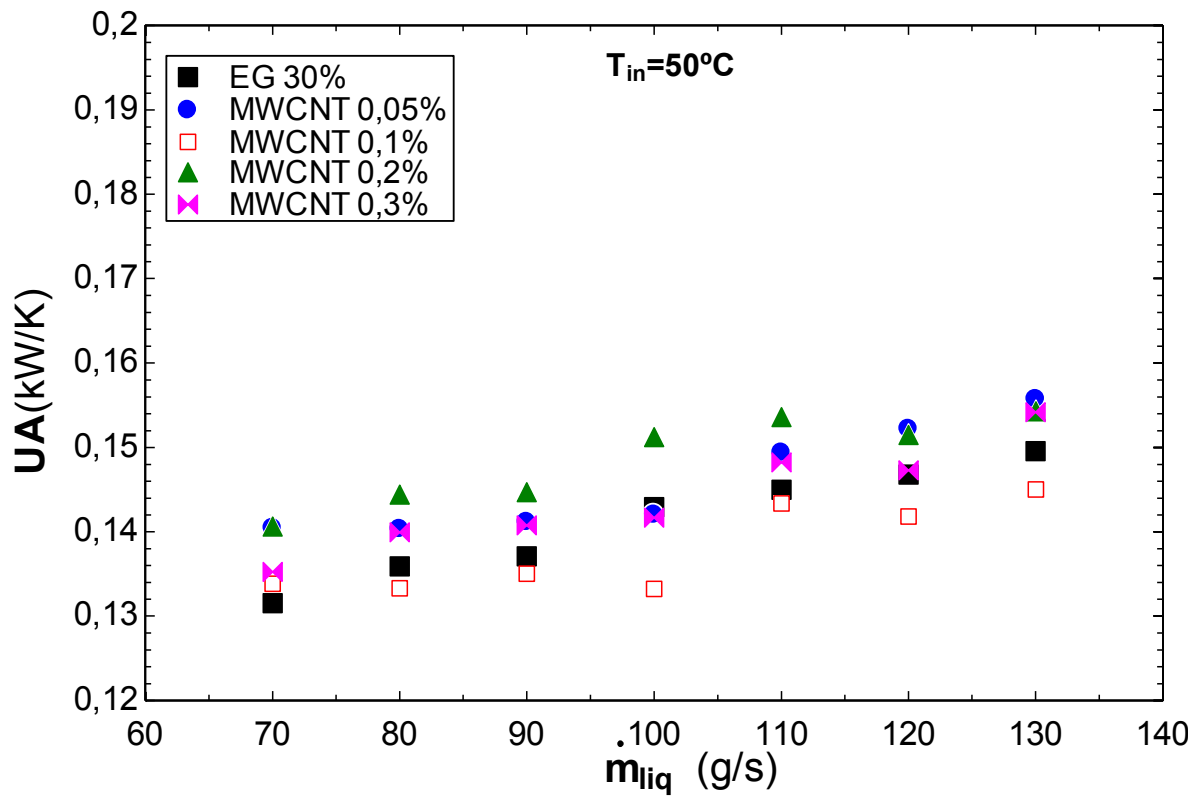


Figura 4.31 – Condutância térmica de para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada 50°C

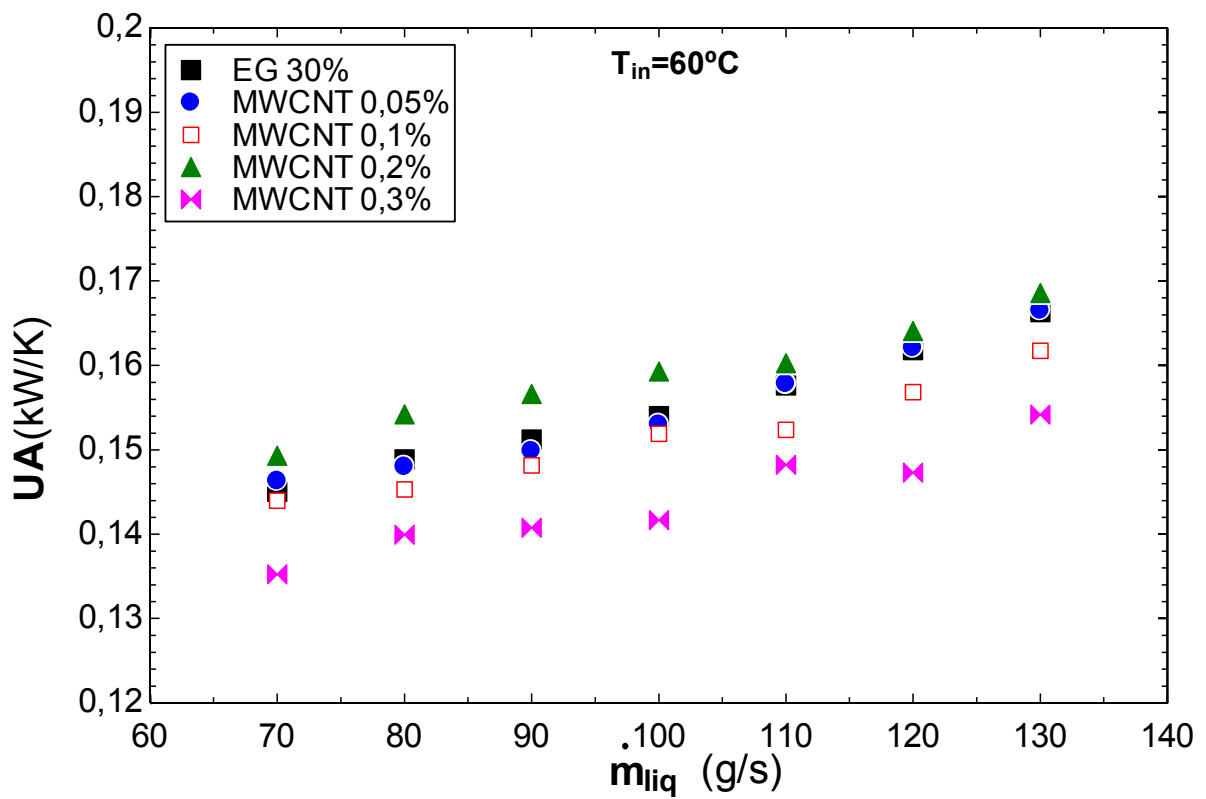


Figura 4.32– Condutância térmica para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada 60°C

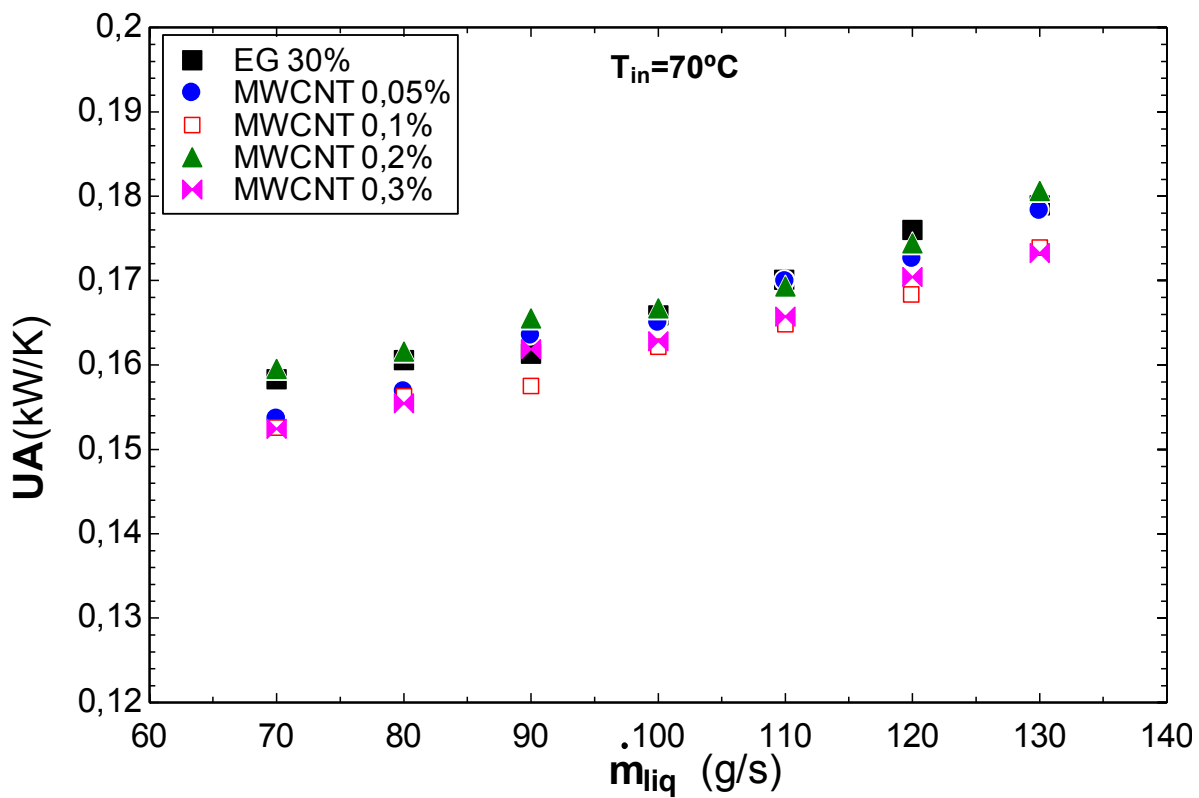


Figura 4.33 – Condutância térmica para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada $70^{\circ}C$

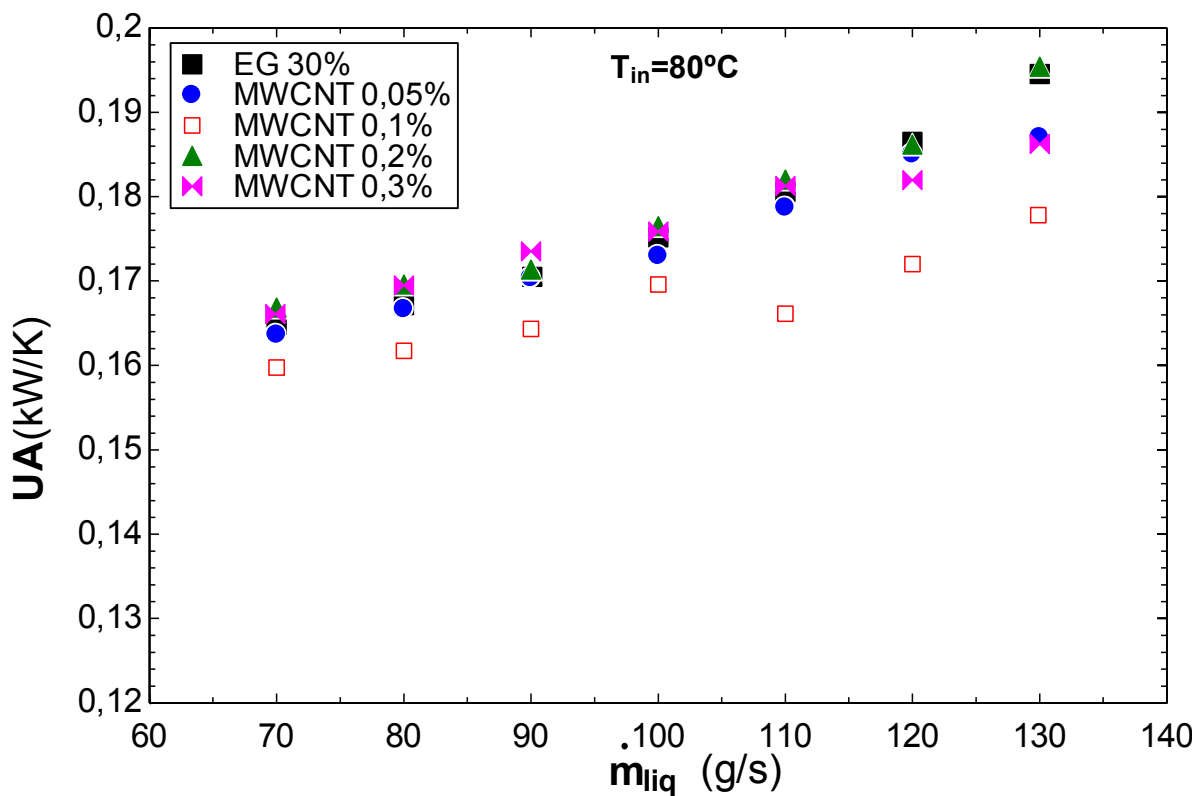


Figura 4.34 – Condutância térmica para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada $80^{\circ}C$

O desempenho dos nanofluidos de grafeno com relação a condutância térmica apresentou uma tendência na qual o nanofluido de concentração 0,3% apresentou melhor desempenho entre todas as concentrações testadas. Porém, este desempenho só foi superior ao do fluido base nos testes com temperatura de entrada 50°C e em algumas vazões nos testes com temperatura de entrada 60°C, como pode ser observado nas figuras 4.35 a 4.38.

A Fig. 4.35 apresenta o coeficiente UA para os nanofluidos de grafeno na condição de entrada a 50°C. Neste caso, os nanofluidos de concentração 0,2 e 0,3% obtiveram valores de UA superiores aos do fluido base. Os demais nanofluidos obtiveram desempenho inferior comparado ao EG30%. Já nos testes com temperatura de entrada 60°C, dados ilustrados na Fig. 4.36, os nanofluidos 0,05, 0,1 e 0,2% foram inferiores ao fluido base com relação aos valores de UA, enquanto o nanofluido 0,3% foi ligeiramente superior, com exceção do teste na maior vazão analisada, 130 g/s. Já para os testes com temperatura de entrada 70 e 80°C, Figs. 4.37 e 4.38, todos os nanofluidos apresentaram valores de UA inferiores ao fluido base, sendo o mais concentrado, 0,3%, o que mais se aproximou do fluido base. Os demais nanofluidos retornaram desempenho abaixo do EG30%, em um decremento máximo de 11% para o nanofluido 0,1%, com a entrada à 70°C.

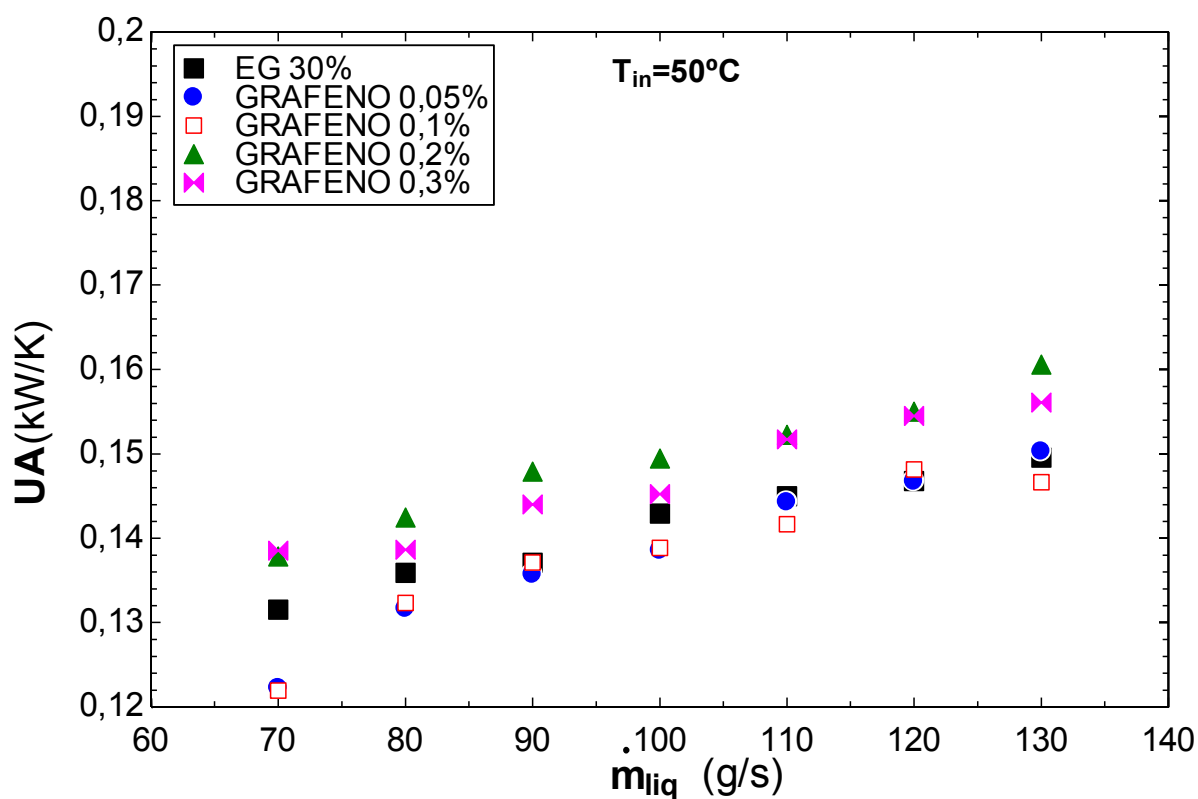


Figura 4.35 – Condutância térmica para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada 50°C.

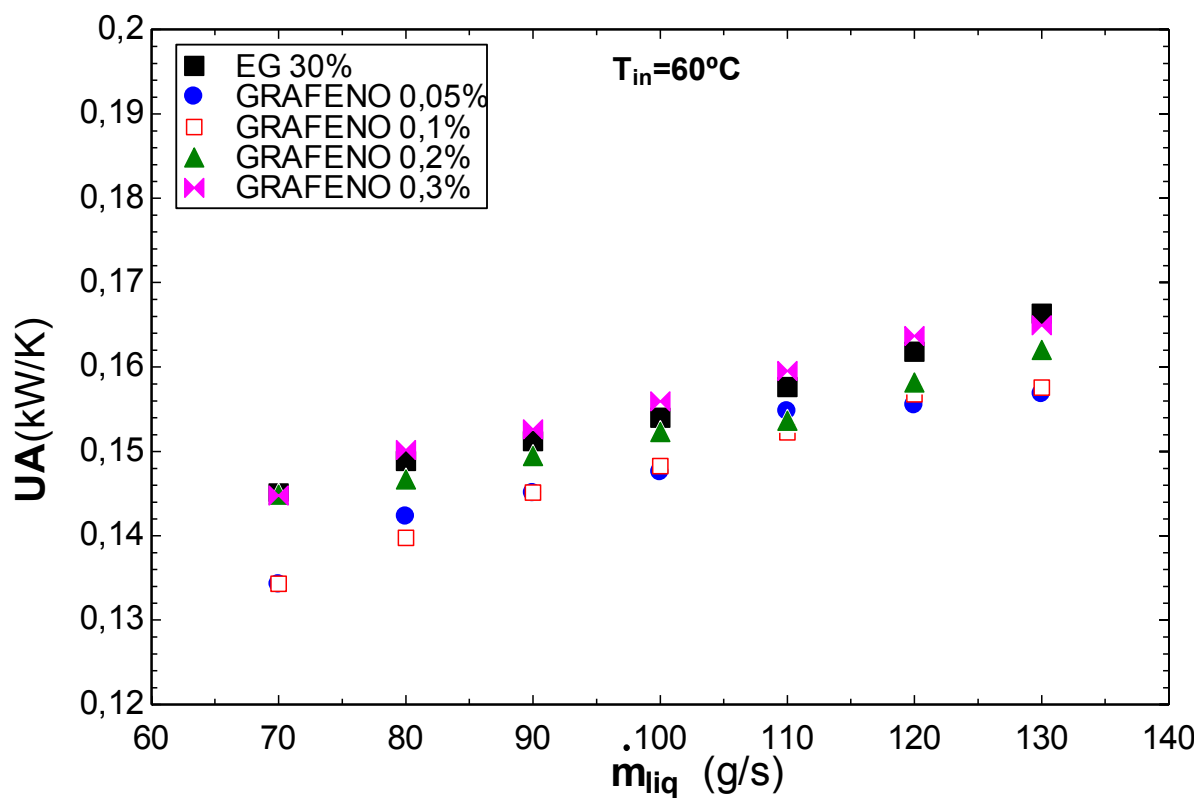


Figura 4.36 – Condutância térmica para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada 60°C .

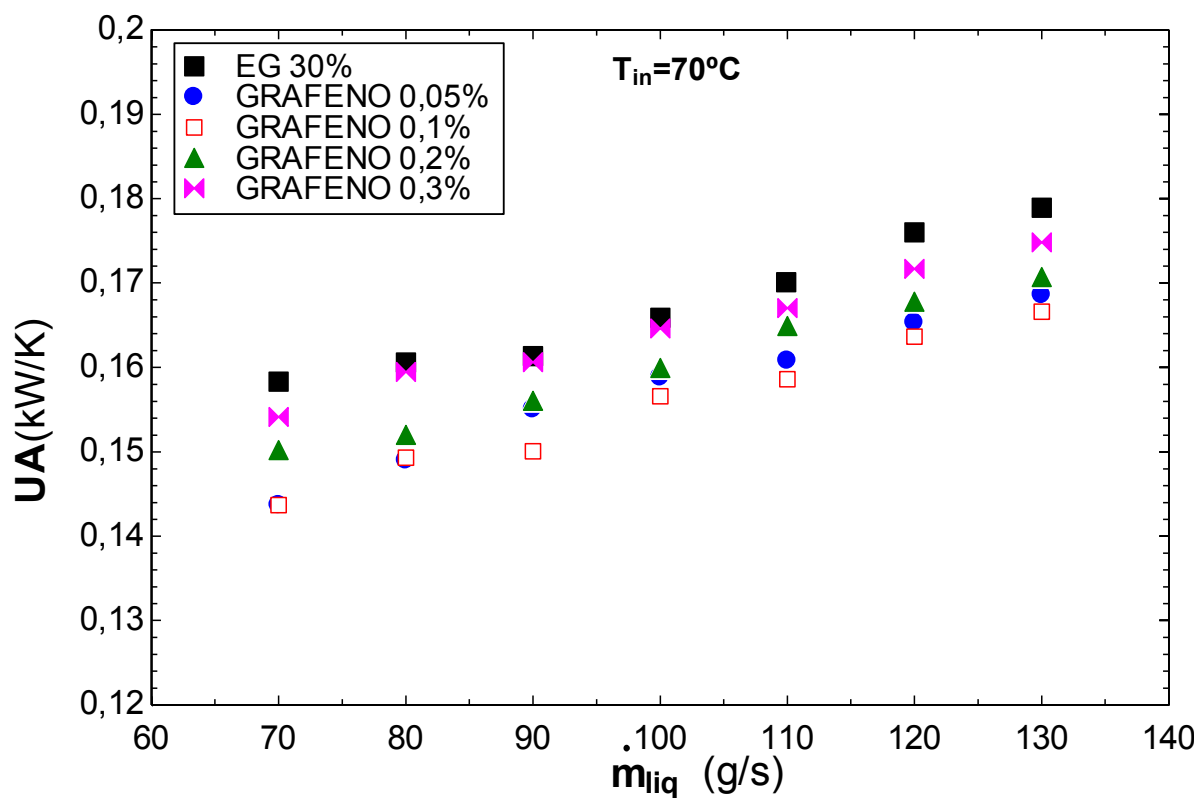


Figura 4.37 – Condutância térmica para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada 70°C .

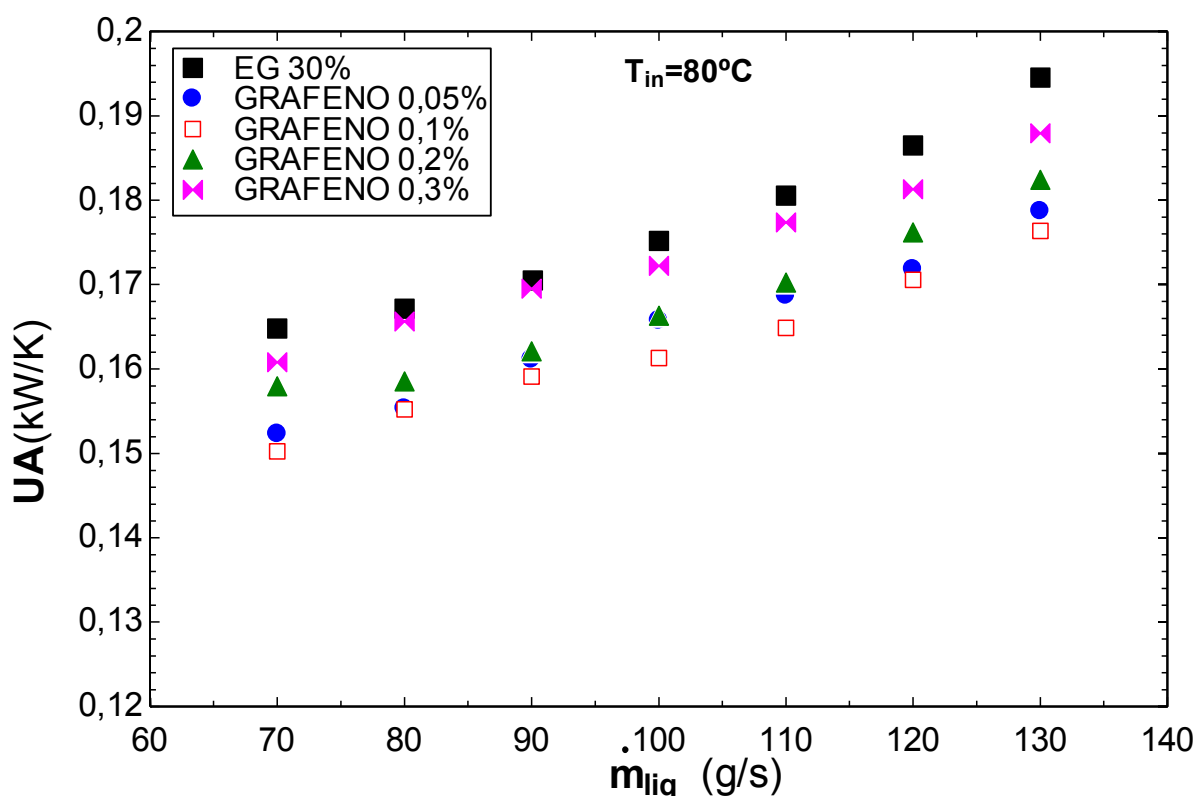


Figura 4.38 – Condutância térmica para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada 80°C.

Uma avaliação do desempenho dos nanofluidos em função do número de Reynolds (Re) é apresentada nas figuras 4.39 a 4.46. A Fig. 4.39 mostra os coeficientes de transferência de calor (h) em função de Re para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada 50°C. Observam-se valores de h levemente superiores para os nanofluidos. O nanofluido de concentração 0,1% foi o que obteve os menores valores de h , enquanto o nanofluido 0,2% foi o mais eficiente. Novamente a tendência de queda no desempenho dos nanofluidos pode ser observada nestes resultados. Nos testes com temperatura de entrada 60°C, Fig. 4.40, apenas o nanofluido 0,02% obteve valores de h destacadamente superiores ao fluido base. Na Fig. 4.41 pode-se observar que para temperatura de entrada 70°C, os nanofluidos 0,05%, 0,1% e 0,3% obtiveram coeficientes h próximos ao do fluido base. Já o nanofluido de concentração 0,2% apresentou uma tendência de valores de h superior à do EG30%. É importante observar que para valores próximos de Reynolds, as vazões mássicas são diferentes para fluido base e nanofluido. Para temperatura de entrada 80°C, Fig. 4.42, o nanofluido MWCNT2 novamente apresentou tendência de valores superiores de h para Reynolds semelhantes, porém não superiores ao fluido base para as mesmas vazões mássicas. O nanofluido 0,1% obteve valores inferiores de h , enquanto os nanofluidos 0,05% e 0,3% retornaram valores de h ligeiramente superiores ao fluido base, porém inferiores ao nanofluido 0,2%.

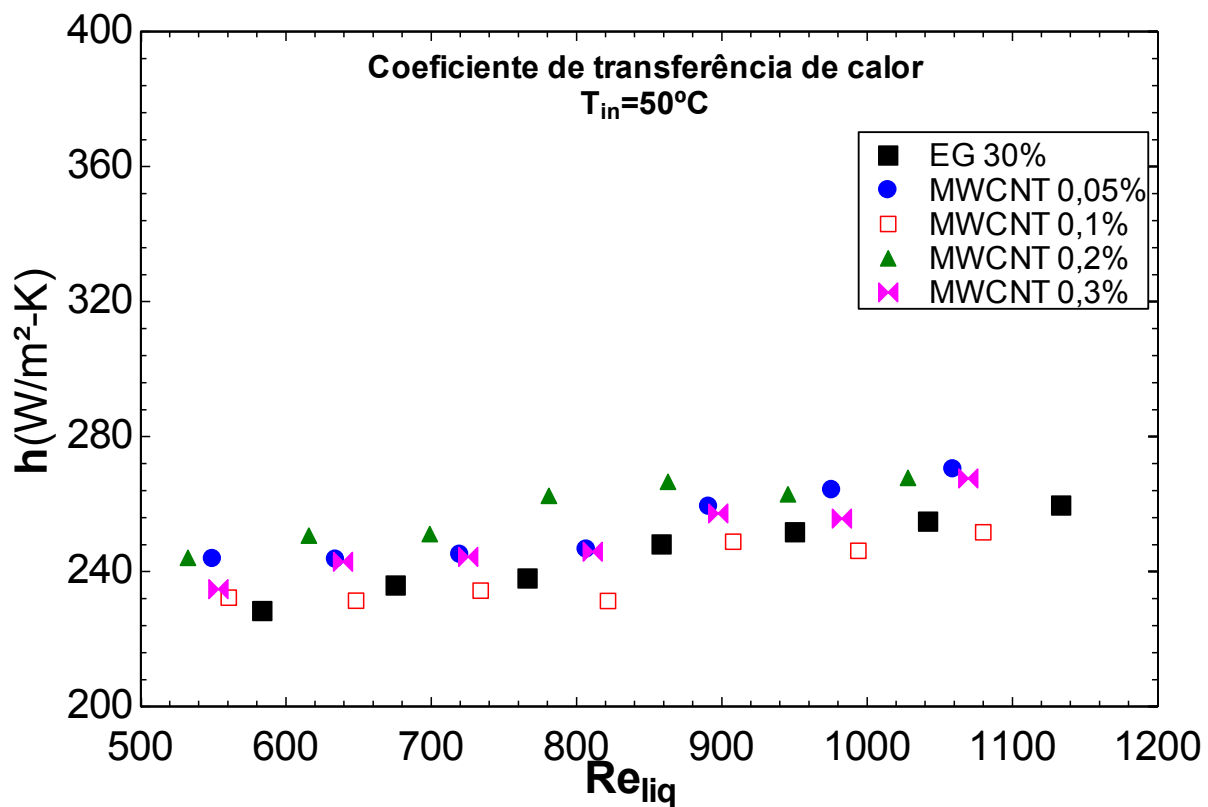


Figura 4.39 – Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos MWCNT/EG30%, temperatura de entrada do líquido 50°C .

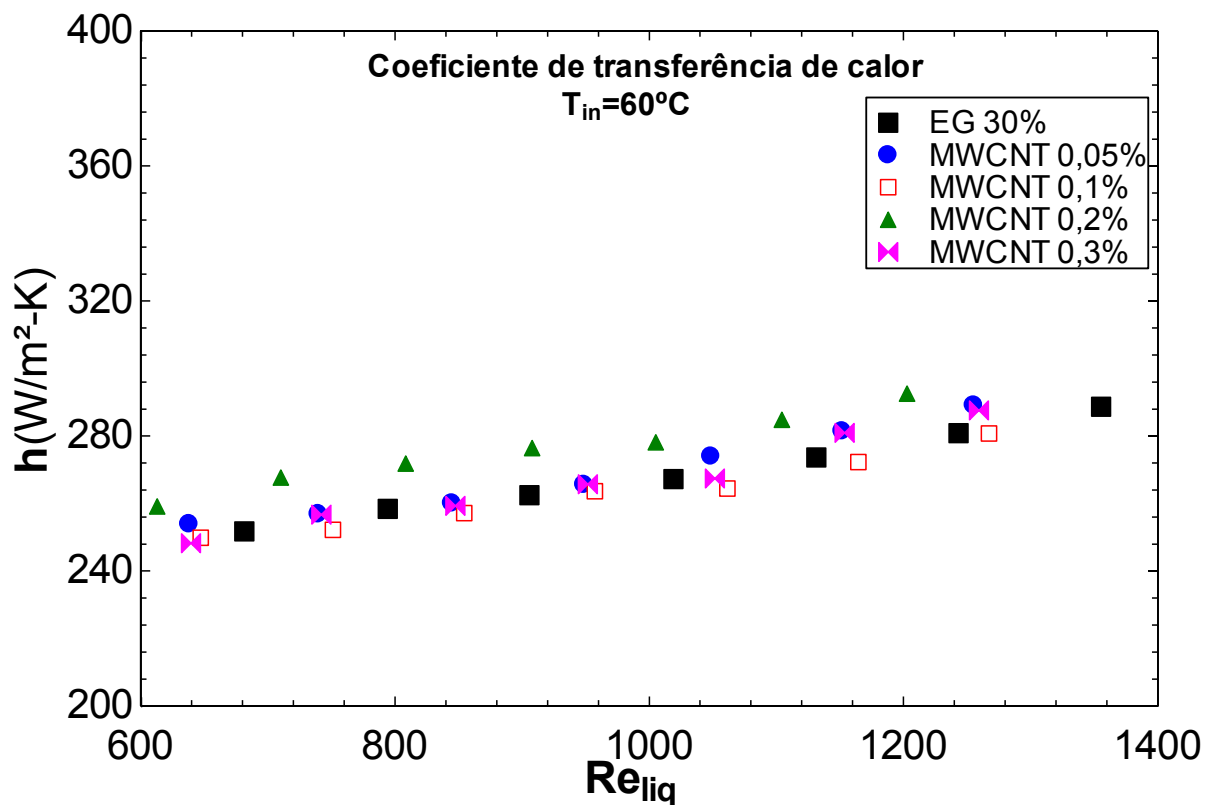


Figura 4.40 – Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos MWCNT/EG30%, temperatura de entrada do líquido 60°C .

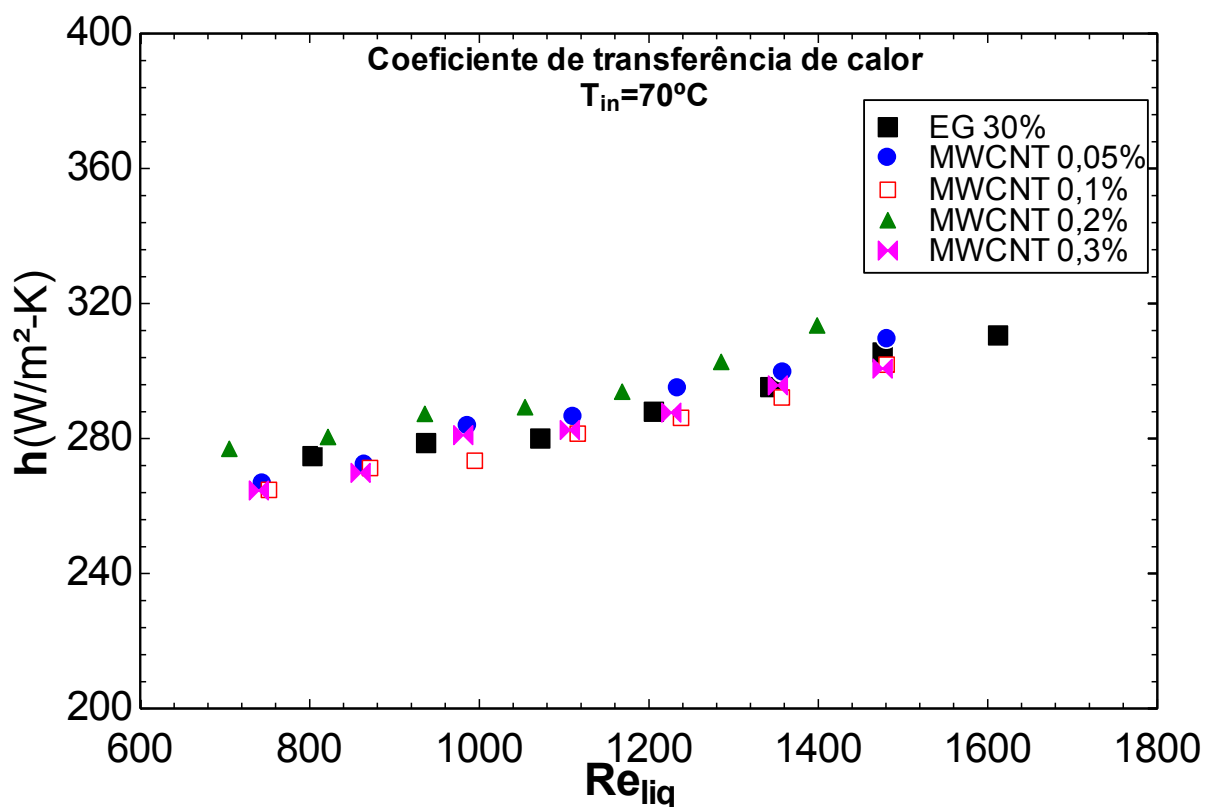


Figura 4.41 – Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos MWCNT/EG30%, temperatura de entrada do líquido 70°C .

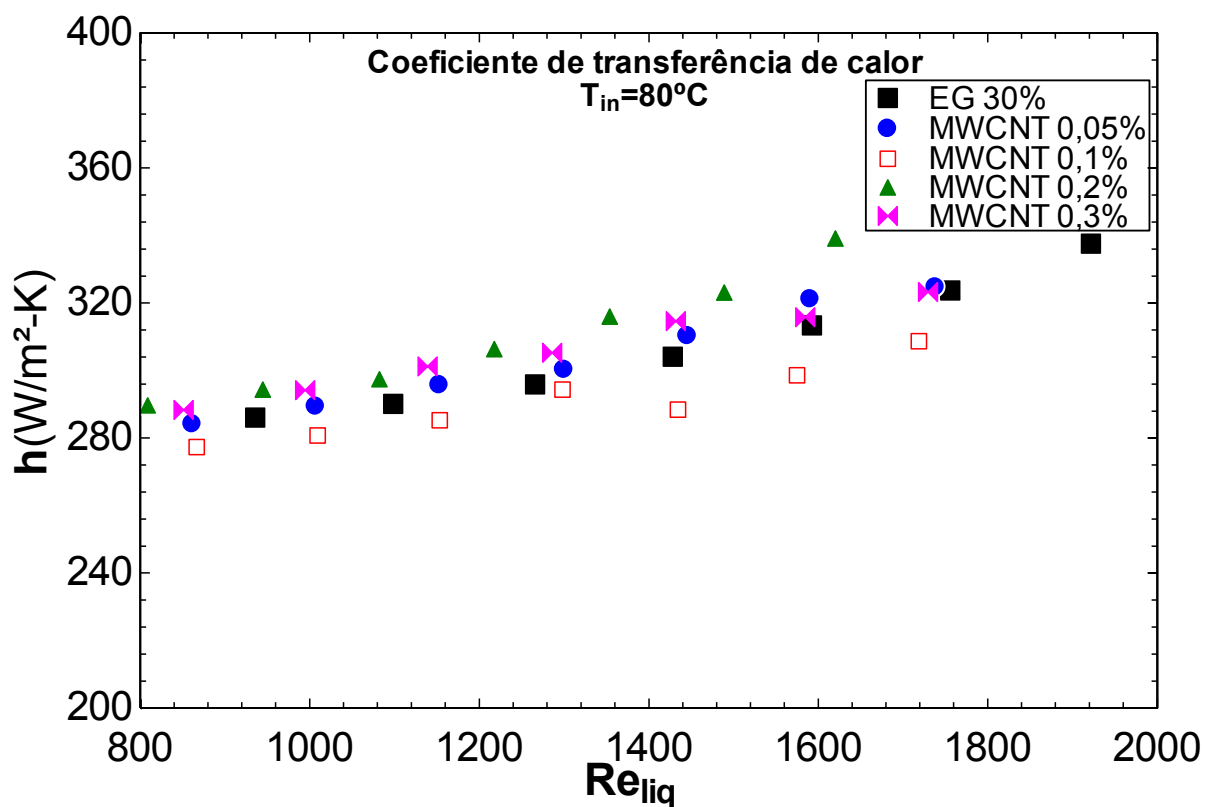


Figura 4.42 – Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos MWCNT/EG30%, temperatura de entrada do líquido 80°C .

Para os nanofluidos de grafeno, nos testes com temperatura de entrada 50°C, os nanofluidos de concentração 0,2 e 0,3% apresentaram valores de h superiores ao do EG30%. Já os de menor concentração, 0,05 e 0,1%, apresentaram valores ligeiramente inferior ao EG30% para Reynolds até 900, sendo que para Re maiores que 900 houve uma tendência destes 2 nanofluidos se aproximarem do fluido base. Estes resultados estão mostrados na Fig. 4.43. A Fig. 4.44 ilustra o coeficiente de transferência de calor obtido para os nanofluidos de grafeno, na temperatura de entrada 60°C, em que o nanofluido de concentração 0,3% obteve o melhor desempenho, porém com valores de h próximos ao fluido base. Os demais nanofluidos de grafeno apresentaram valores de h inferior à do fluido base. Já nos testes com temperatura de entrada 70°C, o desempenho foi inferior ao verificado na temperatura de entrada 60°C, como pode ser observado na Fig. 4.45

A Fig. 4.46 mostra os resultados para temperatura de entrada 80°C. O nanofluido 0,3% apresentou valores de h próximos ao do fluido base, para Reynolds até 1400. Para Re acima deste valor, houve uma tendência de diminuição do h relativo. Nas outras concentrações, 0,05, 0,1 e 0,2%, os nanofluidos apresentaram valores muito próximos entre si para o h , porém todos inferiores ao fluido base.

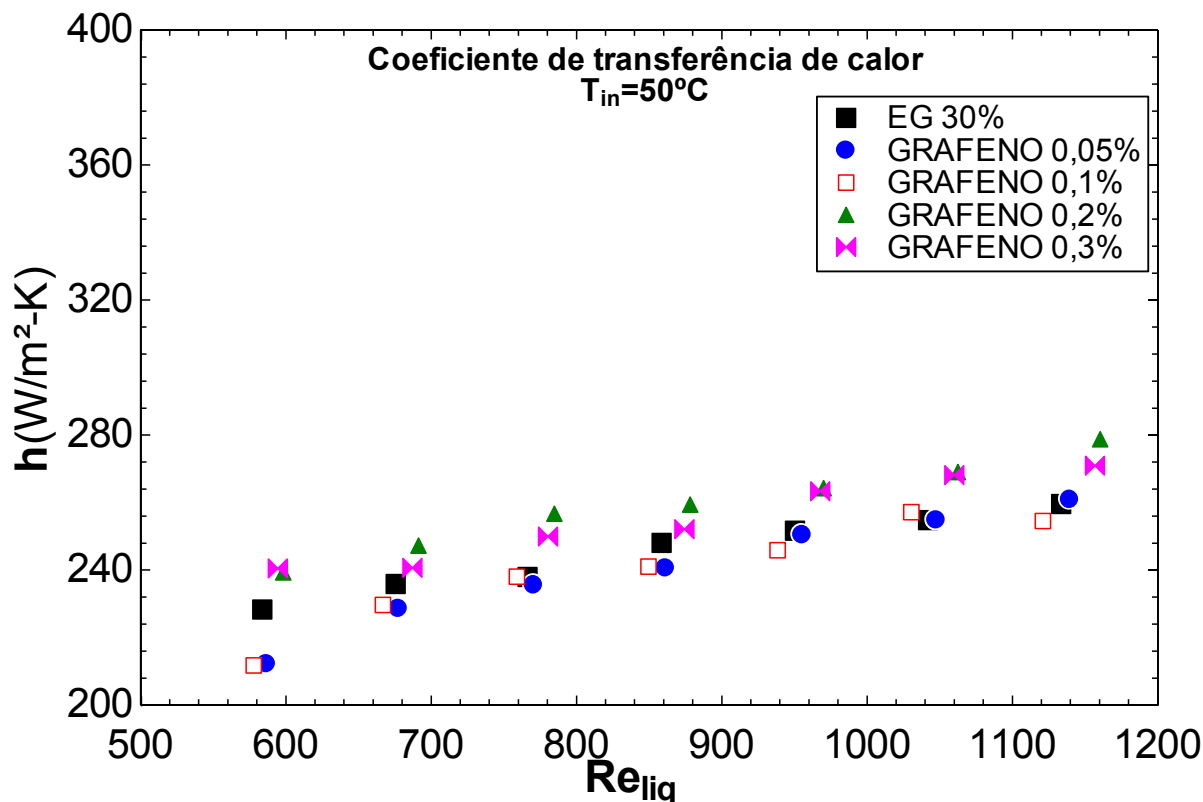


Figura 4.43 – Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, temperatura de entrada do líquido 50°C

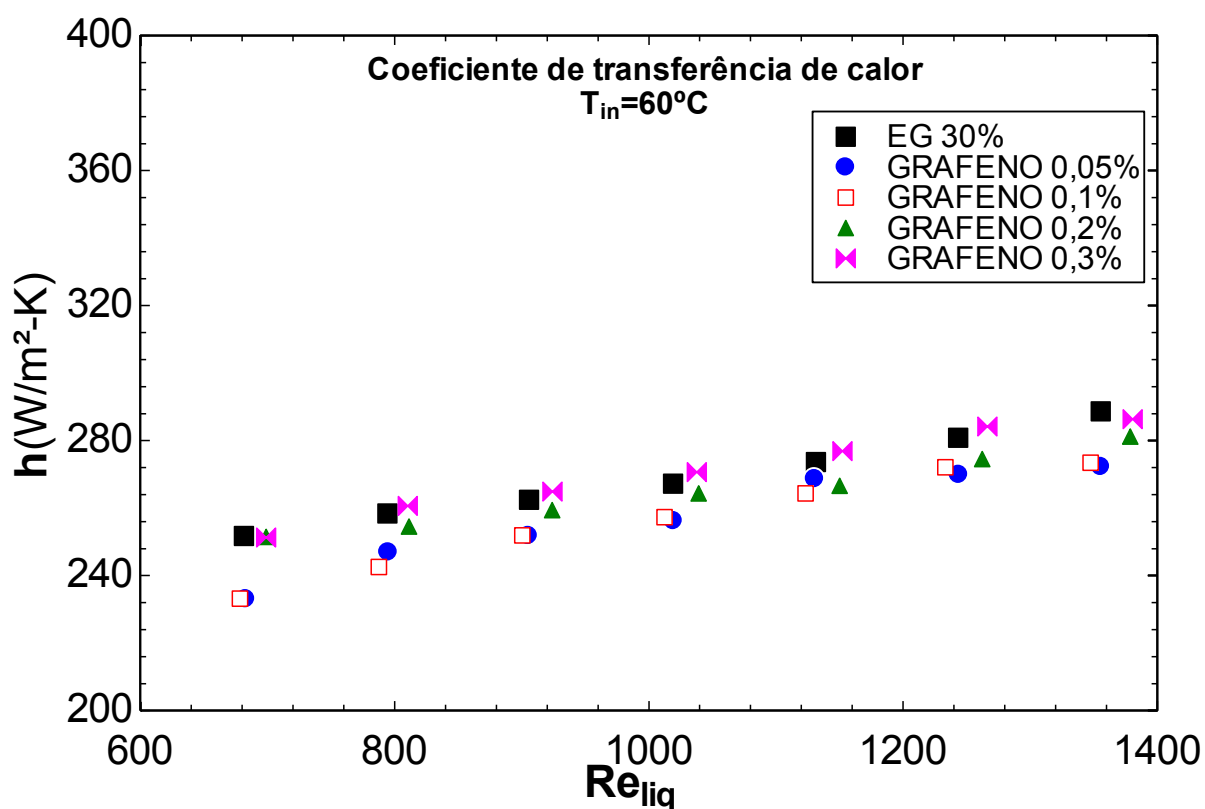


Figura 4.44 – Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, temperatura de entrada do líquido 60°C

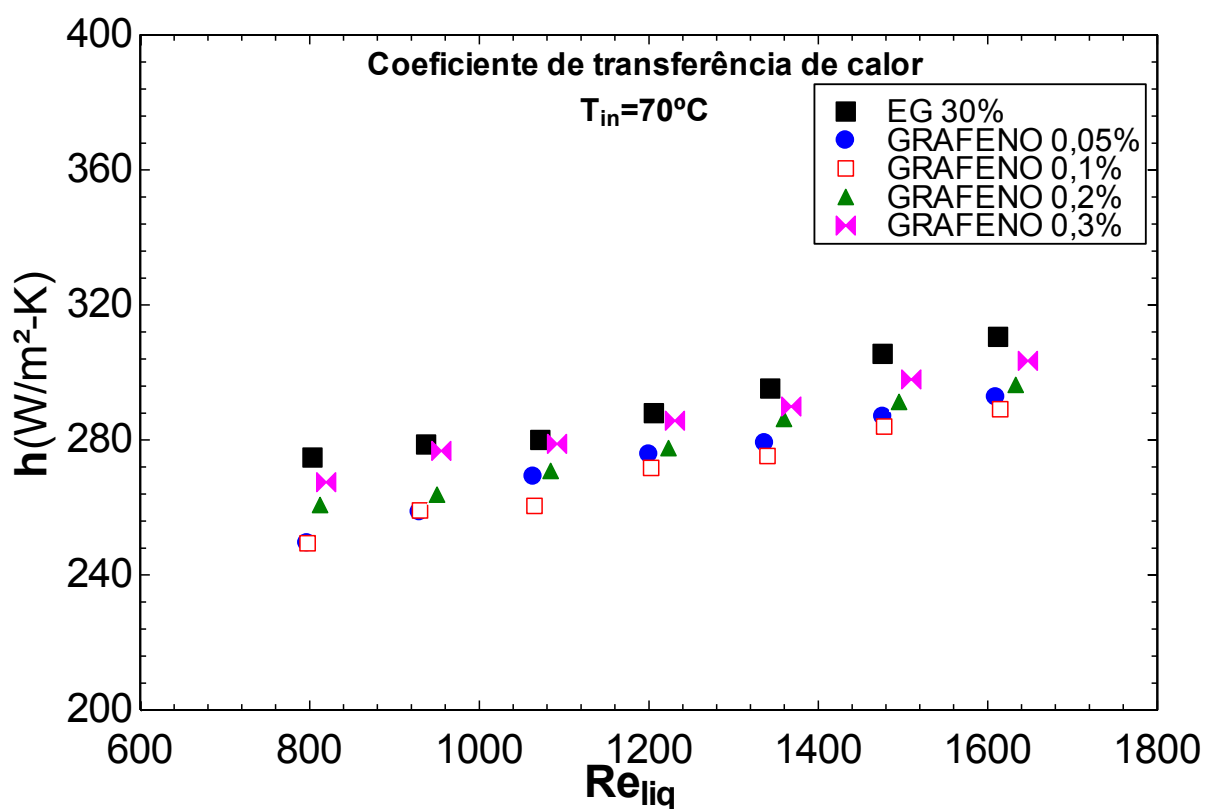


Figura 4.45 – Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, temperatura de entrada do líquido 70°C

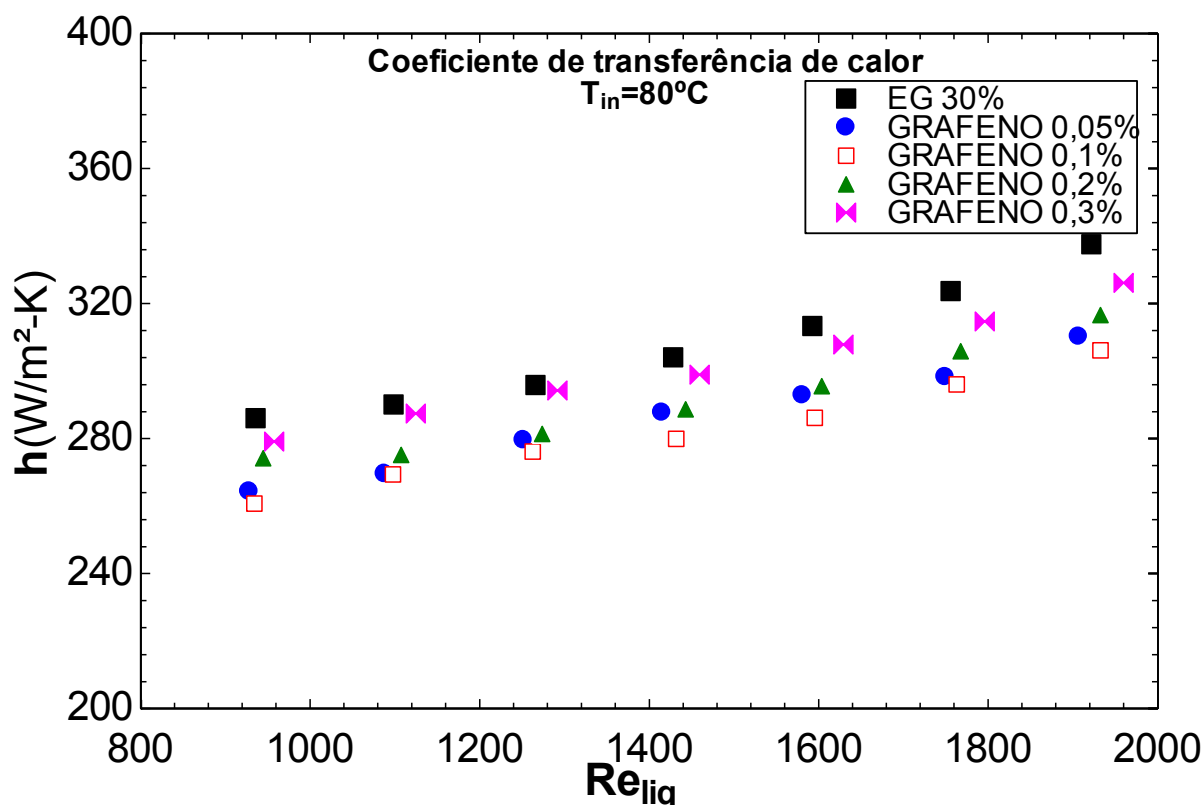


Figura 4.46 – Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, temperatura de entrada do líquido 80°C

As potências de bombeamento para os testes realizados no radiador 2 também foram avaliadas, por meio do inversor de frequência, o que permitiu o consumo real da bomba de engrenagens. Os resultados indicaram maior potência de bombeamento necessária para operar com nanofluidos. As figuras 4.47 a 4.50 comprovam esta tendência para a potência de bombeamento para todas as condições de testes, obtidas para os nanofluidos MWCNT/EG30% para todas as temperaturas de entrada. Em todas as figuras mencionadas acima, observa-se uma tendência semelhante, na qual o nanofluido de concentração 0,05% apresentou maior potência de bombeamento. O nanofluido de concentração 0,3%, que foi o primeiro a ser analisado, necessitou de uma potência de bombeamento próxima à do fluido base, enquanto para os demais nota-se um aumento significativo na potência. As engrenagens da bomba certamente sofreram desgaste ao longo dos testes, fato que influenciou na potência de bombeamento. Para os nanofluidos de grafeno, observou-se tendência semelhante, a potência de bombeamento aumentou conforme realizados testes. As Fig. 4.51 a 4.54 ilustram a potência de bombeamento para os nanofluidos de grafeno. Os resultados para potência de bombeamento indicam maior efeito do desgaste da bomba do que efeitos do aumento da viscosidade, visto que durante a realização de testes a potência de bombeamento necessária aumentou à medida que foram realizados os testes.

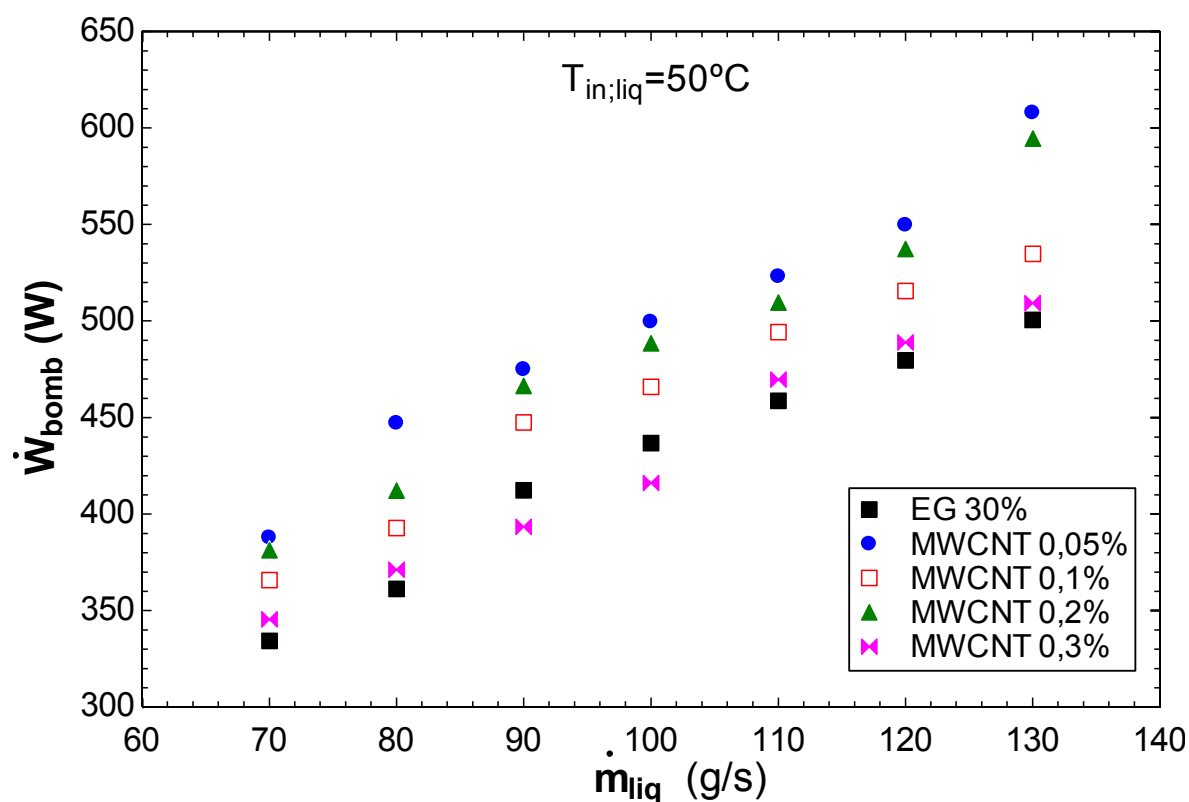


Figura 4.47 – Potência de bombeamento para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada do líquido 50°C

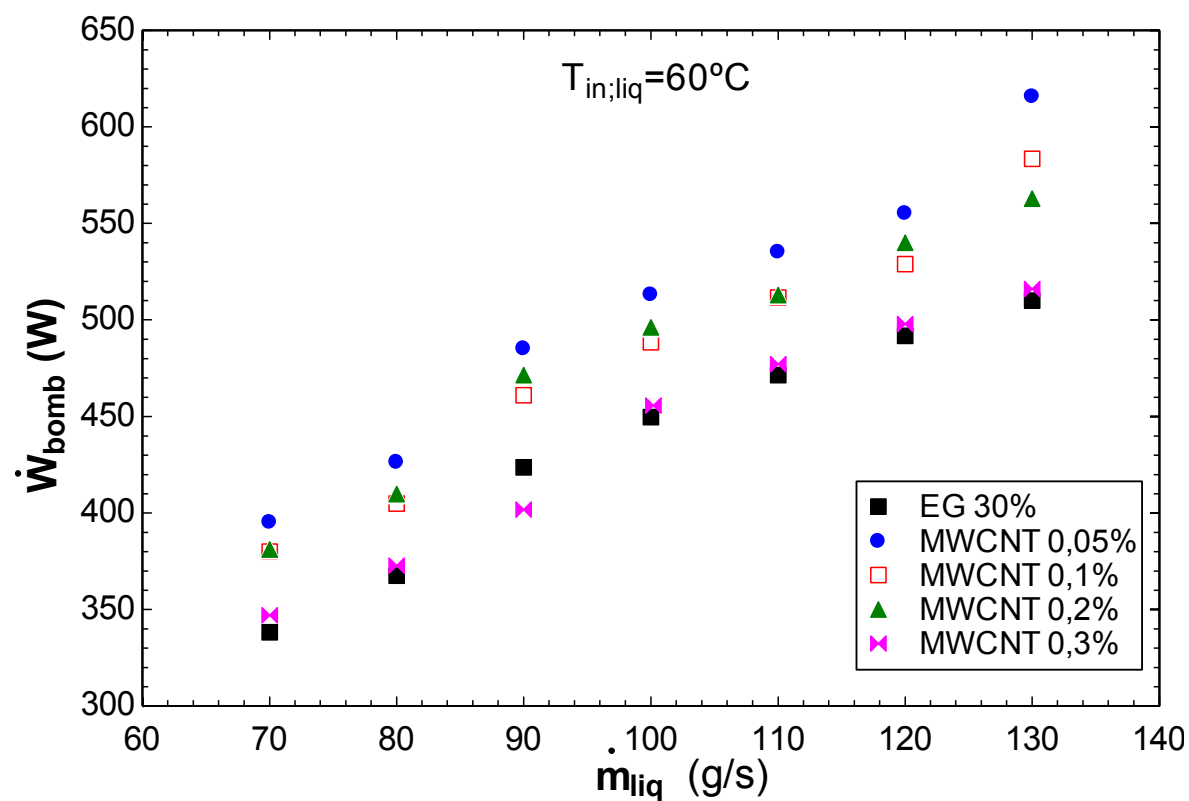


Figura 4.48 – Potência de bombeamento para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada do líquido 60°C

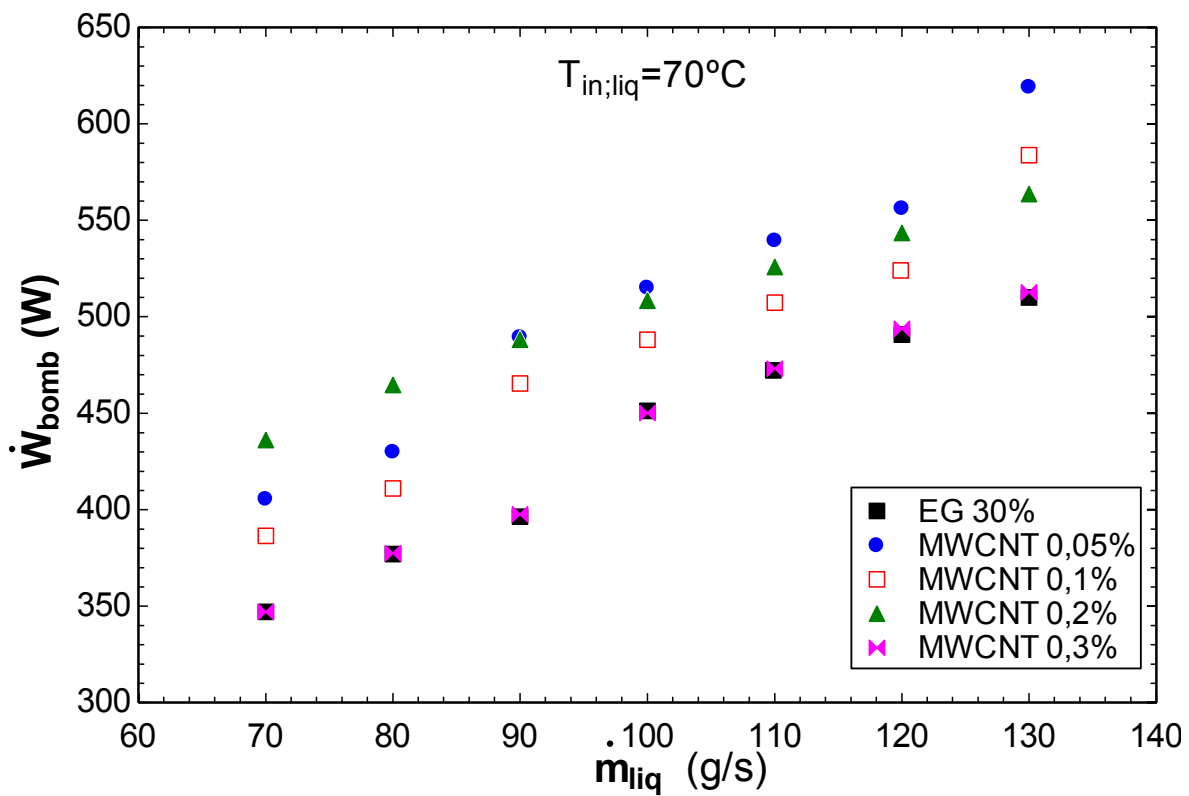


Figura 4.49 – Potência de bombeamento para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada do líquido 70°C

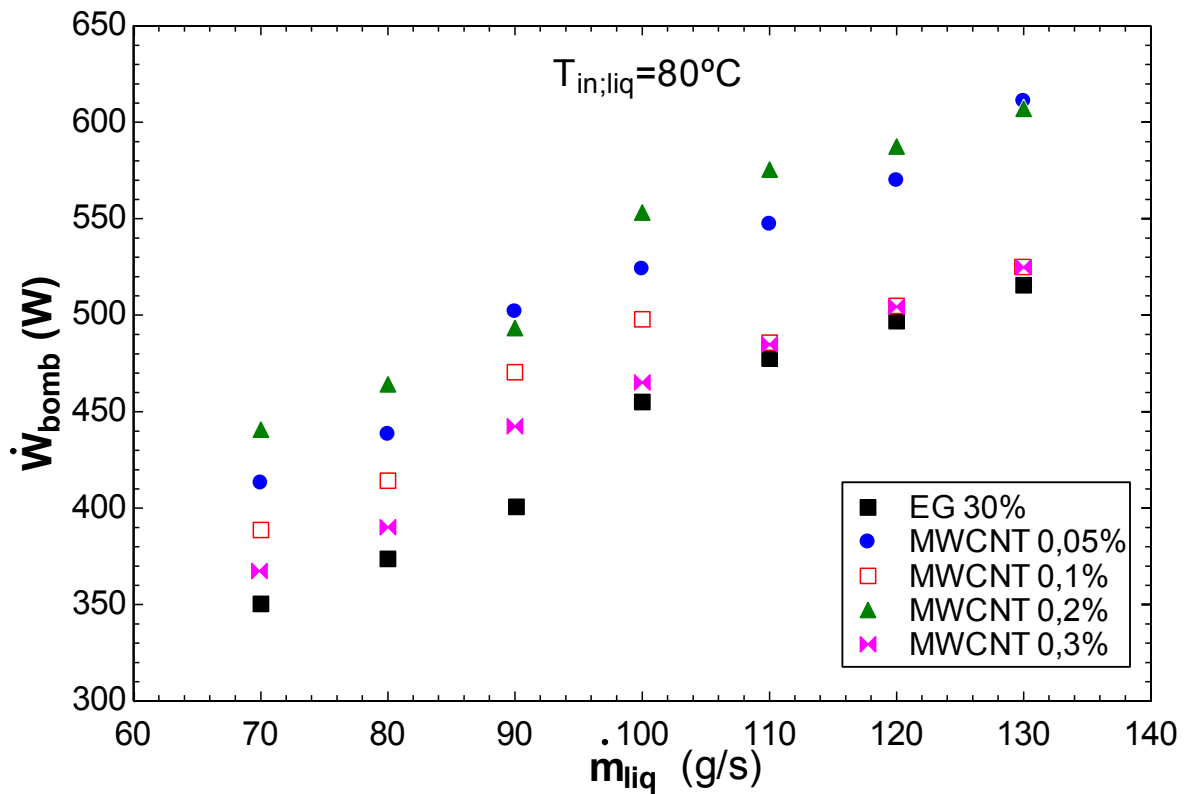


Figura 4.50 – Potência de bombeamento para os nanofluidos MWCNT/EG30%, para temperatura de entrada do líquido 80°C

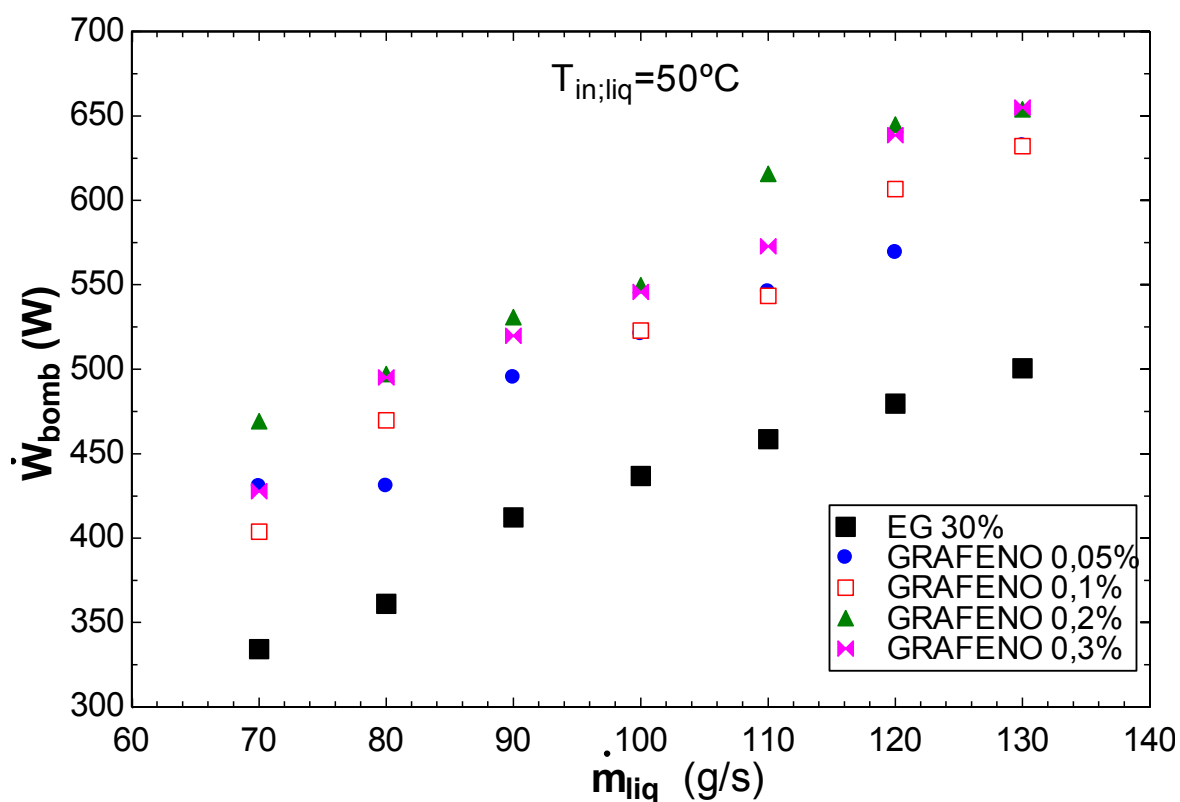


Figura 4.51 – Potência de bombeamento para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada do líquido 50°C

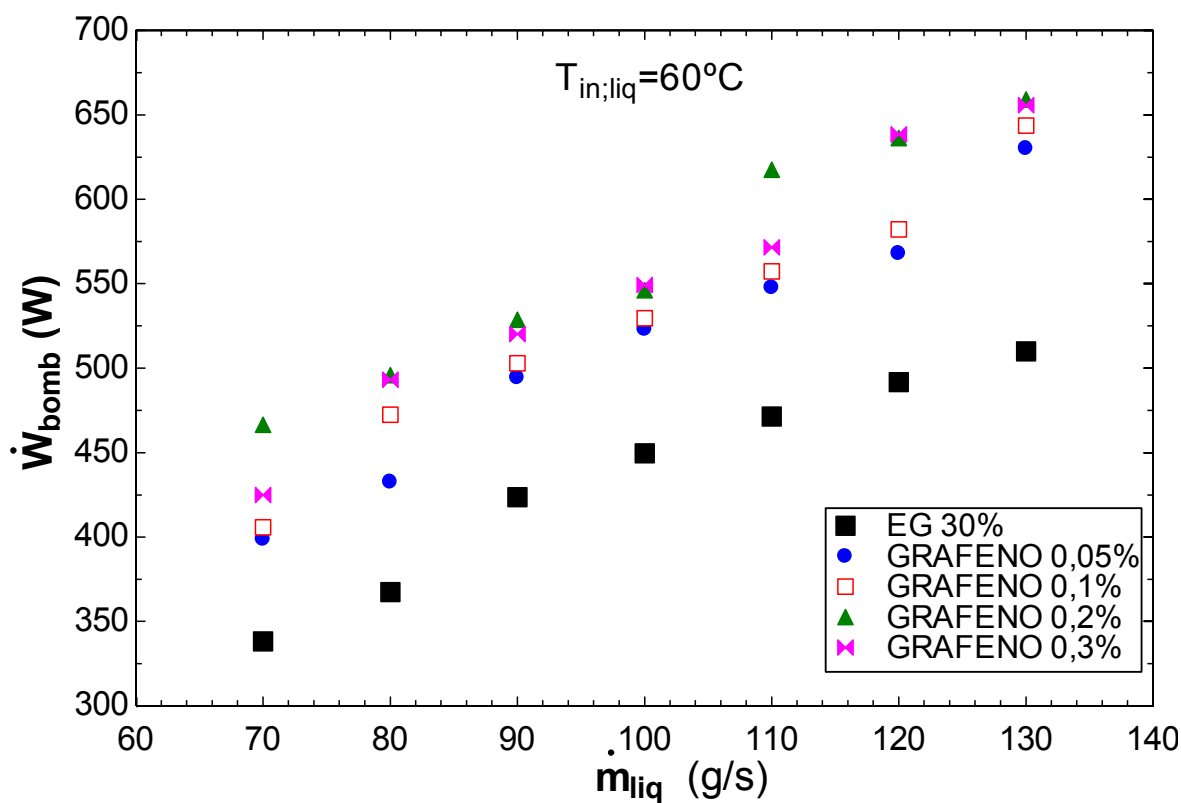


Figura 4.52 – Potência de bombeamento para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada do líquido 60°C

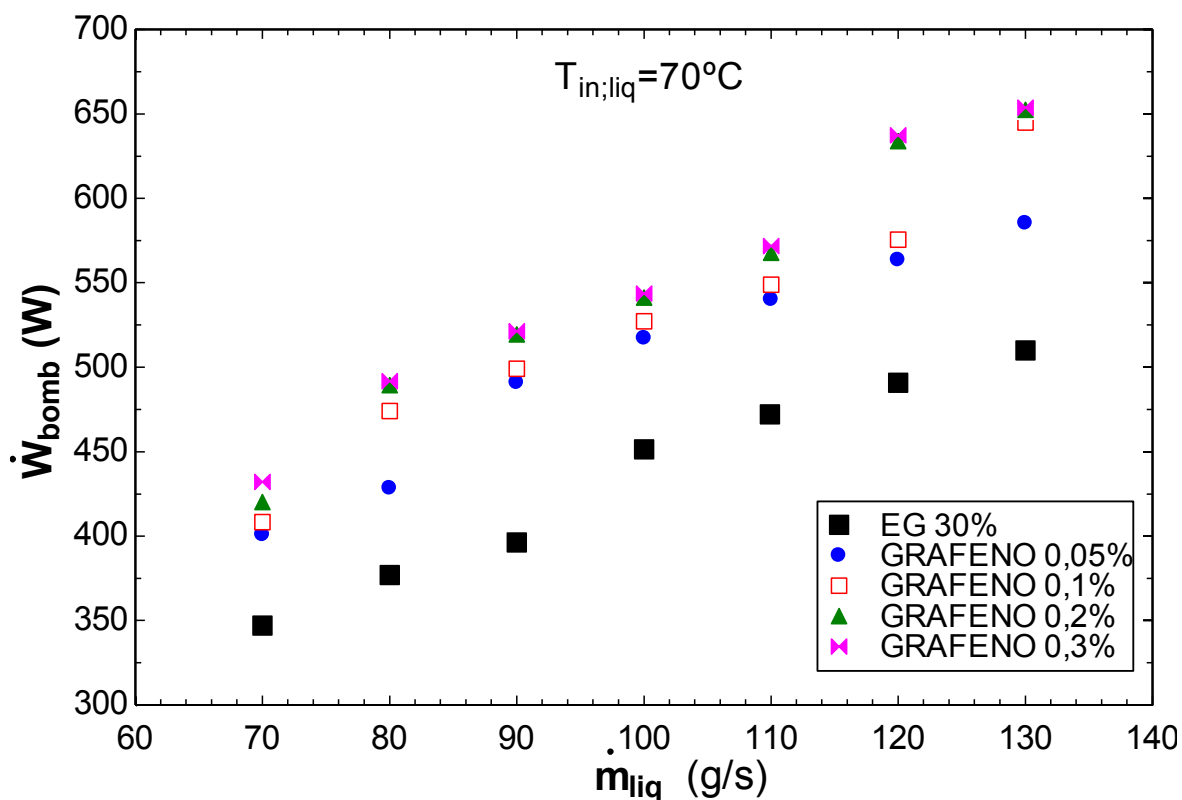


Figura 4.53 – Potência de bombeamento para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada do líquido

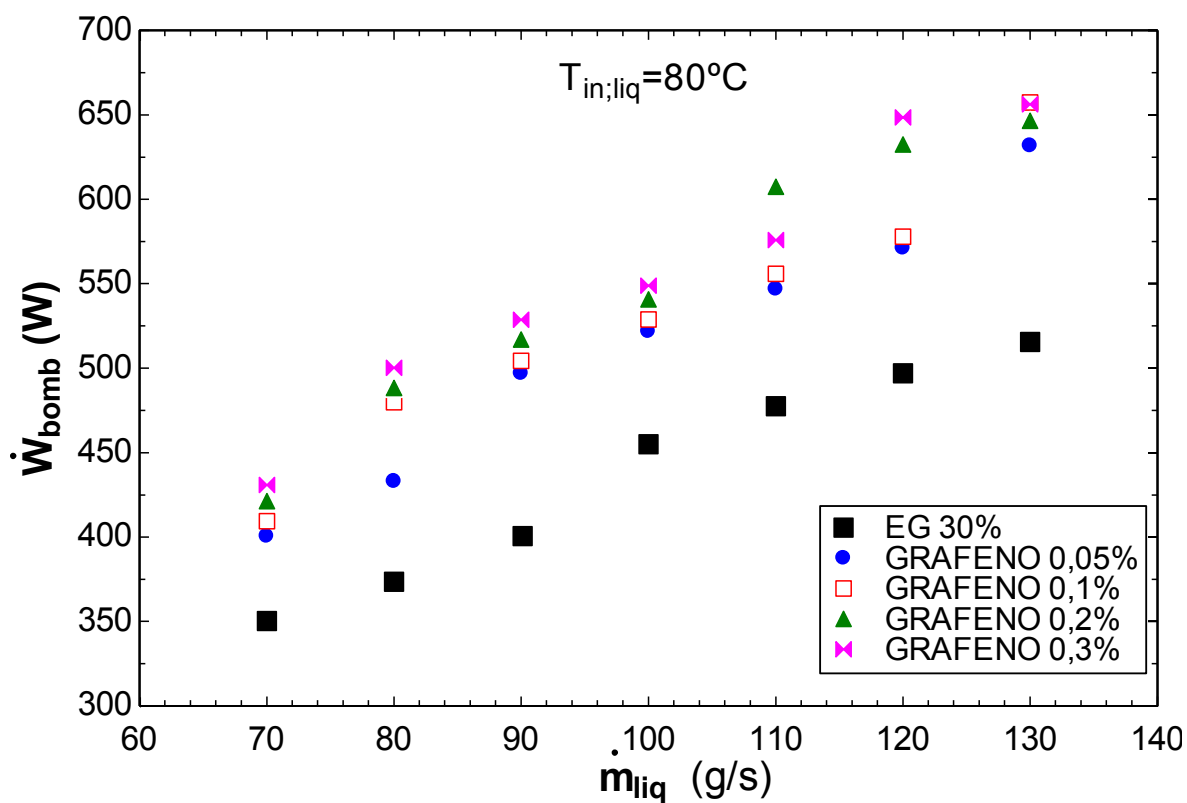


Figura 4.54 – Potência de bombeamento para os nanofluidos GRAFENO/EG30%, para temperatura de entrada do líquido 80°C

Análise do desempenho em função da concentração

Nos testes realizados no radiador 1, observou-se uma queda no desempenho dos nanofluidos ao aumentar-se a concentração. Por outro lado, nos testes realizados no radiador 2, não se observou uma tendência clara com relação à concentração nos resultados já apresentados. Por isso, fez-se necessário uma análise adicional da taxa de transferência de calor em função da concentração de nanopartículas, para cada condição de teste, visto que na literatura são encontrados resultados nos quais o desempenho dos nanofluidos aumenta com a concentração de nanopartículas, enquanto em outras aplicações os resultados indicam uma concentração ótima, para a qual um incremento adicional não representa aumento de eficiência.

Uma tendência do comportamento dos nanofluidos com respeito à vazão e também com relação à temperatura podem ser identificados. Nas Figs. 4.55 e 4.56 são apresentados os resultados obtidos para a taxa de transferência de calor para as vazões 70 e 130 g/s, respectivamente. Para as demais vazões, as quais apresentaram resultados semelhantes, os resultados estão apresentados no Anexo 3.

A Fig. 4.55 mostra a taxa de transferência de calor para os testes com vazão de líquido 70 g/s. Pode-se observar que os nanofluidos de grafeno apresentaram desempenho geralmente crescente com a concentração de nanopartículas, em todas as temperaturas de entrada. Porém este desempenho foi decrescente com a temperatura, como pode ser visto na Fig. 4.55. Para entrada a 50 e 60°C, os nanofluidos GRF2 e GRF3 obtiveram desempenho superior ao fluido base, enquanto para as temperaturas de entrada 70 e 80°C, o desempenho dos nanofluidos foi sempre inferior ao do EG 30%.

Já para os nanofluidos MWCNT, observa-se de maneira geral um incremento no desempenho com a concentração até valores de concentração de 0,2%, enquanto que um aumento adicional para 0,3% não implica em um novo aumento da taxa de transferência de calor, indicando a possibilidade de existência de uma concentração ótima no intervalo de concentrações analisadas. Assim como para os nanofluidos de grafeno, o desempenho relativo é geralmente decrescente com a temperatura de entrada.

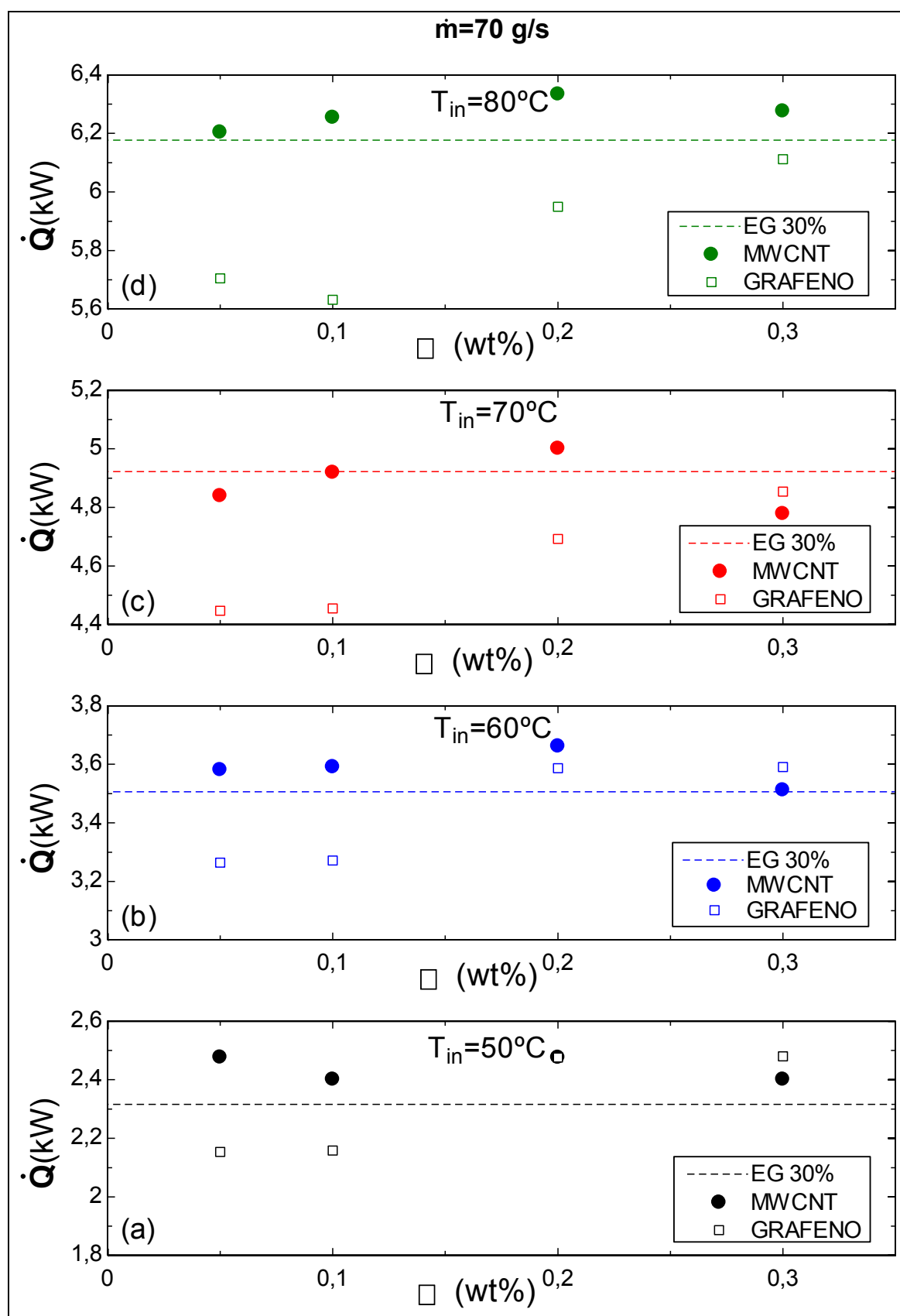


Figura 4.55 – Taxas de transferência de calor obtidas no radiador 2 em função da concentração, para vazão de líquido 70 g/s e todas temperaturas de entrada

A Fig. 4.56 apresenta a taxa de transferência de calor para os testes com vazão de líquido 130 g/s, em função da concentração mássica de nanopartículas e para todas as temperaturas de entrada. Novamente é possível observar que, em geral, o desempenho melhorou com a concentração (com exceção do nanofluido 0,1% que foi o de pior desempenho), porém a taxa de transferência de calor obtida foi sempre inferior à do fluido base para as mesmas condições.

Em comparação com os testes à vazão 70g/s, observa-se uma queda no desempenho relativo, o que indica uma limitada faixa de aplicações para os nanofluidos também com respeito a este parâmetro. Ao analisar para diferentes temperaturas de entrada, o desempenho relativo dos nanofluidos geralmente diminuiu com a temperatura.

Para os nanofluidos MWCNT/EG30%, o nanofluido 0,1% também apresentou o pior desempenho. Nas outras concentrações, novamente observa-se um aumento do desempenho até a concentração 0,2% e nova queda na taxa de transferência de calor ao incrementar a concentração para 0,3%, reforçando a possibilidade da existência de uma concentração ótima para o desempenho de nanofluidos.

Com relação a temperatura, é mais uma vez destacado que o desempenho dos nanofluidos decai com a temperatura, de modo que nos ensaios com entrada a 80°C o melhor nanofluido obteve desempenho similar ao fluido base, enquanto os demais foram inferiores.

Esta análise permite reforçar que os nanofluidos se mostraram com melhor potencial de aplicação em temperaturas e vazões mais baixas, dentre as analisadas.

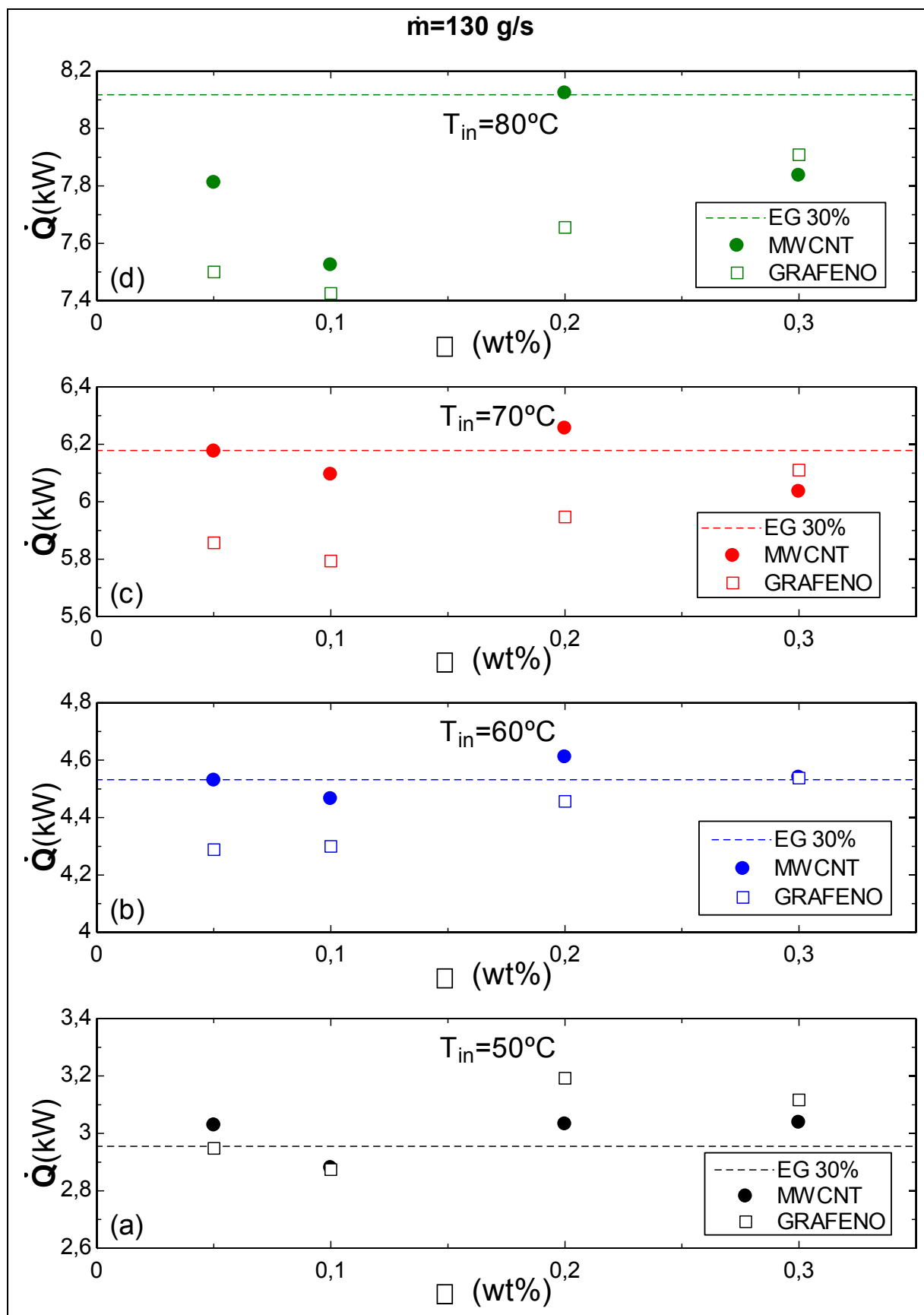


Figura 4.56 – Taxas de transferência de calor obtidas no radiador 2 em função da concentração, para vazão de líquido 130 g/s e todas temperaturas de entrada

4.4. Comparação com resultados da literatura

Os resultados obtidos nos testes com nanofluidos em radiadores automotivos são discrepantes com relação a maioria dos dados encontrados na literatura, na qual são apresentados, de maneira geral, resultados que indicam elevado aumento na transferência de calor. Neste trabalho foram encontrados decréscimos nas taxas de transferência de calor em toda a faixa de temperaturas analisada, no caso do radiador 1.

Por outro lado, para o radiador 2, nos testes com temperatura de entrada 50 e 60°C, resultados semelhantes aos do fluido base (EG30%) foram encontrados, com algumas exceções nas quais houve aumento na transferência de calor. Porém, para os testes com temperatura de entrada elevada (70 e 80°C) o desempenho dos nanofluidos foi inferior ao fluido base.

Uma das razões para tal fato é que a maioria dos pesquisadores analisam os principais parâmetros de transferência de calor, Q e U (ou h), em função do número de Reynolds que, uma vez fixado, implica na necessidade do aumento da vazão mássica ao utilizar nanofluidos (porque a viscosidade dos nanofluidos é superior à dos fluidos base). A maior vazão mássica para os nanofluidos resulta em uma maior taxa de transferência de calor, ou seja, o incremento na transferência de calor se deve ao aumento da vazão mássica, e não à utilização de nanofluidos.

Por exemplo, Peyghambarzadeh et al. (2013) analisou o coeficiente global de transferência de calor em um radiador em função do número de Reynolds no lado do líquido, como ilustrado na Fig. 4.57. É possível observar como a mudança no valor de viscosidade alterou a faixa de Reynolds dos testes, o que também ocorre quando há substituição do fluido base por nanofluido.

Os incrementos apresentados na Fig. 4.57b referem-se à um número de Reynolds fixo (cujo valor não informado), ou seja, as vazões mássicas são diferentes e o incremento do coeficiente global de transferência de calor para uma mesma vazão mássica é inferior ao apresentado.

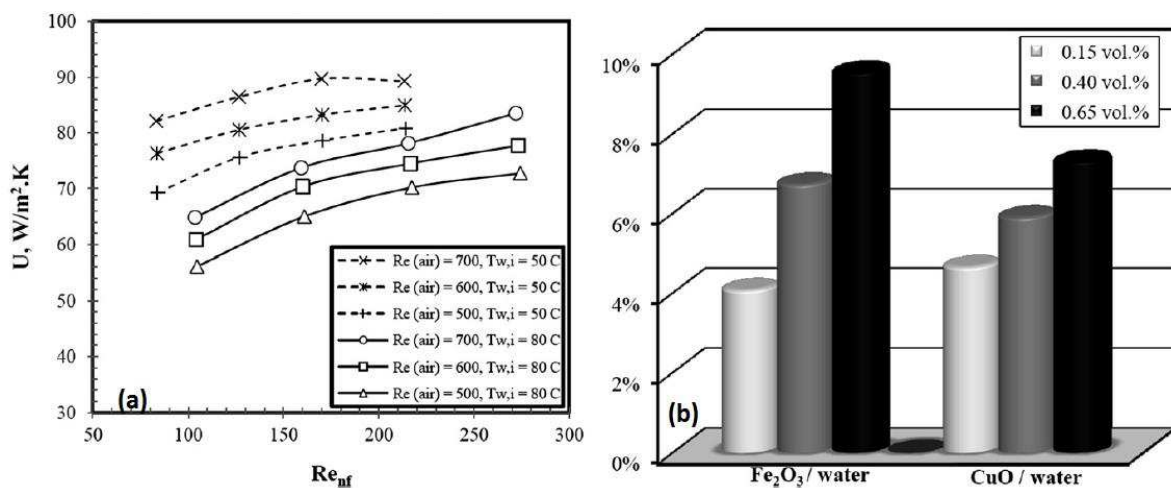


Figura 4.57 – Resultados experimentais de Peyghambarzadeh et al. (2013). (a) Coeficiente global de transferência de calor para os nanofluidos de concentração 0,15%. (b) incremento na transferência de calor utilizando diferentes nanofluidos em comparação com água pura.

Os resultados experimentais apresentados por Huang et al. (2015) evidenciam ainda mais esta contradição de análises, como ilustrado na Fig. 4.58. A Fig. 4.58a apresenta o parâmetro Nusselt em função de Reynolds, enquanto a Fig. 4.58b ilustra o coeficiente de transferência de calor em função da velocidade de escoamento (u). É possível observar que para um mesmo número de Reynolds, o número de Nusselt é superior para os nanofluidos em comparação com o fluido base. Este aumento se deve à maior condutividade térmica dos nanofluidos. Porém, ao analisar-se os valores de h em função da velocidade, fica evidente a queda na transferência de calor obtida para os nanofluidos escoando em uma mesma velocidade, em comparação ao fluido base, tendência semelhante à encontrada no presente trabalho. O autor explica este efeito como uma supressão da turbulência devido à adição de nanopartículas ao fluido base, e também ao aumento da viscosidade.

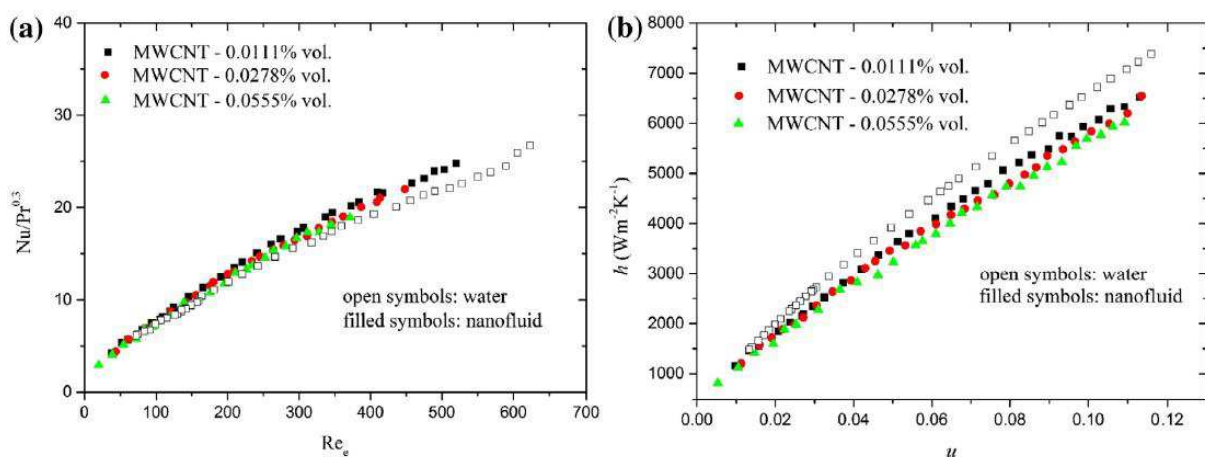


Figura 4.58 – Resultados experimentais obtidos por Huang et al. (2015)

Outro exemplo de trabalho que apresenta resultados de incremento na transferência de calor em função de Reynolds foi desenvolvido por Leong et al. (2010), eles analisaram o desempenho de nanofluidos CuO/EG em um radiador. Nesse trabalho foi determinado o coeficiente global de transferência de calor do radiador operando com EG e com nanofluidos, para mesmos números de Reynolds nos lados do ar e do líquido. Os autores desprezaram o efeito de incremento na viscosidade dos nanofluidos devido ao fato da concentração máxima utilizada ter sido 2%. O máximo incremento na transferência de calor observado foi 3,8%, este valor poderia ser menor se fossem consideradas como referência a vazão mássica.

Kannan et al. (2014) apresentaram resultados contraditórios com relação a presente tese. Os autores encontraram, para nanofluido $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Água}$, um incremento elevado na taxa de transferência de calor utilizando nanofluidos, para mesmos valores de vazão mássica. Além disso, este incremento se acentuou com o aumento da temperatura de entrada. Vale ressaltar que o maior valor de temperatura de entrada utilizado foi de 57°C . Nesta faixa de temperatura também foram encontrados incrementos na taxa de transferência de calor no presente trabalho para algumas condições de testes, porém com o incremento da temperatura o ganho dos nanofluidos apresentou tendência a diminuir. Estes resultados são apresentados na Fig. 4.59

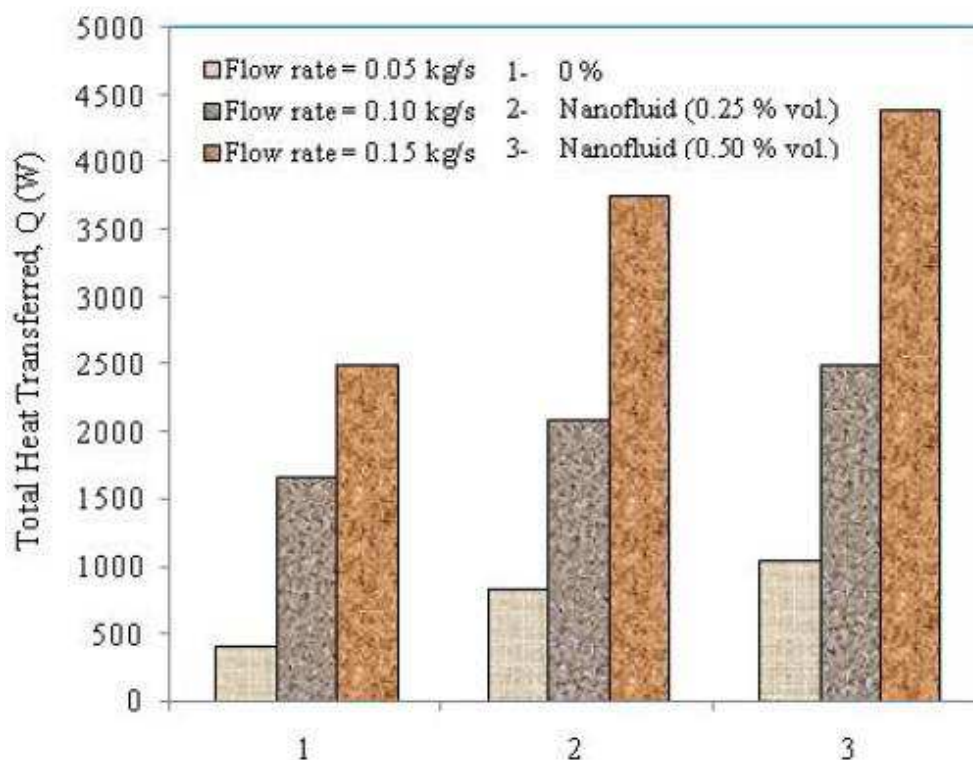


Figura 4.59 – Aumento da taxa de transferência de calor utilizando nanofluidos. Fonte: Kannan et al. (2014).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

1.1. Conclusões

Nesta tese foi apresentada uma contribuição ao conhecimento acerca do desempenho em transferência de calor de uma nova classe de fluidos, os nanofluidos, candidatos a substituir os fluidos convencionais em alguns tipos de sistemas térmicos. Os testes realizados para medição de propriedades térmicas dos nanofluidos permitem as seguintes conclusões:

- A condutividade térmica dos nanofluidos baseados em água foi ligeiramente superior à da água pura, o incremento máximo obtido foi 3,5% à temperatura 50°C.
- A condutividade térmica dos nanofluidos baseados em EG30% foi levemente superior à do fluido base. O incremento neste parâmetro foi de até 7,6% para os nanofluidos de MWCNT, enquanto para os nanofluidos compostos por grafeno o maior ganho na condutividade térmica foi 5,9%.
- Em relação à temperatura, quase todos os testes realizados retornaram condutividade térmica variando de forma praticamente linear. Não foi observada uma tendência com relação ao aumento da condutividade térmica com o incremento da concentração de nanopartículas.
- Referente à viscosidade dos nanofluidos baseados em água, os valores obtidos foram superiores à água pura em até 54%, além disso observou-se um comportamento crescente ao aumentar-se a concentração de nanopartículas.
- No caso dos nanofluidos GRAFENO/EG30% os resultados foram semelhantes ao fluido base. O maior incremento na viscosidade foi observado à 25°C, onde para o nanofluido de concentração 0,1% o valor obtido foi 4,7% superior ao fluido base. Por outro lado, à 20°C, o nanofluido de concentração 0,2% apresentou viscosidade 5% inferior à do EG30%.

- A viscosidade dos nanofluidos MWCNT/EG30% foi medida próxima à do EG30% para temperaturas até 50°C, na qual o máximo aumento observado foi de 8,6% para o nanofluido de concentração 0,05%. Nos testes com temperaturas maiores, 60, 70 e 80°C, o incremento na viscosidade foi mais significativo. Nos testes com temperatura 80°C, os nanofluidos de concentração 0,1, 0,2, e 0,3% apresentaram aumento nesta propriedade de 19, 29,7 e 17,7%, respectivamente.
- Não foi observada uma tendência clara para a viscosidade relativa em função da temperatura ou da concentração de nanopartículas para os nanofluidos baseados em EG30%.

Os nanofluidos produzidos foram submetidos a análise de desempenho térmico em radiadores automotivos, instalados em uma bancada experimental comprovadamente precisa, o que foi verificado por meio de testes de validação. A partir dos resultados obtidos nesses testes, concluiu-se que:

- Nos testes realizados no radiador 1 (PALIO), os nanofluidos analisados (MWCNT/água) apresentaram desempenho inferior à água pura. A maior queda na taxa de transferência de calor (\dot{Q}) foi 22%, observada para o nanofluido de concentração 0,16%. Além disso, o desempenho dos nanofluidos diminuiu ao aumentar-se a concentração de nanopartículas.
- Nos testes realizados no radiador 2 (UNO MILLE), os nanofluidos (MWCNT/EG30% e GRAFENO/EG30%) apresentaram incremento na transferência de calor em algumas condições de testes, especialmente nos experimentos com temperatura de entrada 50 e 60°C. Por outro lado, nos experimentos com temperatura de entrada 70 e 80°C, o desempenho dos nanofluidos foi geralmente inferior ao fluido base.
- Os nanofluidos MWCNT/EG30% apresentaram incrementos no valor de \dot{Q} de até 7%, nos testes com entrada a 50°C. Por outro lado, nos testes com temperatura de entrada 80°C, a taxa de transferência de calor dos nanofluidos foi até 7% inferior à do fluido base, indicando que nanofluidos apresentam maior potencial de aplicações em baixas temperaturas, obtendo desempenhos inferiores ao fluido base em altas temperaturas.
- Os nanofluidos compostos por grafeno obtiveram, de forma geral, desempenho inferior aos nanofluidos compostos por MWCNT. Porém foi observada novamente uma tendência de queda no desempenho relativo ao aumentar-se a temperatura de testes.
- As análises complementares referentes ao comportamento da condutância térmica e do coeficiente de transferência de calor convectivo reforçaram a ideia de que os nanofluidos analisados, na faixa de aplicações específicas desta tese, não apresentaram vantagens expressivas com relação aos fluidos base.

- A potência de bombeamento (medida apenas nos testes com o radiador 2) necessária para o fluido de arrefecimento foi superior para os nanofluidos comparado ao EG30%. Este comportamento resulta, em parte, do provável desgaste das engrenagens da bomba ao longo dos testes, além da maior viscosidade dos nanofluidos.
- Com relação à concentração, os nanofluidos GRAFENO/EG30% apresentaram desempenho geralmente crescente com a concentração, enquanto os nanofluidos MWCNT/EG30% apresentaram, na maioria das condições de teste, um pico de desempenho na concentração 0,2%, e uma queda neste desempenho ao aumentar a concentração para 0,3%.

Por fim, conclui-se que o número de Reynolds não é um parâmetro adequado para comparação entre desempenho de fluido base e nanofluidos, pois devido à maior viscosidade dos nanofluidos, é necessária uma maior potência de bombeamento para escoar nanofluidos à um mesmo valor de Re (consequentemente maior velocidade de escoamento), fato que por si só aumenta as taxas de transferência de calor. Um parâmetro mais adequado é a vazão mássica ou velocidade de escoamento.

1.2. Trabalhos Futuros

Diversos trabalhos a serem futuramente desenvolvidos darão continuidade à presente pesquisa, entre eles:

- Avaliação experimental do desempenho de nanofluidos em radiadores de diferentes geometrias;
- Medição das potências de bombeamento e de ventilação utilizando um analisador de energia;
- Avaliação experimental do desempenho de nanofluidos de diferentes naturezas, por exemplo, compostos por nanopartículas de prata (Ag), cobre (Cu), e também utilizando outras proporções para o fluido base, por exemplo 50% de água e 50% etilenoglicol;
- Avaliação do desempenho de nanofluidos no radiador em diferentes condições climáticas, com variação da temperatura de incidência do ar no radiador e variação na vazão de ar;
- Realização de testes utilizando nanofluidos em radiadores com controle da umidade do ar;
- Modelagem do radiador para comparações com os resultados experimentais obtidos.

- Funcionalização dos nanofluidos produzidos, visando maior duração de sua estabilidade, por meio da utilização de métodos como mudança de pH, controle de potencial zeta e adição de surfactantes;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDUL HAMID, K., AZMI, W.H., MAMAT, R., SHARMA, K.V., Experimental investigation on heat transfer performance of TiO₂ nanofluids in water-ethylene glycol mixture, International Communications in Heat and Mass Transfer 73: 16-24 (2016).

ALI, H.M., ALI, H., LIAQUAT, H., MAQSOOD, H.T.B., NADIR, M.A., Experimental investigation on convective heat transfer augmentation for car radiator using ZnO-water nanofluids, Energy 84: 317-324 (2015).

ASHRAE STANDARD 33 – Methods of Testing Forced-Circulation Air-Cooling and Air-Heating Coils, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA (2000).

ASHRAE STANDARD 41.2 – Standard Methods for Laboratory Airflow Measurement, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA (1987).

ASME, (1989), Fluid Meters, American Society of Mechanical Engineers.

BAEBER, A.R., QI, L.J., HAFIZ, J., MCMURRY, P.H., HEBERLEIN, J.V.R., GERBERICH, W.W., GIRSHICK, S.L., Nanostructured SiC by chemical vapor deposition and nanoparticle impaction, Surface & Coatings Technology 202: 871-875 (2007).

BHIMANI, V.L., RATHOD, P.P., SORATHIIYA, A.S., Experimental study of heat transfer enhancement using water based nanofluids as a new coolant for car radiators, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 3: 295-302 (2013).

BIGDELLI, M.B., FASANO, M., CARDELLINI, A., CHIVAZZO, E., A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 60: 1615-1633 (2016).

BOUANIS, F.Z., BARATON, L., HU, C.V., PRIBAT, D., COJOCARU, C.S., High-quality single-walled carbon nanotubes synthesis by hot filament CVD on Ru nanoparticle catalyst, *Thin Solid Films* 519: 4594–4597 (2011).

BUONGIORNO, J., ET AL., A Benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids, *Journal of Applied Physics* 106: 094312 (2009).

CHANDRASEKAR, M., SURESH, S., BOSE, A.C., Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of Al₂O₃/water nanofluid in a circular pipe under laminar flow with wire coil inserts, *Experimental Thermal and Fluid Science* 34: 122-130 (2010).

CHAUPIS, J.E.R., Simulação numérica de nanofluidos escoando no interior de dutos retos, 164 f., Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil (2011).

CHEN, L.C., Preparation of TiO₂ Nanoparticles by submerged arc nanoparticle synthesis system, *Journal of Alloys and Compounds* 495: 476–480 (2010).

CHEVALIER, J., TILLEMENT, O., AYELA, F., Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels, *Applied Physics Letters* 91, 233103 (2007).

CHOI, S.U.S., Developments and applications of non-newtonian flows, *ASME FED* vol. 66: 99-105 (1995).

CHOPKAR, M., KUMAR, S., BHANDARI, D.R., DAS, P.K., MANNA, I., Development and characterization of Al₂Cu and Ag₂Al nanoparticle dispersed water and ethylene glycol based nanofluid, *Materials Science and Engineering B* 139: 141-148 (2007).

DING, Y., ALIAS, H., WEN, D., WILLIAMS, R.A., Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49: 240-250 (2006).

DONZELLI, G., CERBINO, R., VAILATI, A., Bistable Heat Transfer in a Nanofluid, *Physical Review Letters* 102, 104503 (2009).

EASTMAN, J.A., CHOI, S.U.S., LI, S., YU, W., THOMPSON, K.J., Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing spherical nanoparticles, *Applied Physics Letters* 78: 718-721 (2001).

ELIAS, M.M., MAHBUBUL, I.M., SAIDUR, R., SOHEL, M.R., SHAHRUL, I.M., KHALEDUZZMAN, S.S., SADEGHIPOUR, S., 2014. Experimental investigation on the thermo-physical properties of Al₂O₃ nanoparticles suspended in car radiator coolant, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 54:48-53 (2014).

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

ESFE, M. H., YAN W., AKBARI, M., KARIMIPOUR, A., HASSANI, M., Experimental study on thermal conductivity of DWCNT-ZnO/water-EG nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 68, 248–251 (2016).

EVANS, W., FISH, J., KEBLINSKI, P., Role of Brownian motion hydrodynamics on nanofluid thermal conductivity, *Applied Physics Letters* 88: 093116 (2006).

EVANS, W., PRASHER, R., FISH, J., MEAKIN, P., PHELAN, P., KEBLINSKI, P., Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51: 1431-1438 (2008).

FONTES, D.H., RIBATSKI, G., BANDARRA FILHO, E.P.B., Experimental evaluation of thermal conductivity, viscosity and breakdown voltage AC of nanofluids of carbon nanotubes and diamond in transformer oil, *Diamond & Related Materials*, 58, 115–121 (2015).

GHOZATLOO, A., SHARIATY-NIASAR, M., RASHIDI, A.M., Preparation of nanofluids from functionalized Graphene by new alkaline method and study on the thermal conductivity and stability, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42, 89–94 (2013).

HAJJAR, Z., RASHIDI, A.M., GHOZATLOO, A., Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 128–131 (2014).

HAMILTON, R.L., CROSSER, O.K., Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, I & EC Fundamentals I (1962).

HARANDI, S. S., KARIMIPOUR, A., AFRAND, M., AKBARI, M., D'ORAZIO, A., An experimental study on thermal conductivity of F-MWCNTs–Fe₃O₄/EG hybrid nanofluid: Effects of temperature and concentration, International Communications in Heat and Mass Transfer 76, 171–177 (2016).

HERIS, S.Z., SHORGOZAR, M., POORPHARHANG, S., SHANBEDI, M., NOIE, S.H., Experimental study of heat transfer of a car radiator with CuO/ethylene glycol-water as a coolant, Journal of Dispersion Science and technology 35: 677-684 (2013).

HUANG, D., WU, Z., SUNDEN, B., Pressure drop and convective heat transfer of Al₂O₃/water and MWCNT/water nanofluids in a chevron plate heat exchanger, International Journal of Heat and Mass Transfer 89: 620-626 (2015).

HUSSEIN, A.M., BAKAR, R.A., KADIRGAMA, K., 2014. H Study of forced convection nanofluid heat transfer in the automotive cooling system, Case Studies in Thermal Engineering 2: 50-61 (2014).

HUSSEIN, A.M., BAKAR, R.A., KADIRGAMA, K., SHARMA, K.V., Heat transfer enhancement using nanofluids in an automotive cooling system, International Communications in Heat and Mass Transfer 53: 195-202 (2014).

HWANG, Y., LEE, J.K., LEE, C.H., JUNG, Y.M., CHEONG, S.I., LEE, C.G., KU, B.C., JANG, S.P., Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids, Thermochimica Acta 455: 70–74 (2007).

IJAM, A., SAIDUR, R., Nanofluid as a coolant for electronic devices (cooling of electronic devices), Applied thermal engineering 32:76-82 (2012).

JACKSON, J., Investigation into the pool-boiling characteristics of gold nanofluids, M.S. thesis, University of Missouri-Columbia, Columbia, Mo, USA, (2007).

JANG, S.P., CHOI, S.U.S., Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, Applied Physics Letters 84: 4316-4319 (2004).

JEONG, J., LI, C., KWON, Y., LEE, J., KIM, S.H., YUN, R., Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nanofluids, *International journal of refrigeration* 36, 2233-2241 (2013).

JIANG, H., LI, H., SHI, L., Effective thermal conductivity of nanofluids considering interfacial nano-shells, *Materials Chemistry and Physics* 148: 195-200 (2014).

KANNAN, C., SINGH, R.J., T., VINOTH, M., VIJAYAKUMAR, T., An experimental study on the influence of operating parameters on the heat transfer characteristics of an automotive radiator with nanofluids, *International Journal of Recent Trends in Mechanical Engineering* 2:7-11 (2014).

KARAMI, M., AKHAVAN BAHABADI, M.A., DELFANI, S., GHOZATLOO, A., A new application of carbon nanotubes nanofluids working fluid of low temperature direct absorption solar collector, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 121:114-118 (2014).

KEBLINSKI, P., PHILLPOT, S.R., CHOI, S.U.S., EASTMAN, J.A., Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45: 855-863 (2002).

KIM, S.J., BANG, I.C., BUONGIORNO, J., HUB, L.W., Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50: 4105–4116 (2007).

KLEINSTREUER, C., LI, J., KOO, J., Microfluidics of nano-drug delivery,” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51: 5590–5597 (2008).

LEONG, K.Y., SAIDUR, R., KAZI, S.N., MAMUNC, A.H., 2010, Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator), *Applied Thermal Engineering* 30: 2685-2692 (2010).

LEONG, K.C., YANG, C., MURSHED, S.M.S., A model for the thermal conductivity of nanofluids – the effect of interfacial layer, *Journal of Nanoparticle Research* 8: 245–254 (2006).

LI, H., WANG, L., HE, Y., HU, Y., ZHU, J., JIANG, B., Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, 88, 363–368 (2015).

LU, K., ZHAO, J., Equiaxed zinc oxide nanoparticle synthesis, *Chemical Engineering Journal* 160: 788–793 (2010).

MA, H.B., WILSON, C., YU, Q., PARK, K., CHOI, S.U.S., TIRUMALA, M., An experimental investigation of heat transport capability in a nanofluid oscillating heat pipe, *Journal of Heat Transfer* 128: 1213–1216 (2006).

MADHESH, D., KALAISELVAM, S., Experimental study on the heat transfer and flow properties of Ag-ethylene glycol nanofluid as a coolant, *Heat Mass Transfer* 50: 1597–1607 (2014).

MAXWELL, J.C., *A treatise on Electricity and Magnetism*, 2nd. Ed., Oxford University, Cambridge (1873).

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

MOTTA, F.C., Caracterização da condutividade térmica, viscosidade dinâmica e ângulo de contato de nanofluidos baseados em partículas de alumina-gama em água, 104 f., Tese (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (2012).

MUNKHBAYAR, B., BAT-ERDENE, M., OCHIRKHUYAG, B., SARANGEREL, D., BATTSENGEL, B., CHUNG, H., JEONG, H., An experimental study of the planetary ball milling effect on dispersibility and thermal conductivity of MWCNTs-based aqueous nanofluids, *Materials Research Bulletin*, 47, 4187–4196 (2012).

NAMBEESAN, K.P.V., PARTHIBAN, R., RAM KUMAR, K., ATHUL, U.R., VIVEK, M., THIRUMALINI, S., Experimental study of heat transfer enhancement in automobile radiator using Al₂O₃/water-ethylene glycol nanofluid coolants, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 12: 2857–2865 (2015).

NGUYEN, C.T., ROY, G., GAUTHIER, C., GALANIS, N., Heat transfer enhancement using Al_2O_3 -Water nanofluid for an electronic liquid cooling system, *Applied Thermal Engineering* 27:1501-1506 (2007).

NIKKAM, N., SALEEMI, N., HAGHIGHI, E.B., GHANBARPOUR, M., KHODABANDEH, R., MUHAMMED, M., PALM, B., TOPRAK, M.S., Fabrication, characterization and thermophysical property evaluation of SiC nanofluids for heat transfer applications, *Nano-Micro Letters* 6: 178-189 (2014).

PARASHURAMA, M.S., DHANANJAYA, D.A., NAVEENAKUNAR, R.R., Experimental study of heat transfer in a radiator using nanofluid, *International Journal of Engineering Development and Research* 3: 307-311 (2015).

PAUL, G., CHOPKAR, M., MANNA, I., DAS, P.K., Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 1913-1924 (2010).

PEYGHAMBARZADEH, S.M., HASHEMABADI, S.H., SEIFI JAMNANI, M., HOSEINI, S.M., Improving the cooling performance of automobile radiator with Al_2O_3 /water nanofluid, *Applied Thermal Engineering* 31: 1833-1838 (2011).

PEYGHAMBARZADEH, S.M., HASHEMABADI, S.H., NARAKI, M., VERMAHMOUDI, Y., Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator, *Applied Thermal Engineering* 52: 8-16 (2013).

ROUTBORT, J., Development and Demonstration of Nanofluids for Industrial Cooling Applications, Argonne National Lab, Michellin North America, St. Gobain Corp., (2009).

SELVAKUMAR, P., SURESH, S., Convective performance of CuO /Water nanofluid in an electronic heat sink, *Experimental Thermal and Fluid Science* 40:57-63 (2012).

SEREBRYAKOVA, M.A., DIMOV, S.V., BARDAKHANOV, S.P., NOVOPASHIN, S.A., Thermal conductivity, viscosity and rheology of a suspension based on Al_2O_3 nanoparticles and mixture of 90% ethylene glycol and 10% water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, 187–191 (2015).

SINGH, D., TOUTBORT, J., CHEN, G., Heavy vehicle systems optimization merit review and peer evaluation, Annual Report, Argonne National Laboratory (2006).

SOLTANIMEHR, M., AFRAND, M., Thermal conductivity enhancement of COOH-functionalized MWCNTs/ethylene glycol–water nanofluid for application in heating and cooling systems, Applied Thermal Engineering, (2016).

SPANHEL, L., ANDERSON, M.A., Semiconductor clusters in the sol–gel process—quantized aggregation, gelation, and crystal-growth in concentrated ZnO colloids, Journal of American Chemical Society 113: 2826–2833 (1991).

SUNDAR, L.S., HORTIGUELA, M.J., SINGH, M.K., SOUSA, A.C.M., Thermal conductivity and viscosity of water based nanodiamond (ND) nanofluids, An experimental study, International Communications in Heat and Mass Transfer, 76, 245–255 (2016).

SUNDAR, L.S., RAMANA, E.V., GRAÇA, M.P.F., SINGH, M.K., SOUSA, A.C.M., Nanodiamond-Fe₃O₄ nanofluids: Preparation and measurement of viscosity, electrical and thermal conductivities, International Communications in Heat and Mass Transfer, 73, 62–74 (2016).

SUNDAR, L.S., RAMANA, E.V., SINGH, M.K., SOUSA, A.C.M., Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al₂O₃ nanofluids for heat transfer applications: Na experimental study, International Communications in Heat and Mass Transfer, 56, 86–95 (2014).

TAYLOR, B.H., KYUATT, C.E., Guidelines for evaluation and expressing the uncertainty of NIST measurement results, NIST Technical note 1297 (1994)

TIMOFEEVA, E.V., YU, W., FRANCE, D.M., SINGH, D., ROUTBORT, J.L., Base fluid and temperature effects on the heat transfer characteristics of SiC in ethylene glycol/H₂O and H₂O nanofluids, Journal of Applied Physics 109: 104914 (2011).

TOMAR, B.P.S., TRIPATHI, A., Experimental study of heat transfer of a car radiator with nano fluid – Al₂O₃/water mixture as a coolant, International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology 2: 830-837 (2015).

TZENG, S.C., LIN, C.W., HUANG, K.D., Heat transfer enhancement of nanofluids in Rotary blade coupling of four-wheel-drive vehicles, *Acta Mechanica* 179: 11-23 (2005).

USRI, N.A., AZMI, W.H., MAMAT, R., ABDUL HAMID, K., Forced convection heat transfer using water-ethylene glycol (60:40) based nanofluids in automotive cooling system, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 11:2747-2755 (2015).

UTOMO, A.T., POTH, H., ROBBINS, P.T., PACEK, A.W., Experimental and theoretical studies of thermal conductivity, viscosity and heat transfer coefficient of titania and alumina nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 7772–7781 (2012).

WANG, B.X., ZHOU, L.P., PENG, X.F., A fractal model for predicting thermal conductivity of liquid with suspended nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46: 2655-2672 (2003).

WEN, D., Nanofuel as a potential secondary energy carrier, *Energy & Environmental Science*, ID: 10.1039/b906384f (2010).

XIE, H., FUJII, M., ZHANG, X., Effect of interfacial layer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48: 2926-2932 (2005).

XIE, H., ZHAO Z., ZHAO J., GAO H., Measurement of thermal conductivity, viscosity and density of ionic liquid [EMIM][DEP]-based nanofluids, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24: 331–338 (2016).

XING. M., YU J., WANG, R., Experimental study on the thermal conductivity enhancement of water based nanofluids using different types of carbon nanotubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, 609–616 (2015).

XUE, Q., XU, W.M.; A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells; *Materials Chemistry and Physics* 90: 298-301 (2005).

YAN, J.F. LIU, J. Nanocryosurgery and its mechanisms for enhancing freezing efficiency of tumor tissues, *Nanomedicine* 4, no. 1: 79–87 (2008).

YU, W., CHOI, S.U.S., The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research* 6: 355-361 (2004).

YU, W., XIE, H., LI, Y. CHEN, L., WANG, Q., Experimental investigation on the heat transfer properties of Al_2O_3 nanofluids using the mixture of ethylene glycol and water as base fluid, *Powder Technology* 230: 14-19 (2012).

ZARIFI, E., JAHANFARINA, G., Subchannel analysis of TiO_2 nanofluid as the coolant in VVER-1000 reactor, *Progress in Nuclear Energy* 37:140-152 (2014).

ZHU, H., LIN, Y., YIN, Y., A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids, *Journal of Colloid and Interface Science* 277: 100-103 (2004).

ANEXO I

CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Este anexo mostra as curvas de calibração dos sensores de temperatura. O software utilizado, LABVIEW, já possui funções integradas que calculam o valor da grandeza, no caso a temperatura, em função do sinal analógico de entrada. Desta forma, a calibração consistiu em uma correção dos valores avaliados pelo programa, visto que paralelo com o sensor estava um termômetro padrão no mesmo banho térmico durante a calibração. As curvas de calibração estão apresentadas nas Figs. A1.1 a A1.28.

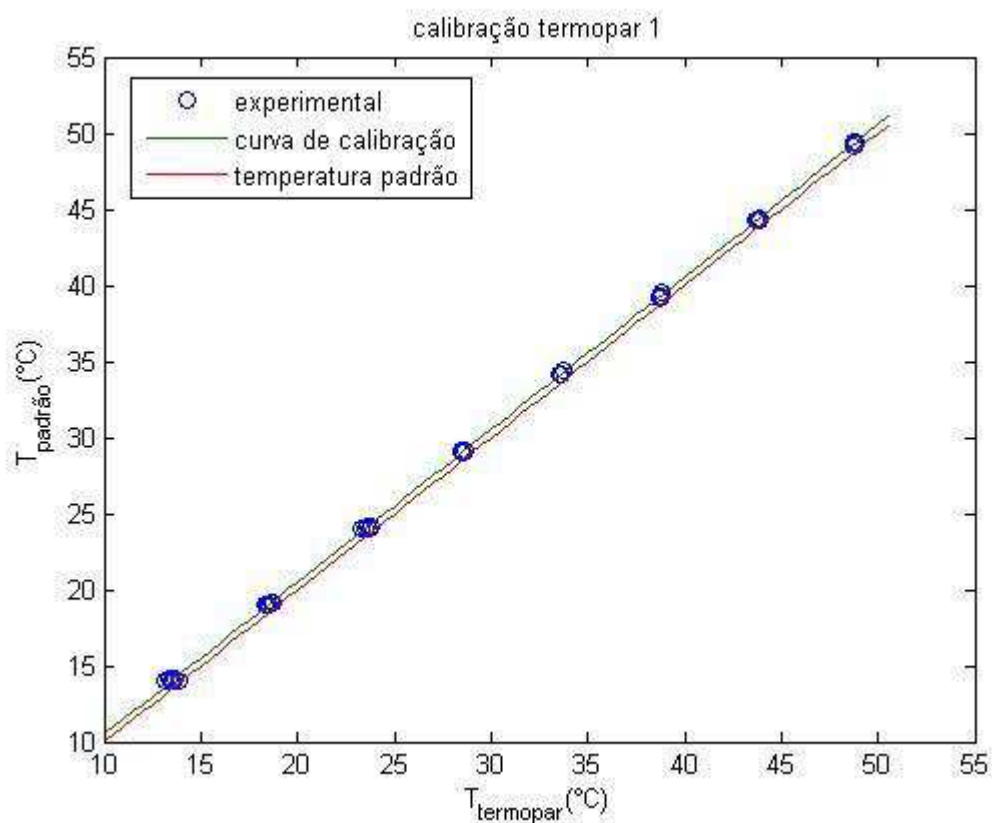


Figura A1.1 – Curva de calibração do termopar 1

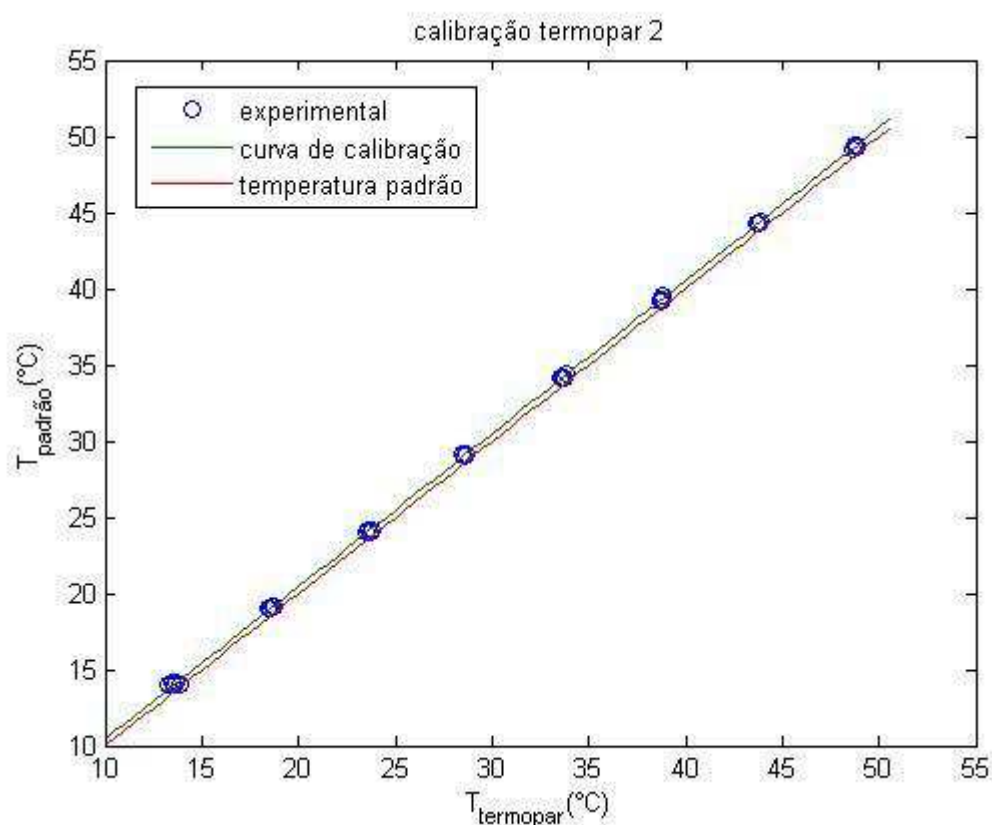


Figura A1.2 – Curva de calibração do termopar 2

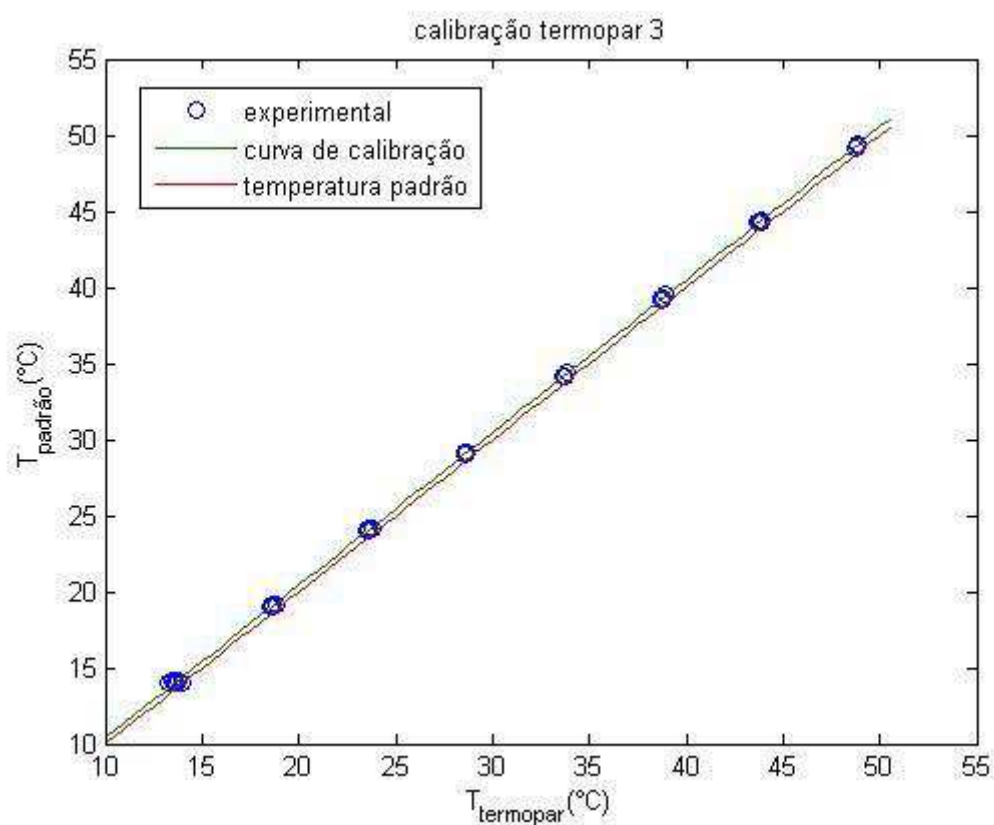


Figura A1.3– Curva de calibração do termopar 3

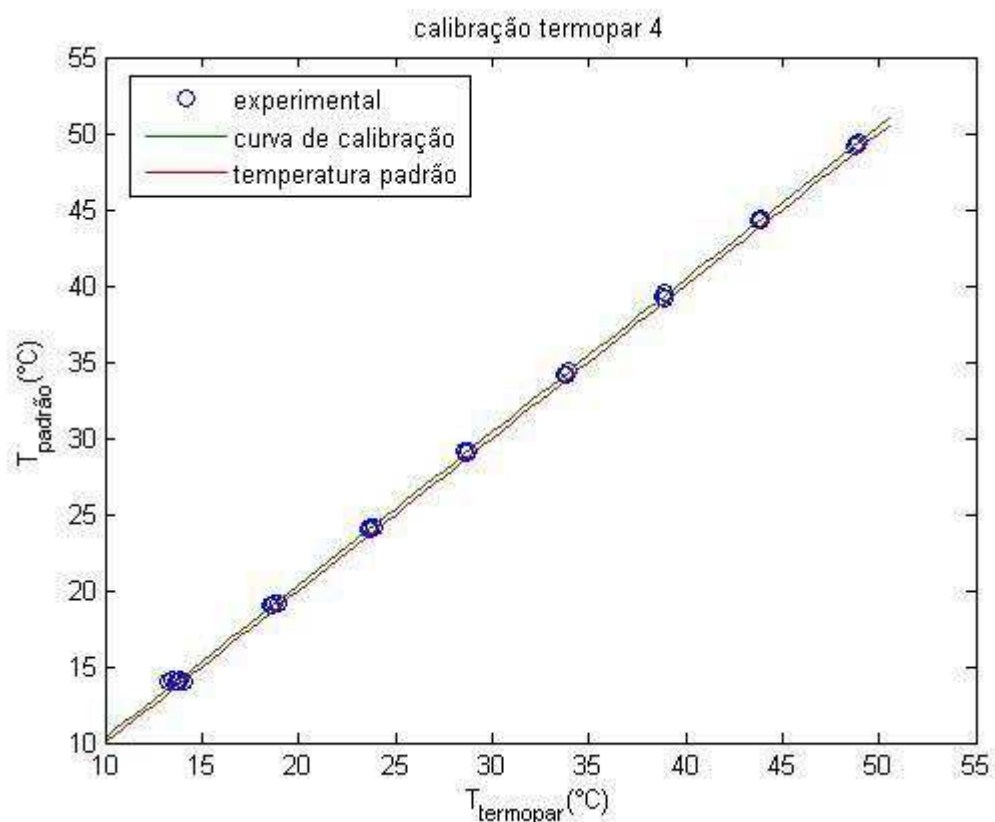


Figura A1.4– Curva de calibração do termopar 4

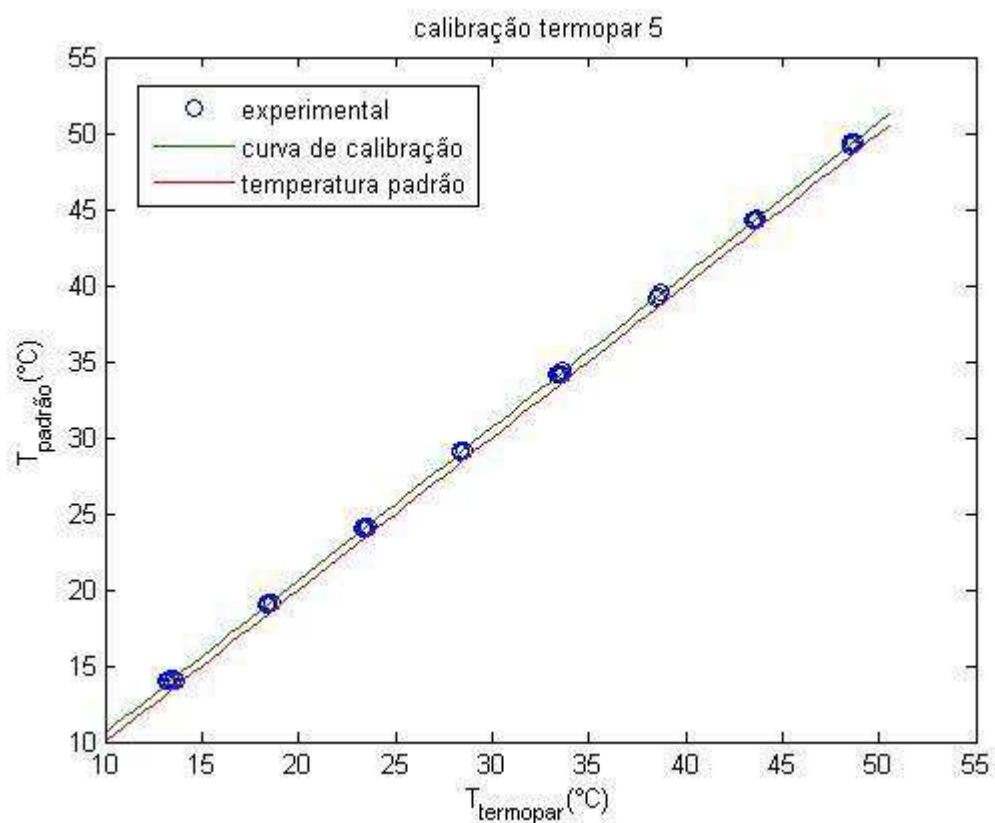


Figura A1.5– Curva de calibração do termopar 5

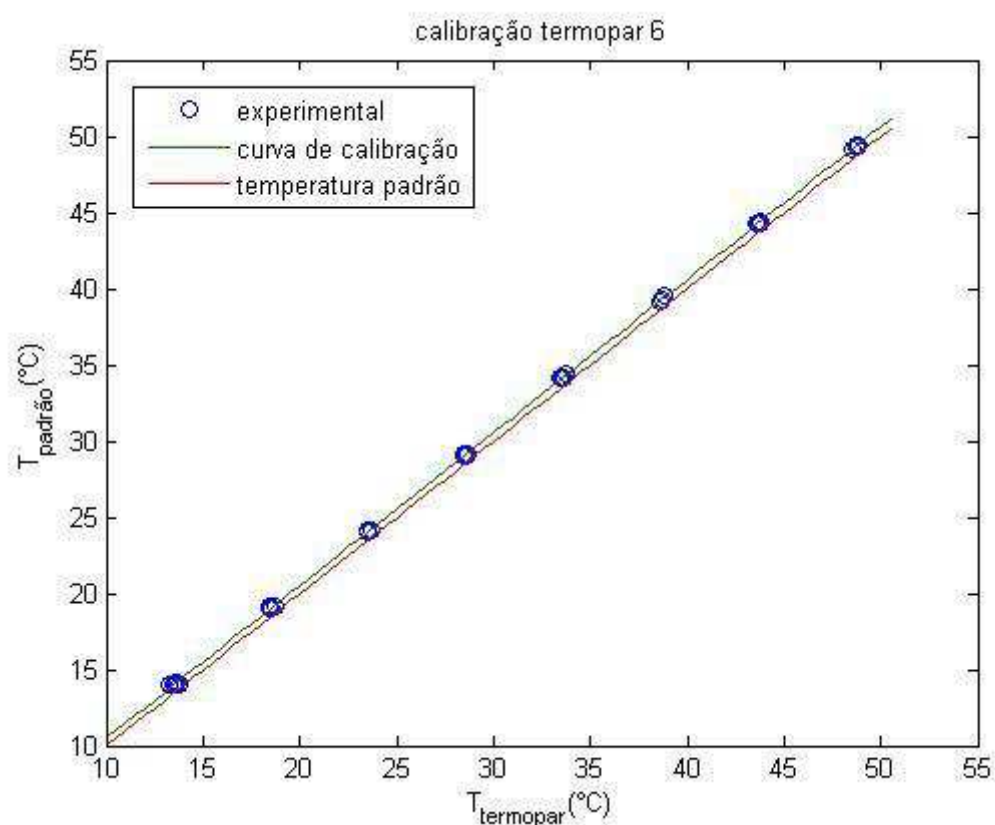


Figura A1.6 – Curva de calibração do termopar 6

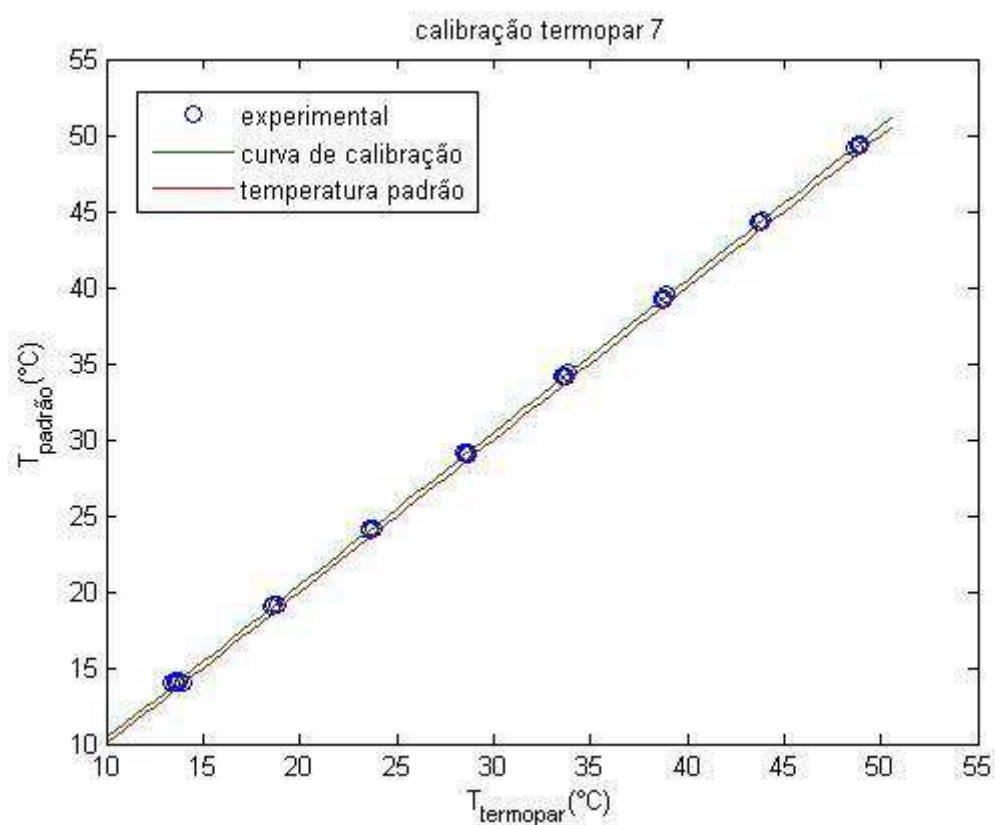


Figura A1.7 – Curva de calibração do termopar 7

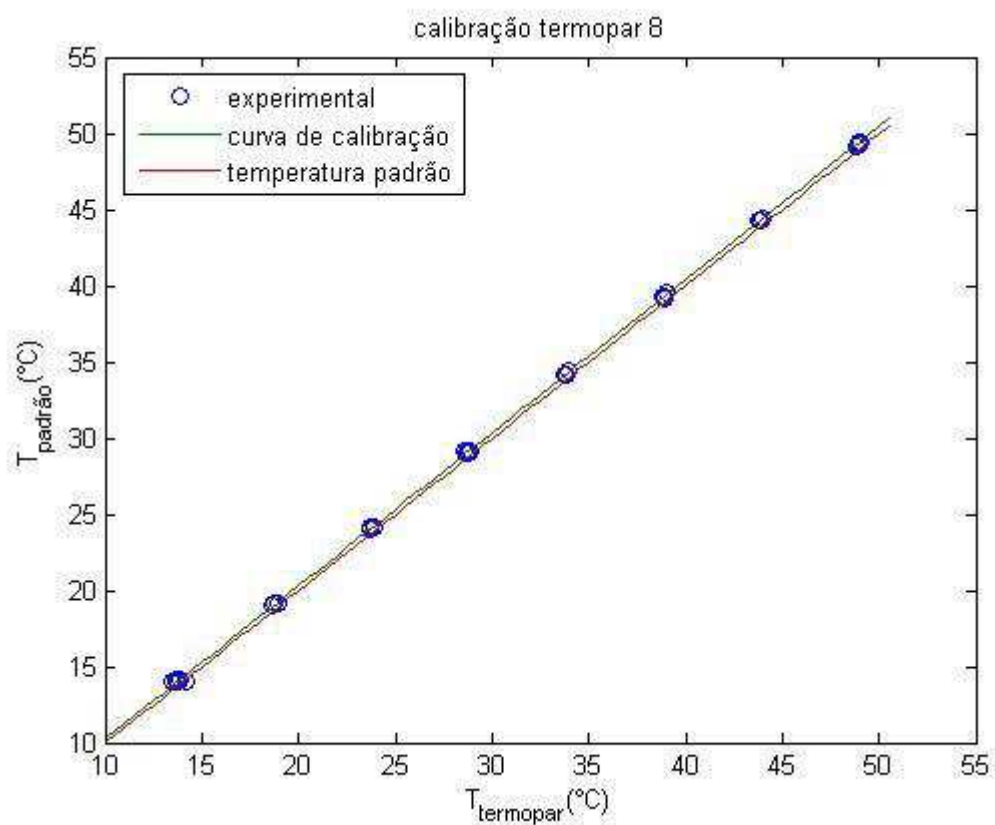


Figura A1.8 – Curva de calibração do termopar 8

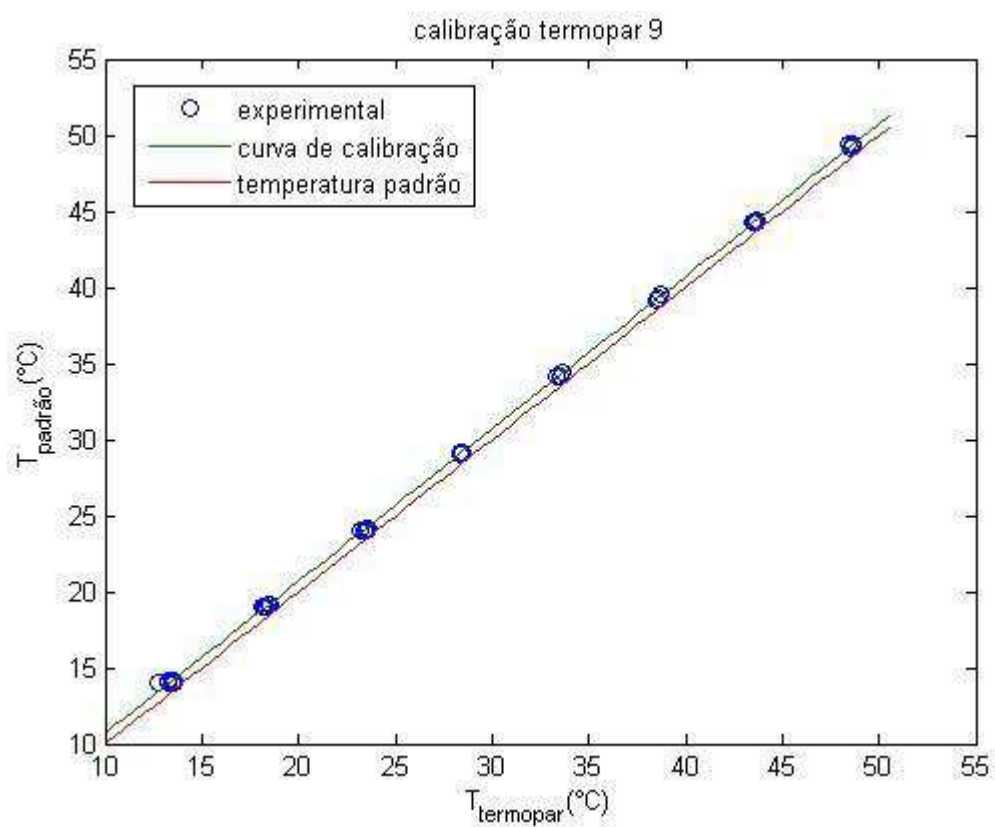


Figura A1.9 – Curva de calibração do termopar 9

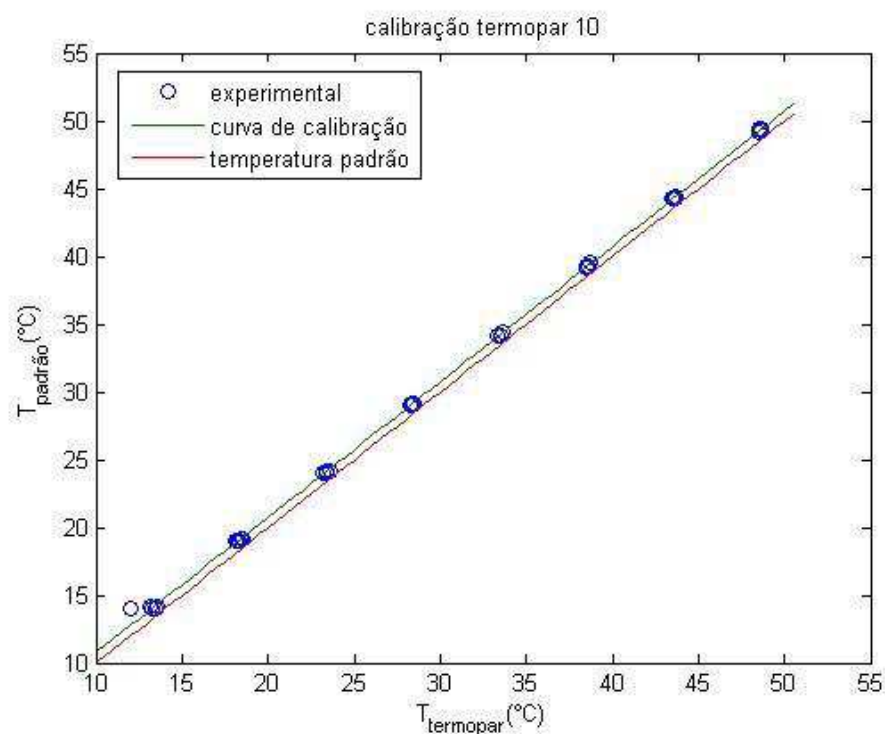


Figura A1.10– Curva de calibração do termopar 10

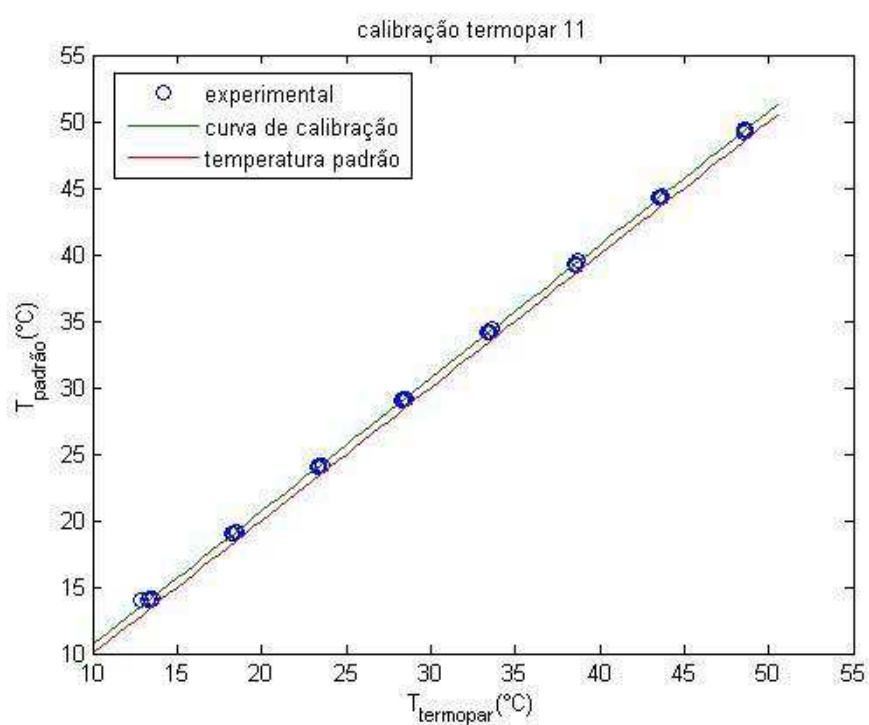


Figura A1.11– Curva de calibração do termopar 11

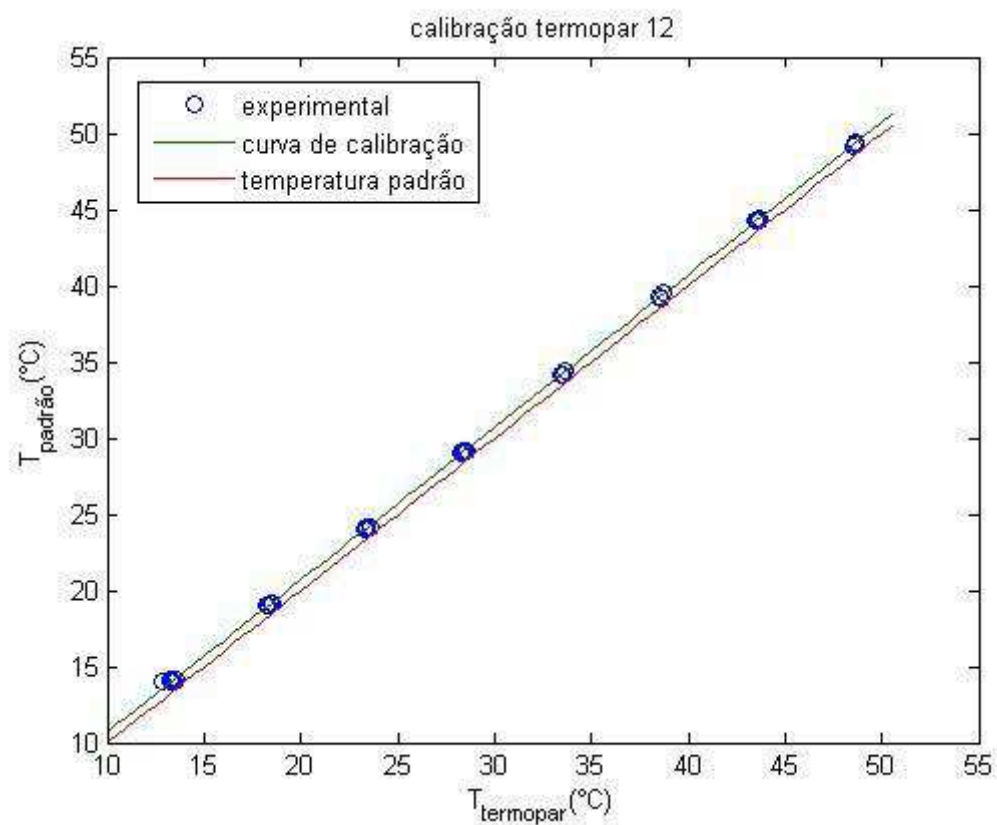


Figura A1.12 – Curva de calibração do termopar 12

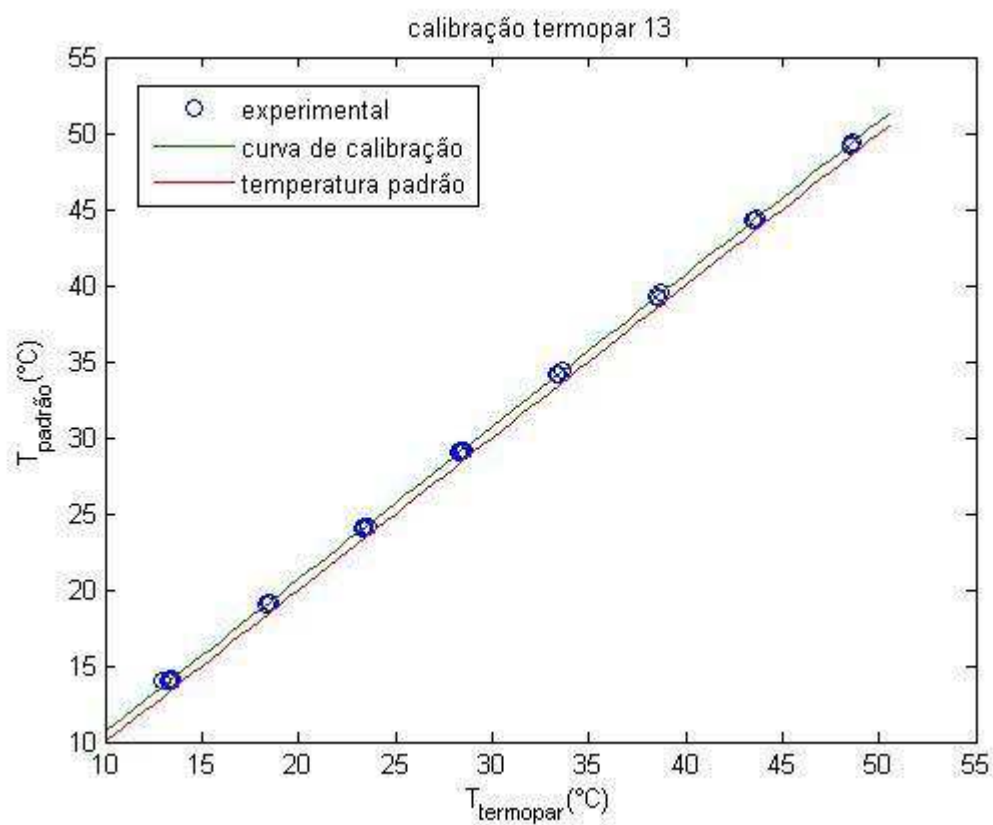


Figura A1.13 – Curva de calibração do termopar 13

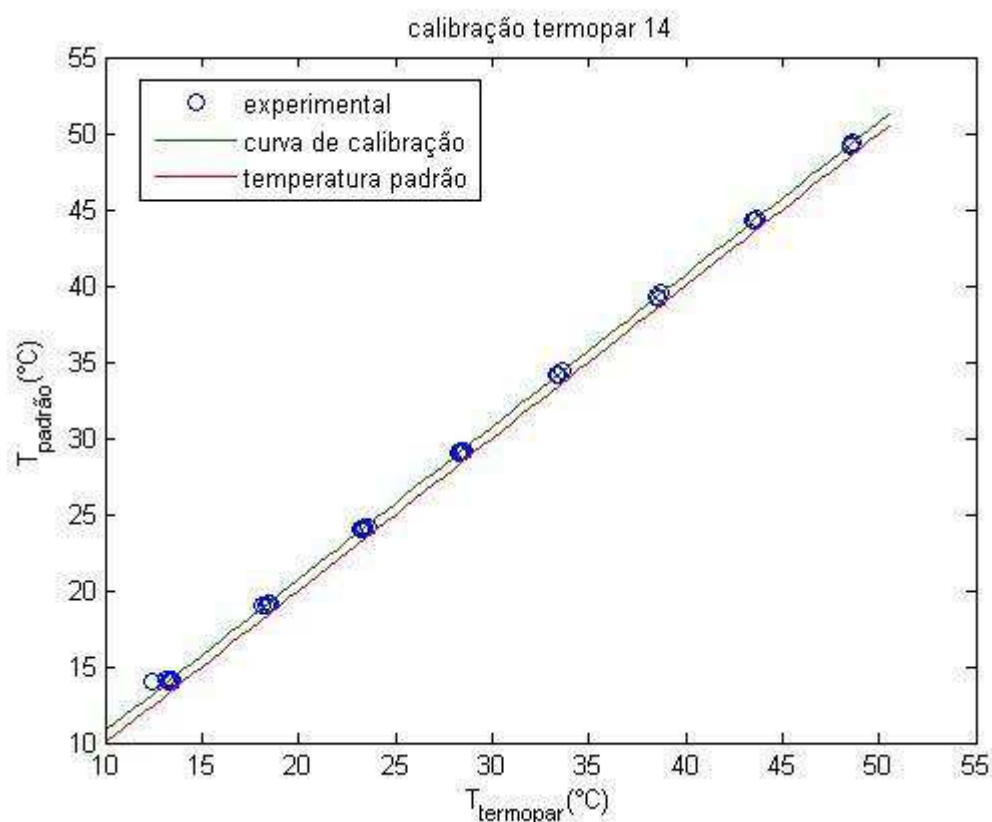


Figura A1.14 – Curva de calibração do termopar 14

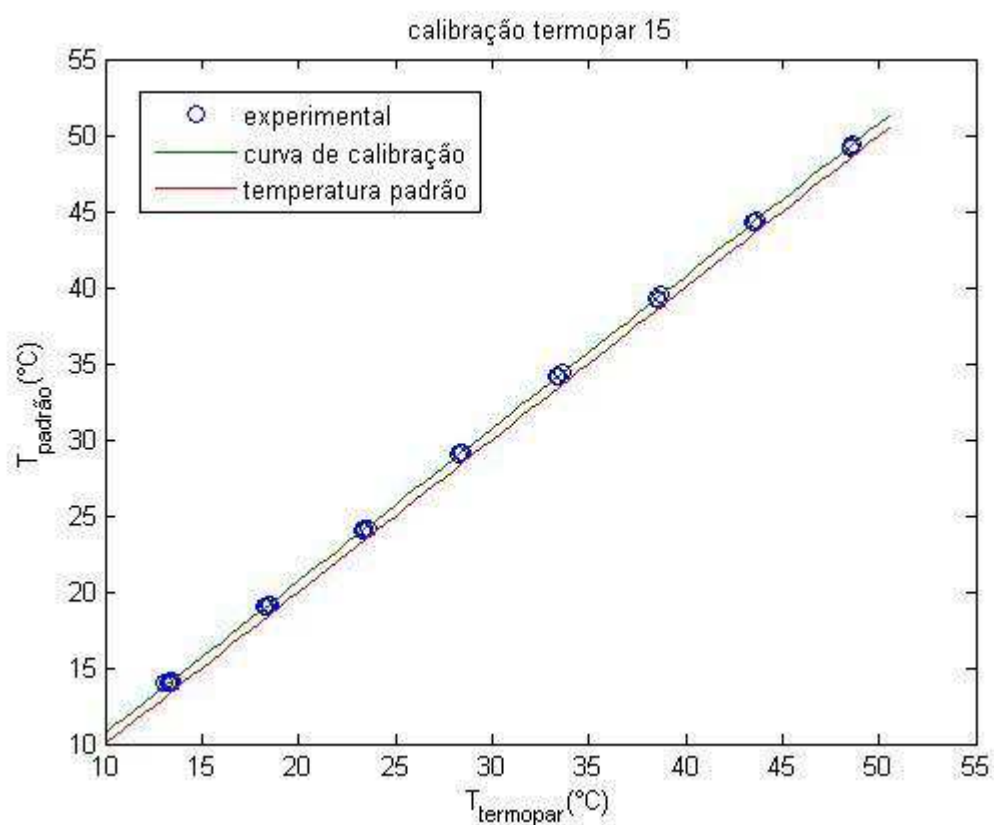


Figura A1.15 – Curva de calibração do termopar 15

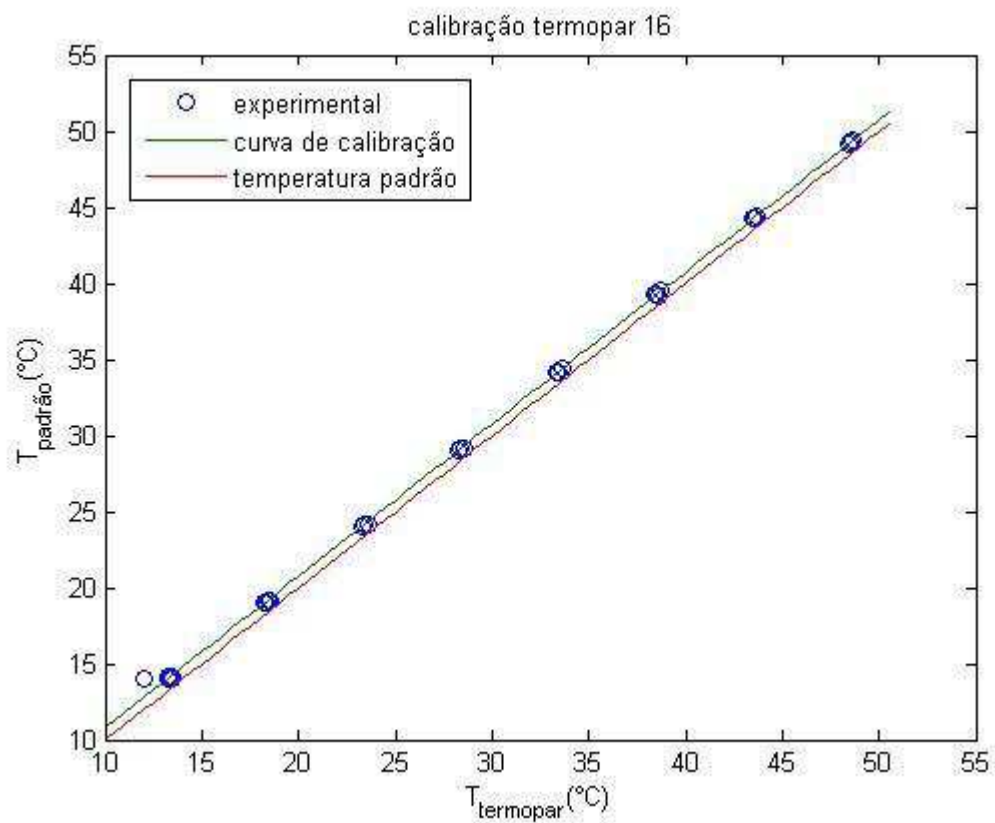


Figura A1.16 – Curva de calibração do termopar 16

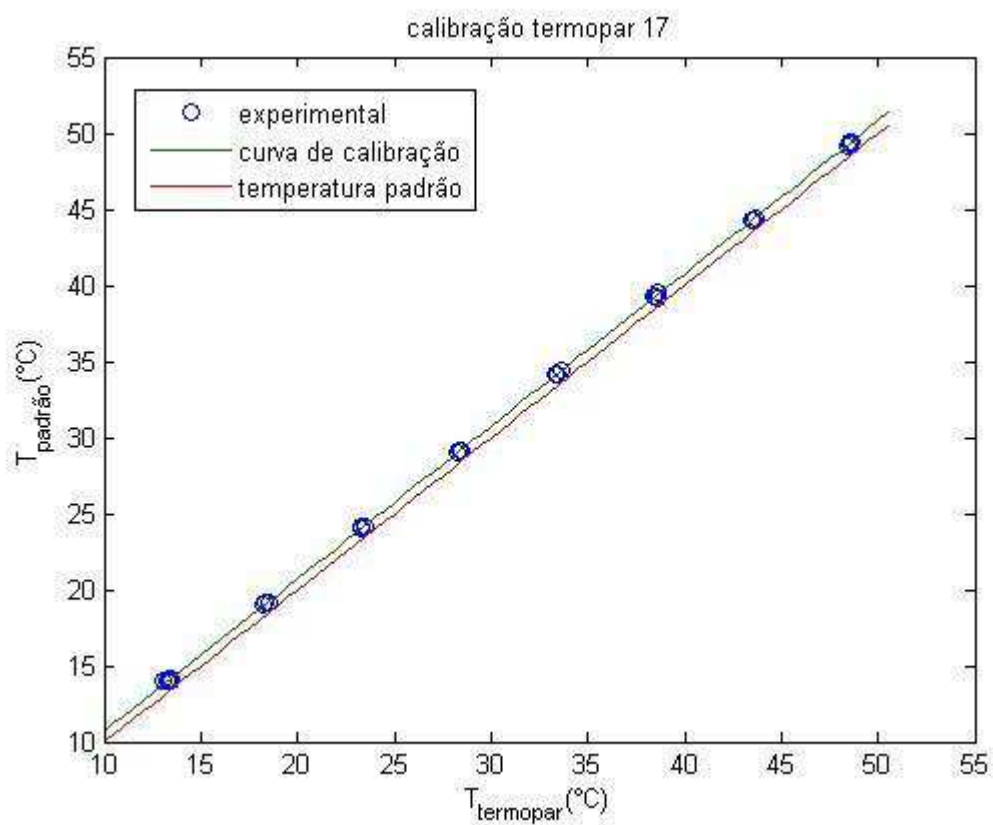


Figura A1.17 – Curva de calibração do termopar 17

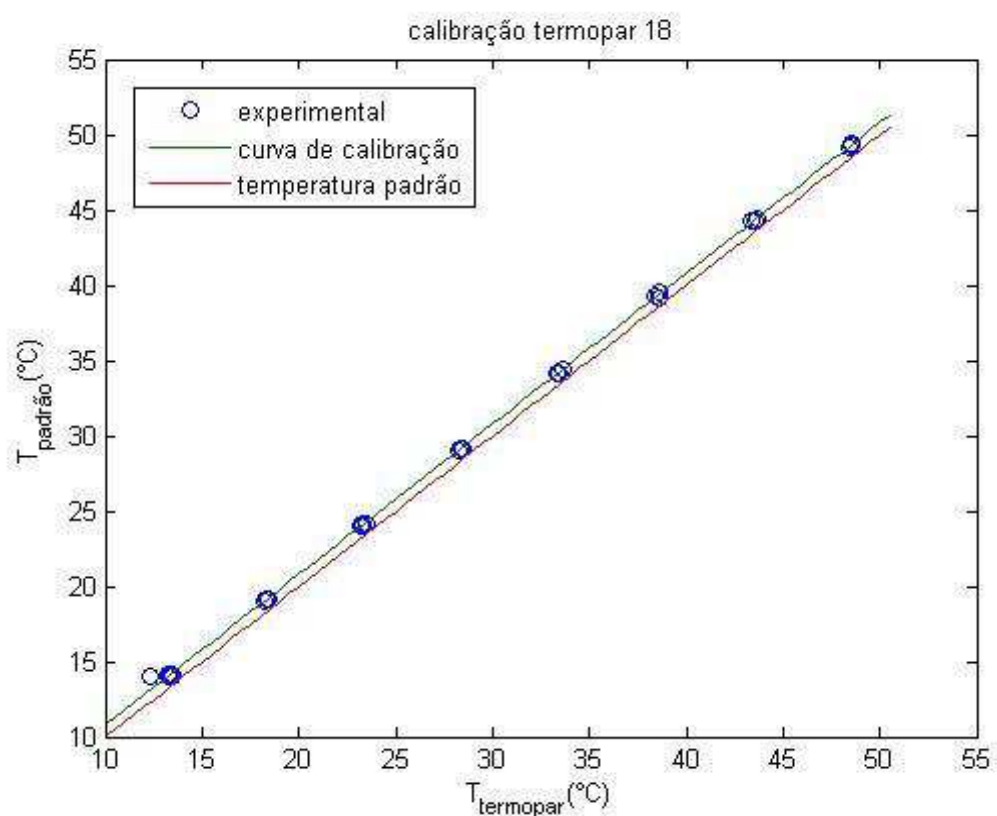


Figura A1.18 – Curva de calibração do termopar 18

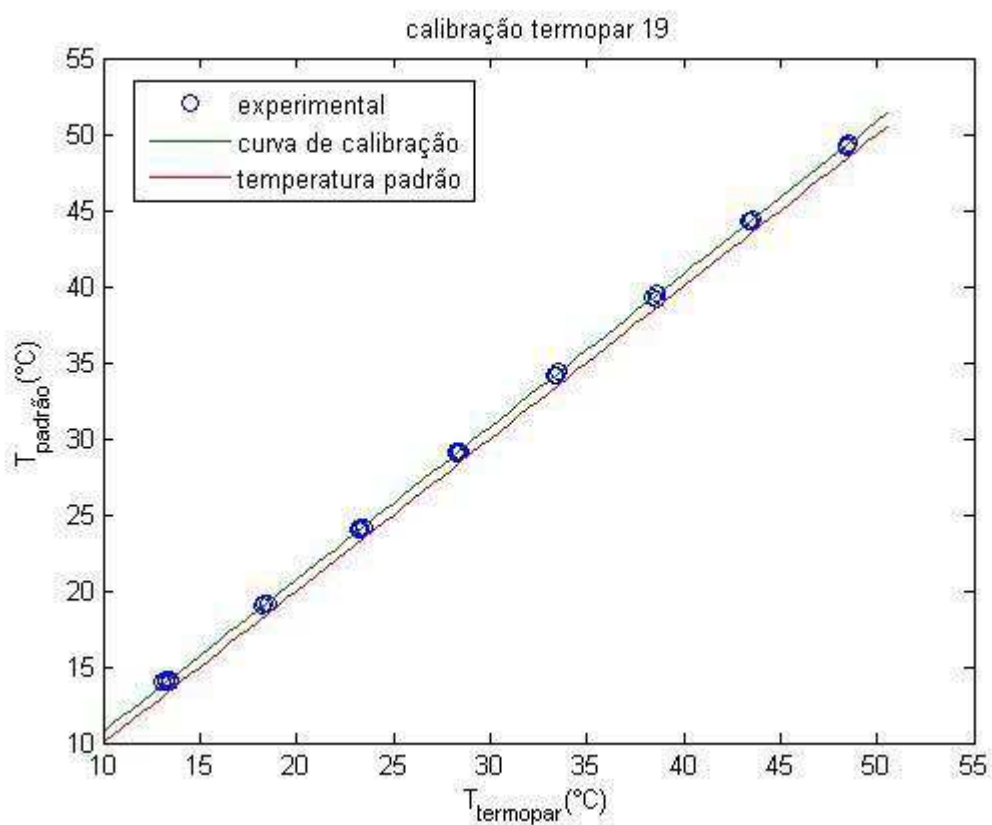


Figura A1.19 – Curva de calibração do termopar 19

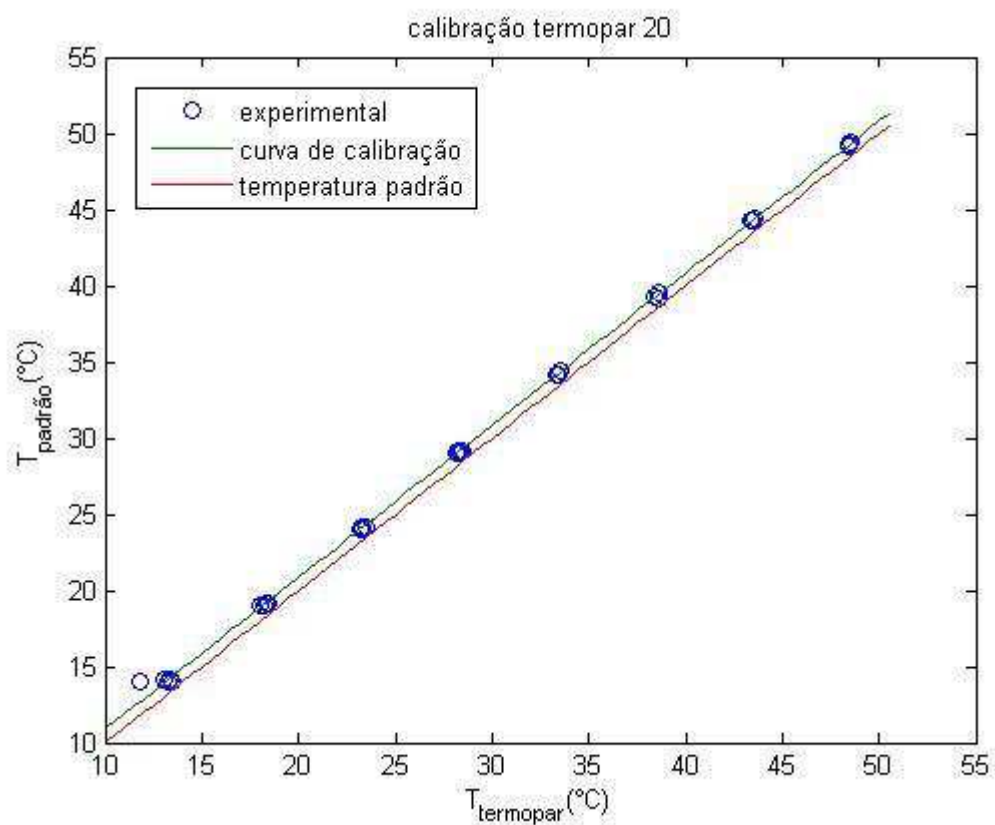


Figura A1.20 – Curva de calibração do termopar 20

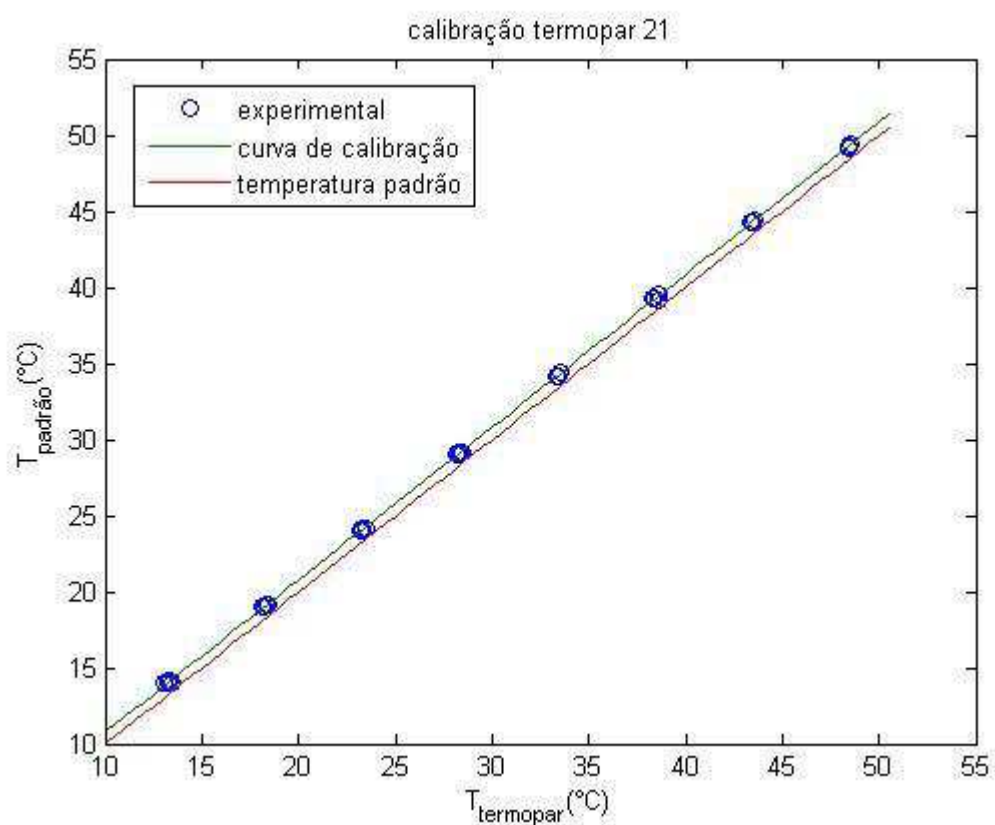


Figura A1.21 – Curva de calibração do termopar 21

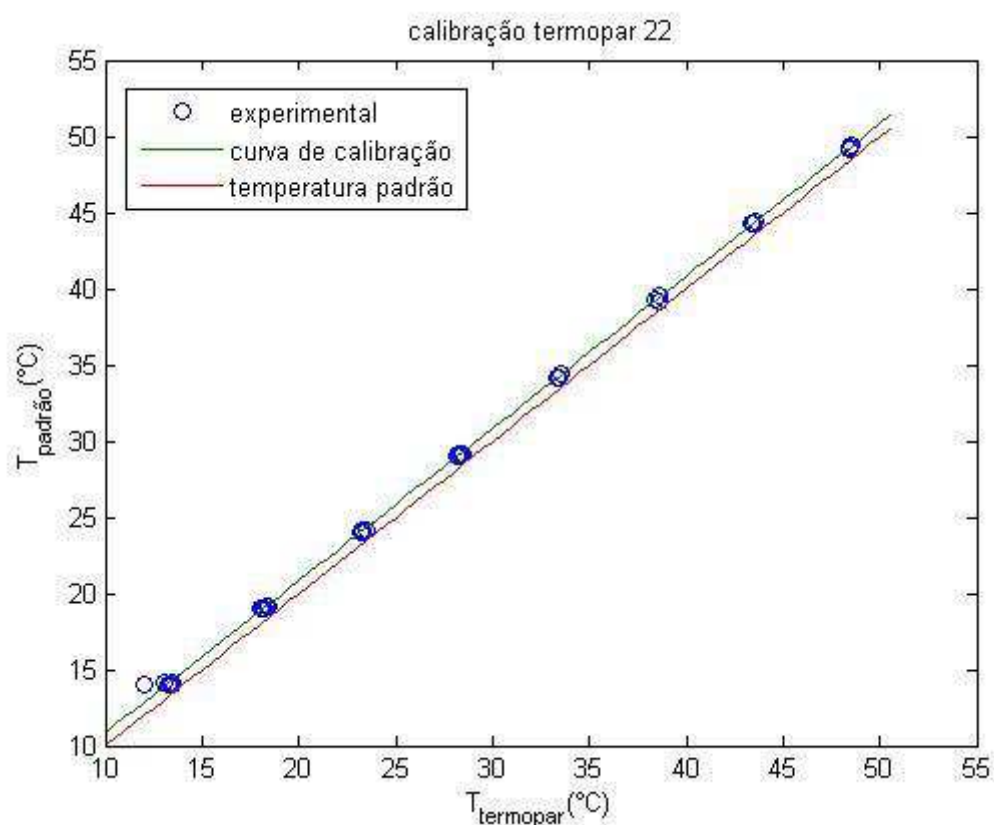


Figura A1.22 – Curva de calibração do termopar 22

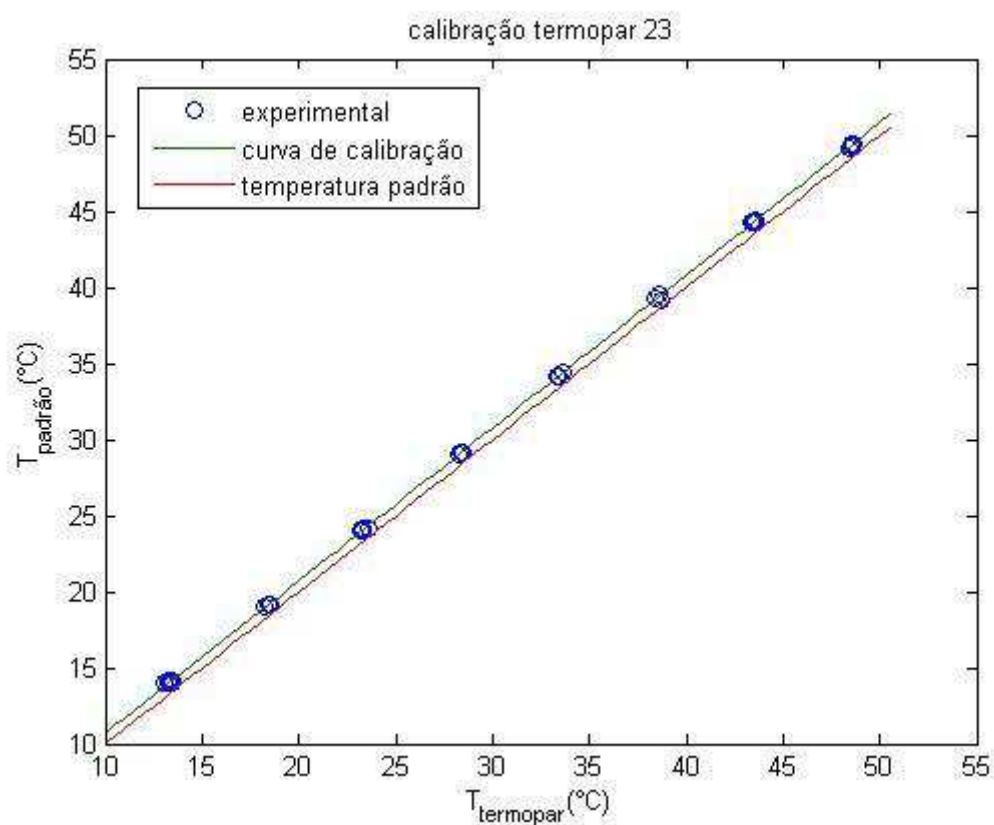


Figura A1.23 – Curva de calibração do termopar 23

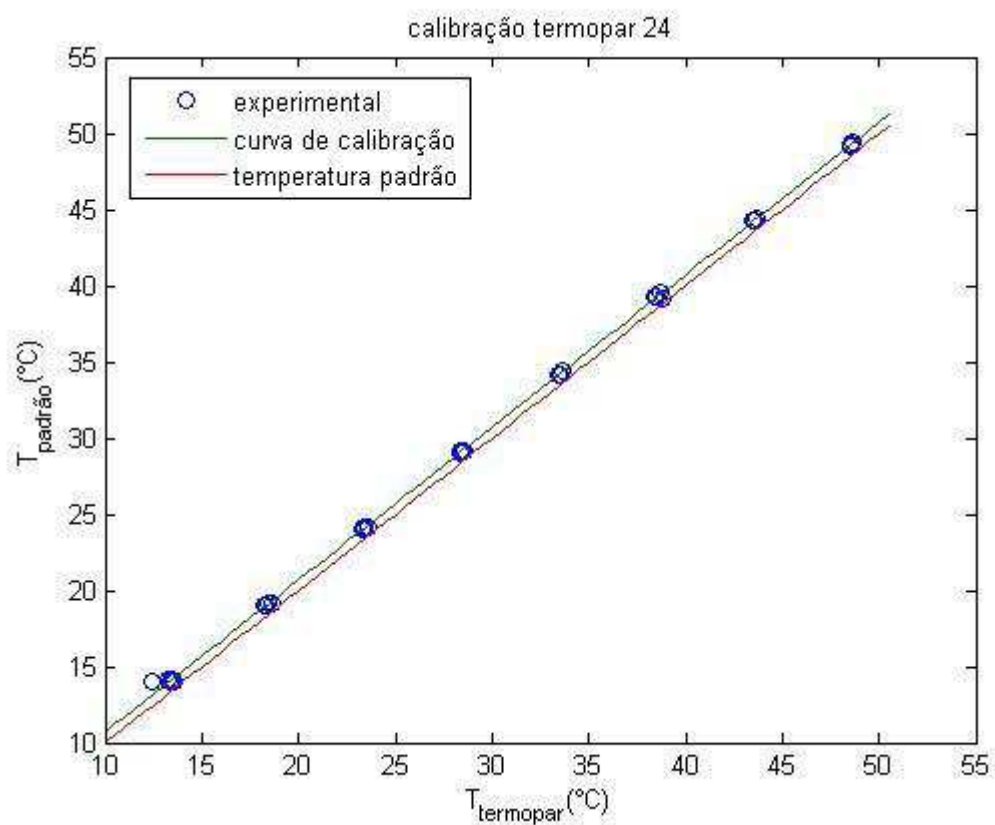


Figura A1.24 – Curva de calibração do termopar 24

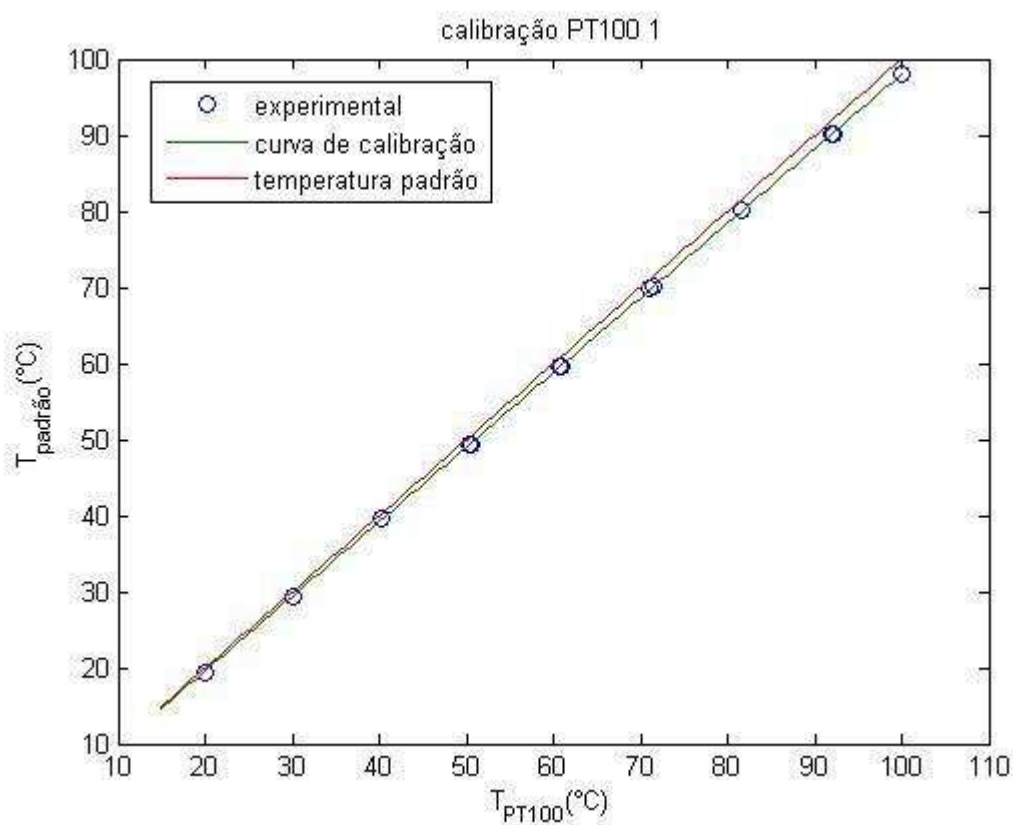


Figura A1.25 – Curva de calibração do PT100-1

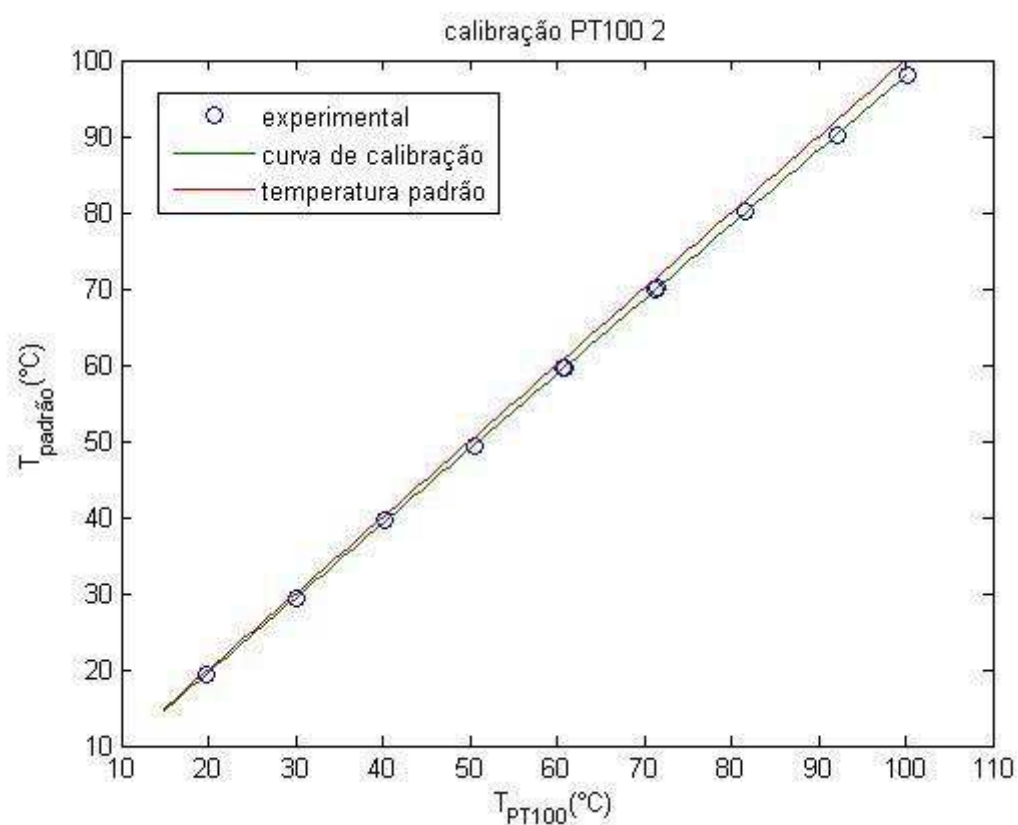


Figura A1.26 – Curva de calibração do PT100-2

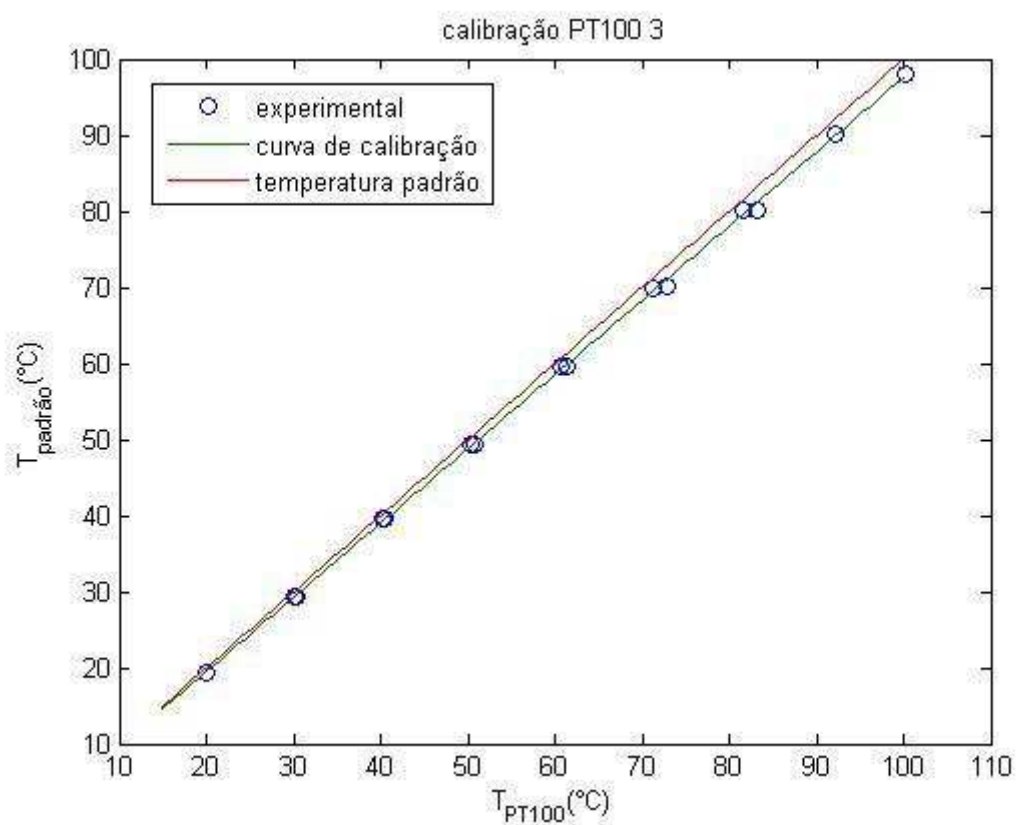


Figura A1.27– Curva de calibração do PT100-3

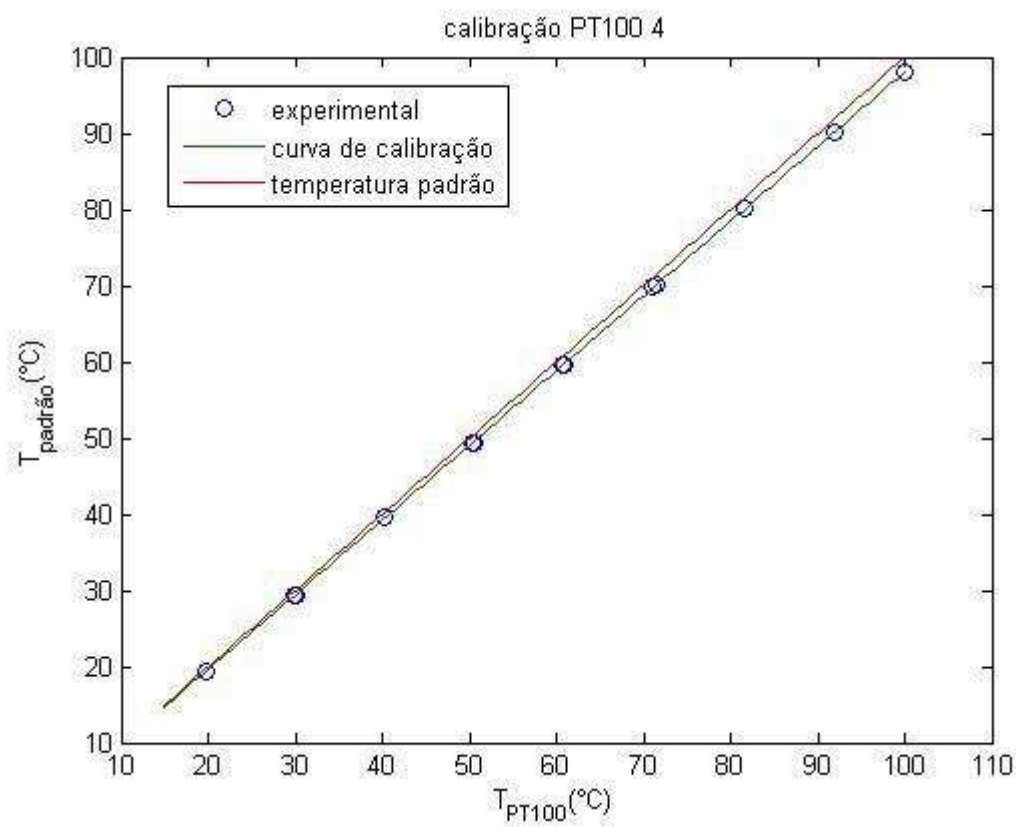


Figura A1.28– Curva de calibração do PT100-4

ANEXO II

GRADIENTE DE TEMPERATURA DO LÍQUIDO PARA OS ENSAIOS NOS RADIADORES

Radiador 1 (Palio, Nanofluidos MWCNT/ÁGUA)

As figuras A2.1 a A2.4 mostram o gradiente de temperatura do líquido em função da vazão mássica, para os nanofluidos de MWCNT/água, para os testes realizados no radiador de PALIO. Pode-se observar que a queda de temperatura dos nanofluidos foi inferior à do fluido base, para todos os testes. O nanofluido de concentração 0,16% foi o que obteve o pior desempenho, apresentando menor capacidade de resfriamento. O gradiente de temperatura diminuiu com o incremento da concentração de nanopartículas. Por outro lado, apresentou uma tendência de se estabilizar caso houvesse um aumento ainda maior na vazão mássica.

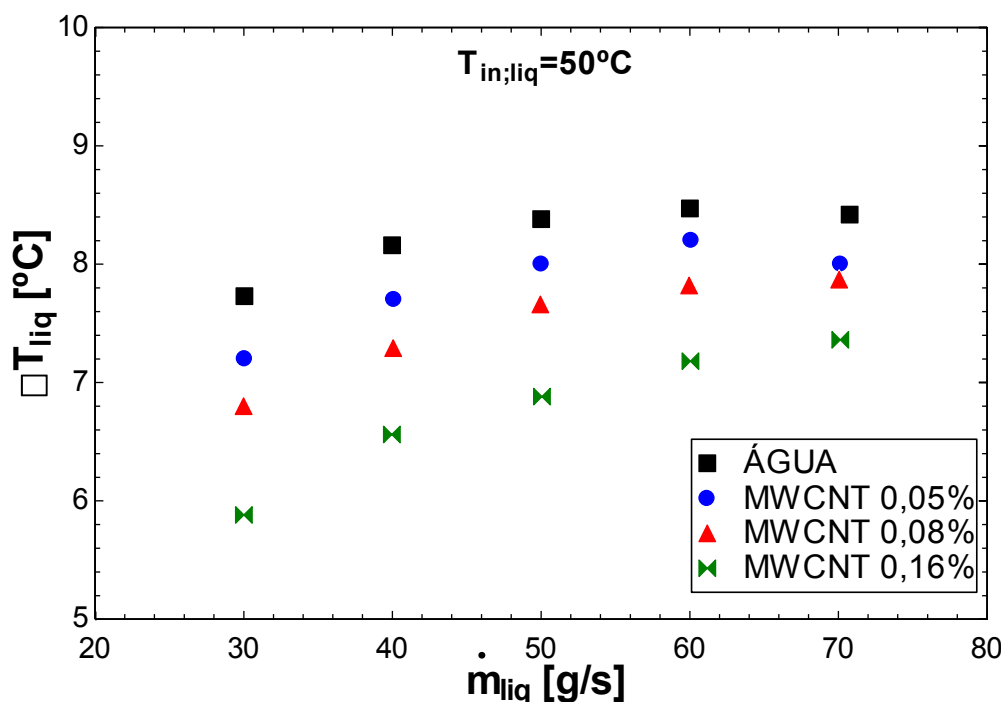


Figura A2.1– Gradiente de temperatura para os nanofluidos de MWCNT/água para a temperatura de entrada 50°C .

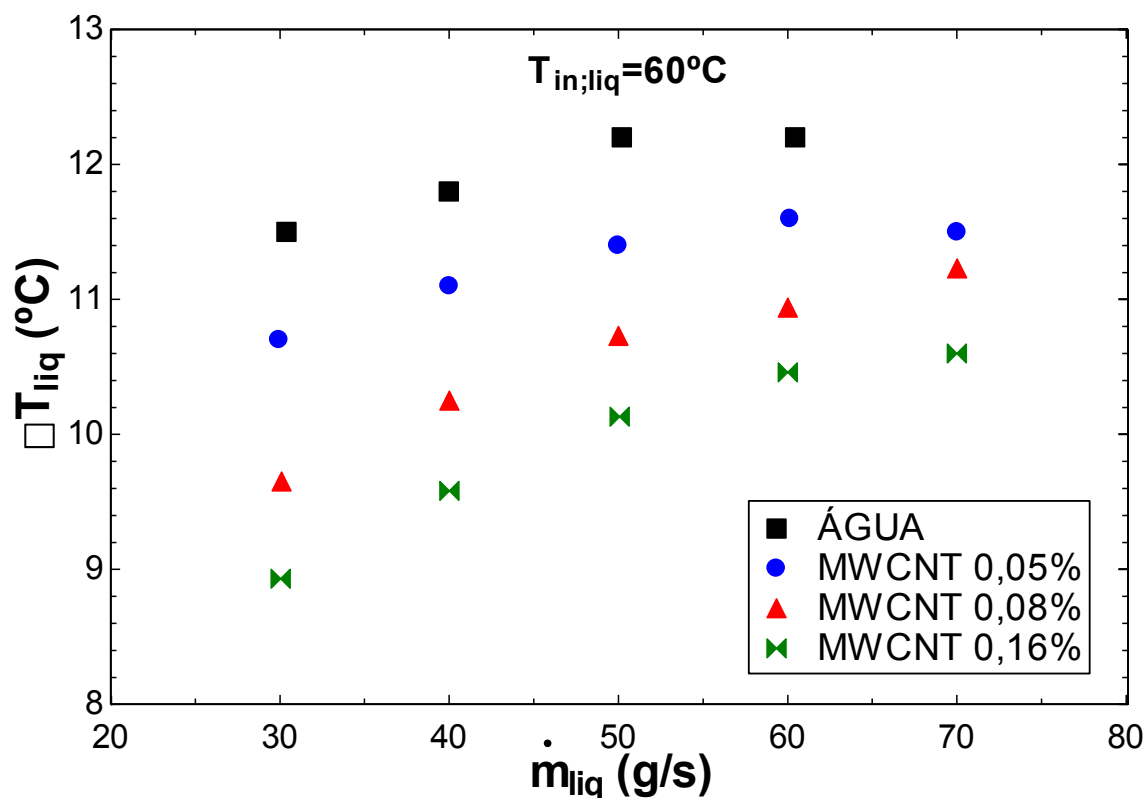


Figura A2.2– Gradiente de temperatura para os nanofluidos de MWCNT/água para a temperatura de entrada 60°C.

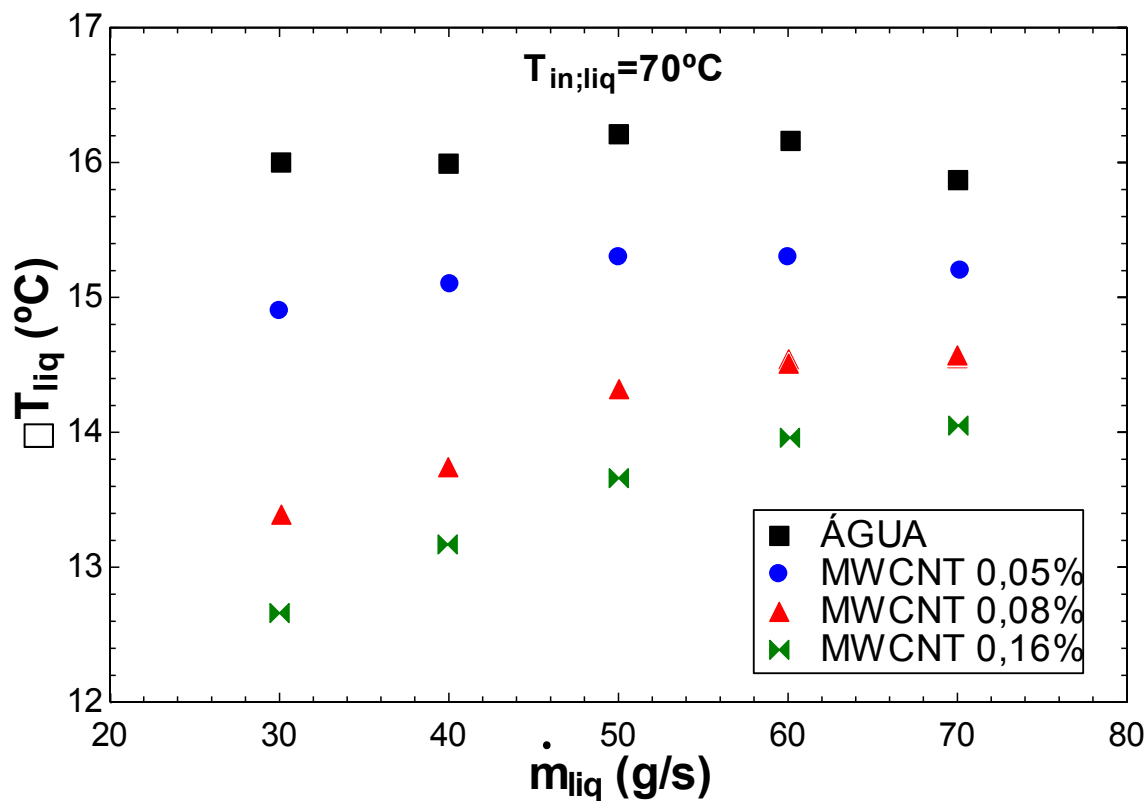


Figura A2.3 – Gradiente de temperatura para os nanofluidos de MWCNT/água para a temperatura de entrada 70°C.

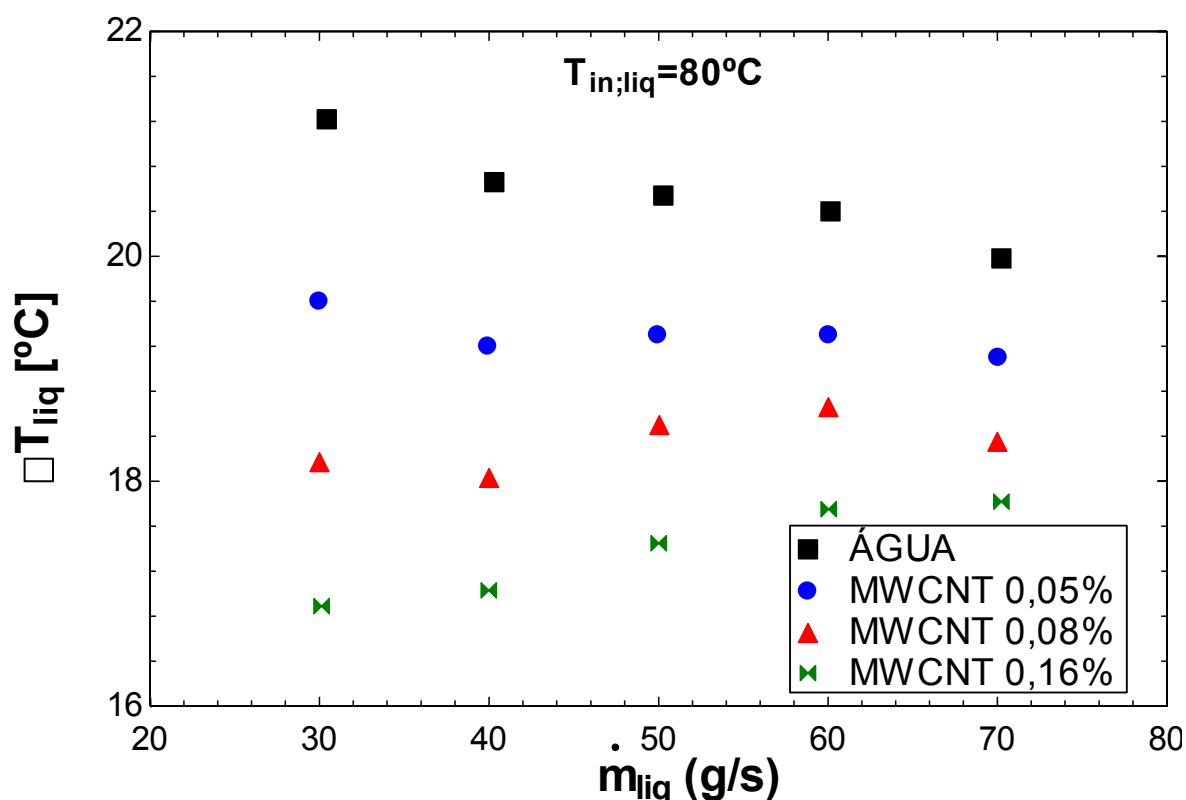


Figura A2.4 – Gradiente de temperatura para os nanofluidos de MWCNT/água para a temperatura de entrada 80°C.

Radiador 2 (UNO, nanofluidos MWCNT/EG30% e GRAFENO/EG30%)

As figuras A2.5 a A2.8 mostram o gradiente de temperatura do líquido em função da vazão mássica, para os nanofluidos de MWCNT. Pode-se observar que a queda de temperatura dos nanofluidos foi inferior à do fluido base, para praticamente todos os testes. O nanofluido de concentração 0,1% foi o que obteve o pior desempenho, apresentando menor capacidade de resfriamento. Por outro lado, os nanofluidos de concentração 0,05% e 0,3% obtiveram quedas de temperatura muito semelhantes à do EG30%, principalmente para as condições de 70 e 80°C de temperatura de entrada (Figs. A2.7 e A2.8). Nessas condições, o nanofluido 0,3% apresenta melhor desempenho para vazões até 100 g/s. para as vazões mais elevadas, o nanofluido 0,05% passa a ter um melhor desempenho em termos de gradiente de temperatura.

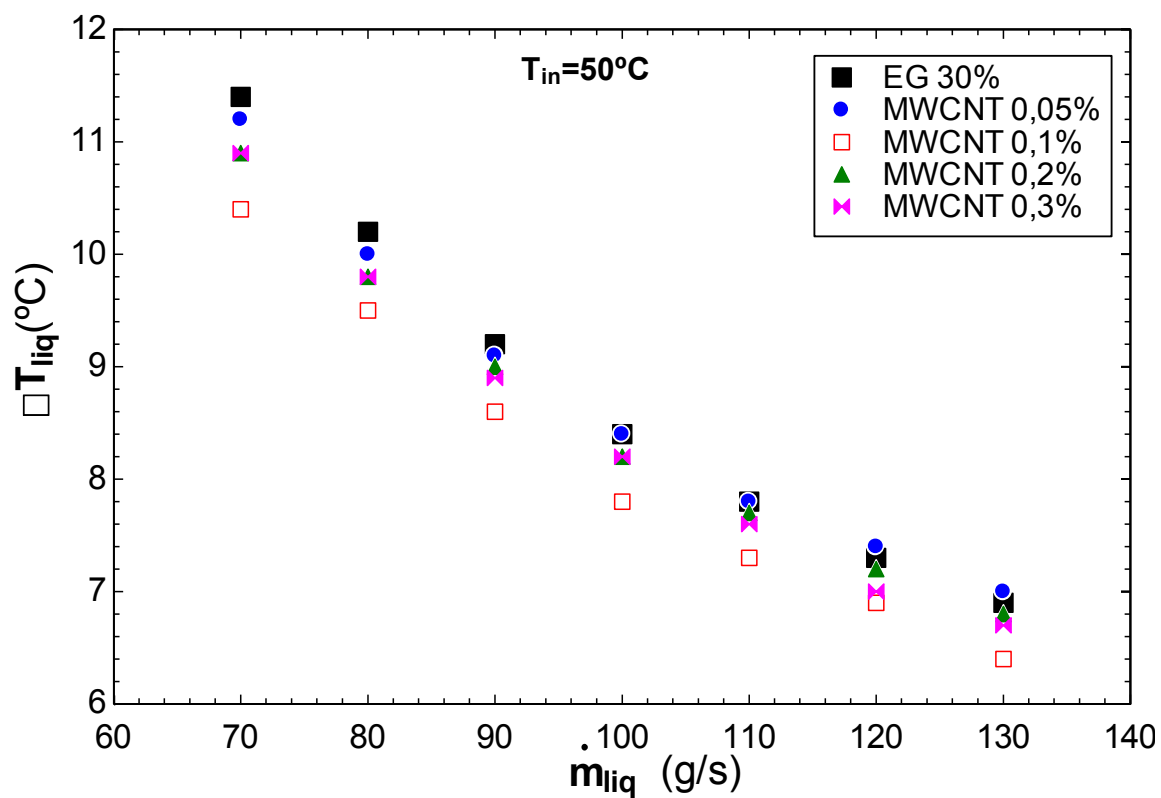


Figura A2.5 – Gradiente de temperatura para os nanofluidos de MWCNT para a temperatura de entrada 50°C .

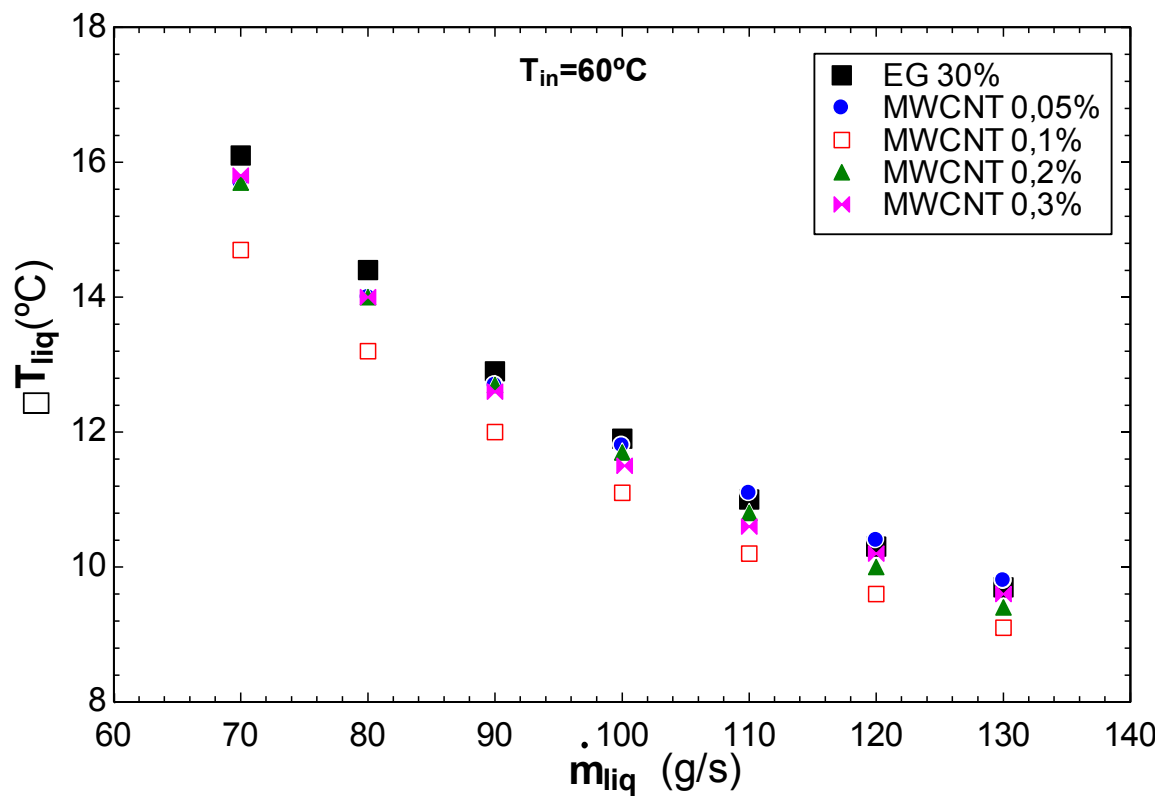


Figura A2.6 – Gradiente de temperatura para os nanofluidos de MWCNT para a temperatura de entrada 60°C

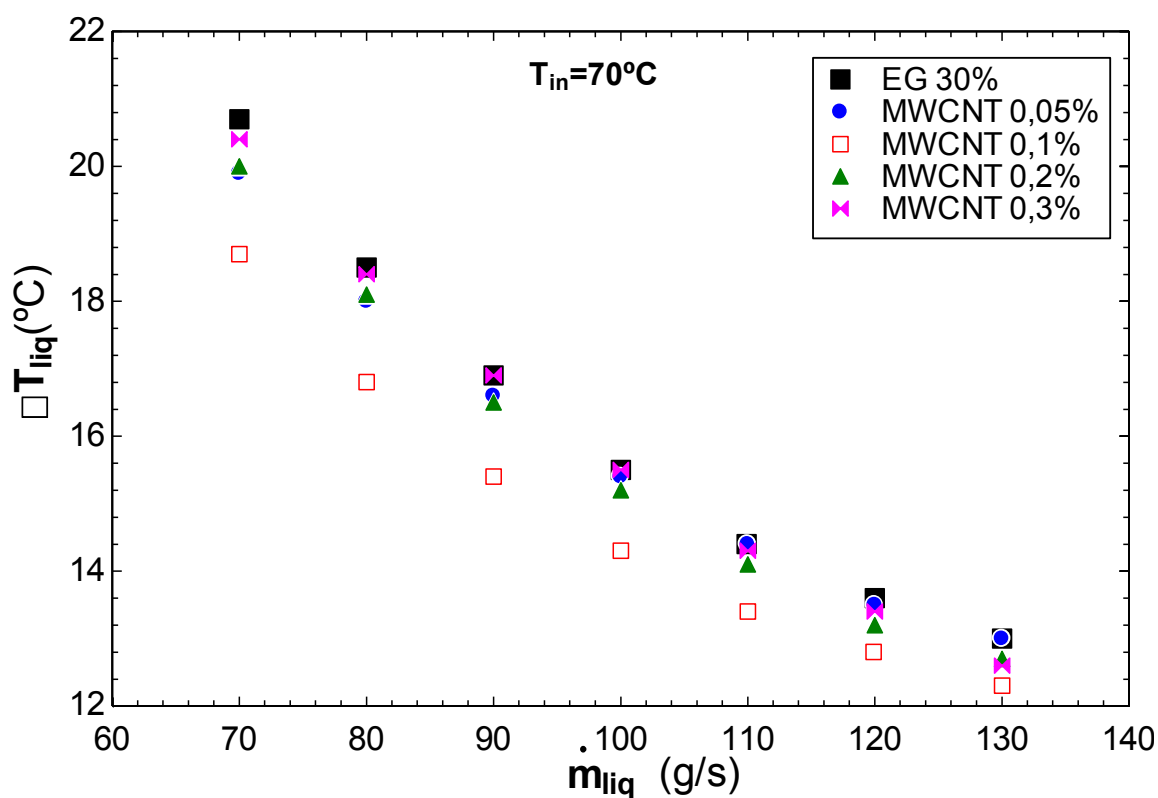


Figura A2.7 – Gradiente de temperatura para os nanofluidos de MWCNT para a temperatura de entrada 70°C

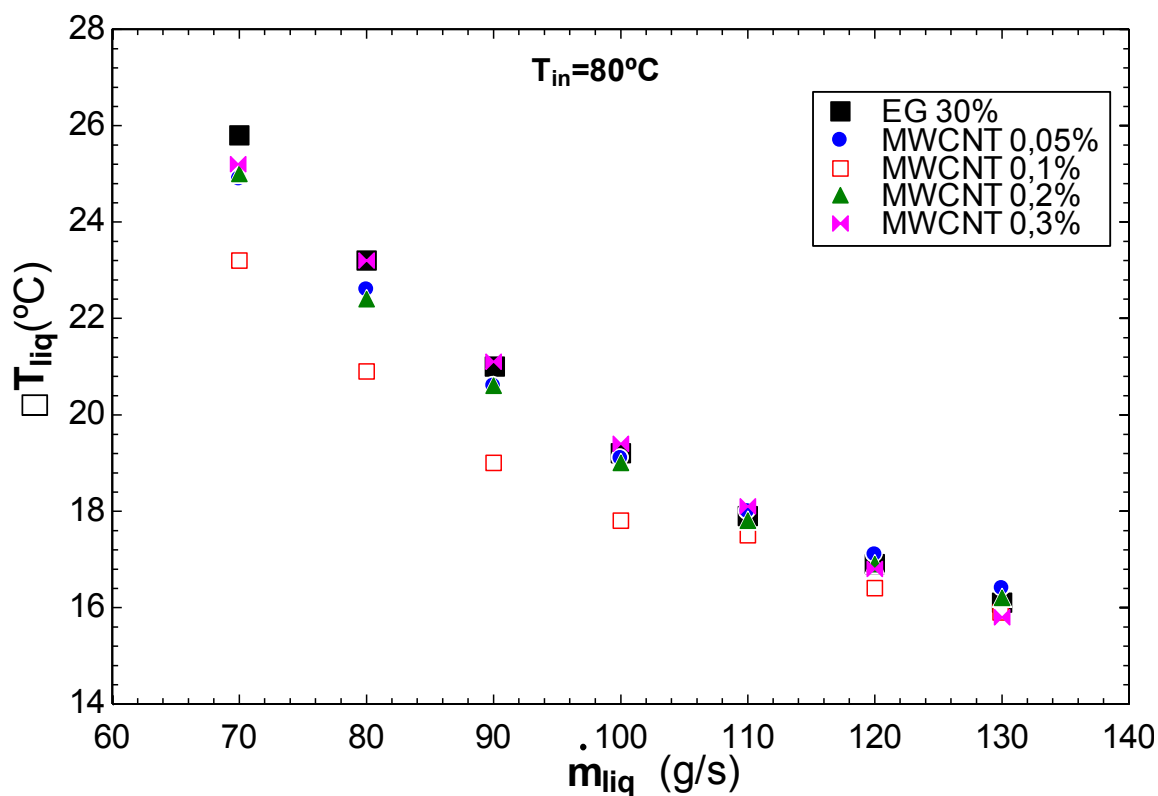


Figura A2.8 – Gradiente de temperatura para os nanofluidos de MWCNT para a temperatura de entrada 80°C .

Para os nanofluidos de grafeno, nos testes com temperatura de entrada 50°C, mostrados na Fig. A2.9, observa-se que para as concentrações 0,05 e 0,1% o gradiente de temperatura é superior ao do fluido base para vazões até 100 g/s, para vazões acima de 100 g/s o gradiente de temperatura do nanofluido 0,05% passa a ser inferior ao do fluido base, enquanto para as concentrações 0,2 e 0,3% a queda de temperatura é inferior à do EG30%.

Para a condição de entrada a 60°C, como mostra a Fig. A2.10, em toda a faixa de vazões analisada, os nanofluidos 0,05% e 0,1% foram ligeiramente superiores ao fluido base, enquanto os nanofluidos 0,2 e 0,3% obtiveram uma queda de temperatura inferior à do EG30%. Essa discrepância diminuiu nos testes com entrada a 70°C, onde o nanofluido 0,2% obteve gradientes de temperatura ligeiramente inferiores ao EG30%, porém muito próximos, e o nanofluido 0,35 também se aproximou do fluido base. Os nanofluidos 0,1 e 0,05% continuaram com queda de temperatura ligeiramente superiores à do EG30%. Estes resultados são mostrados na Fig. A2.11. Já nos testes com temperatura de entrada 80°C, como mostra a Fig. A2.12, a tendência foi semelhante, com o nanofluido 0,02% obtendo valores de queda de temperatura muito próximos ao fluido base, e os nanofluidos 0,05 e 0,1% ligeiramente superiores ao EG30%. Novamente, o nanofluido 0,3% obteve o pior desempenho em termos de gradiente de temperatura.

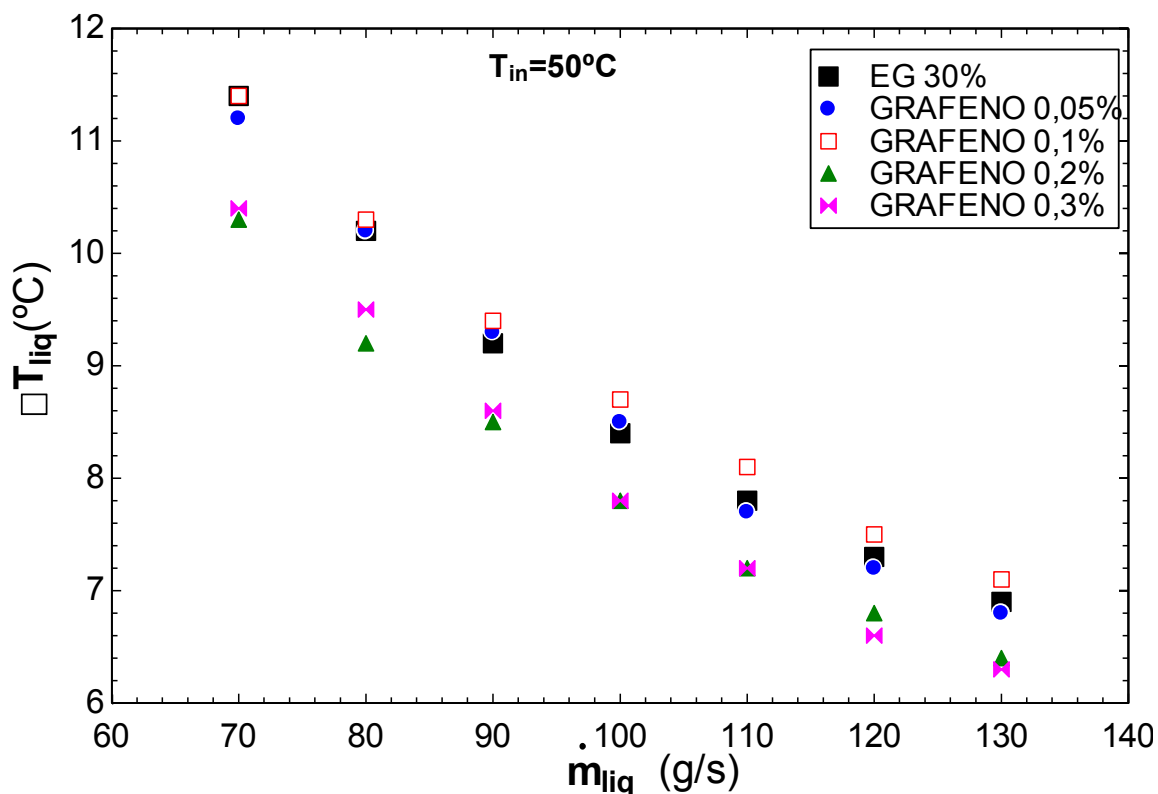


Figura A2.9 – Gradiente de temperatura para os nanofluidos de grafeno para a temperatura de entrada 50°C

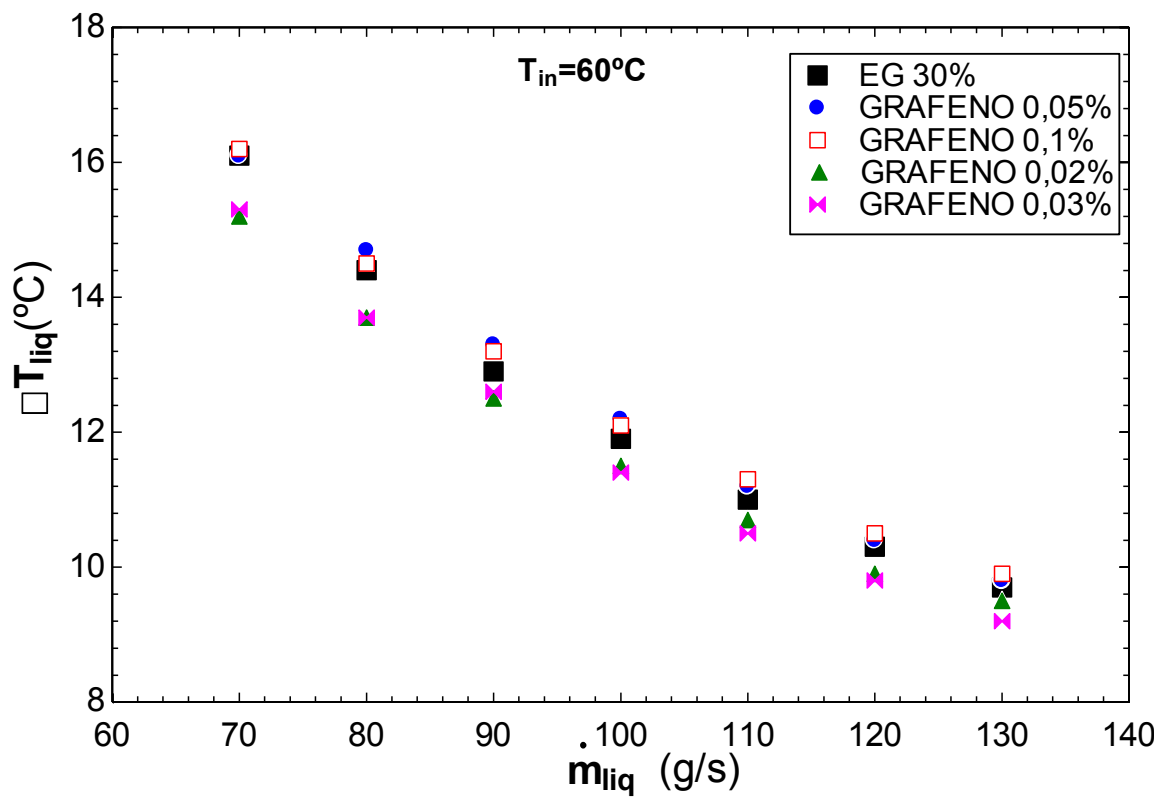


Figura A2.10 – Gradiente de temperatura para os nanofluidos de grafeno para a temperatura de entrada 60°C

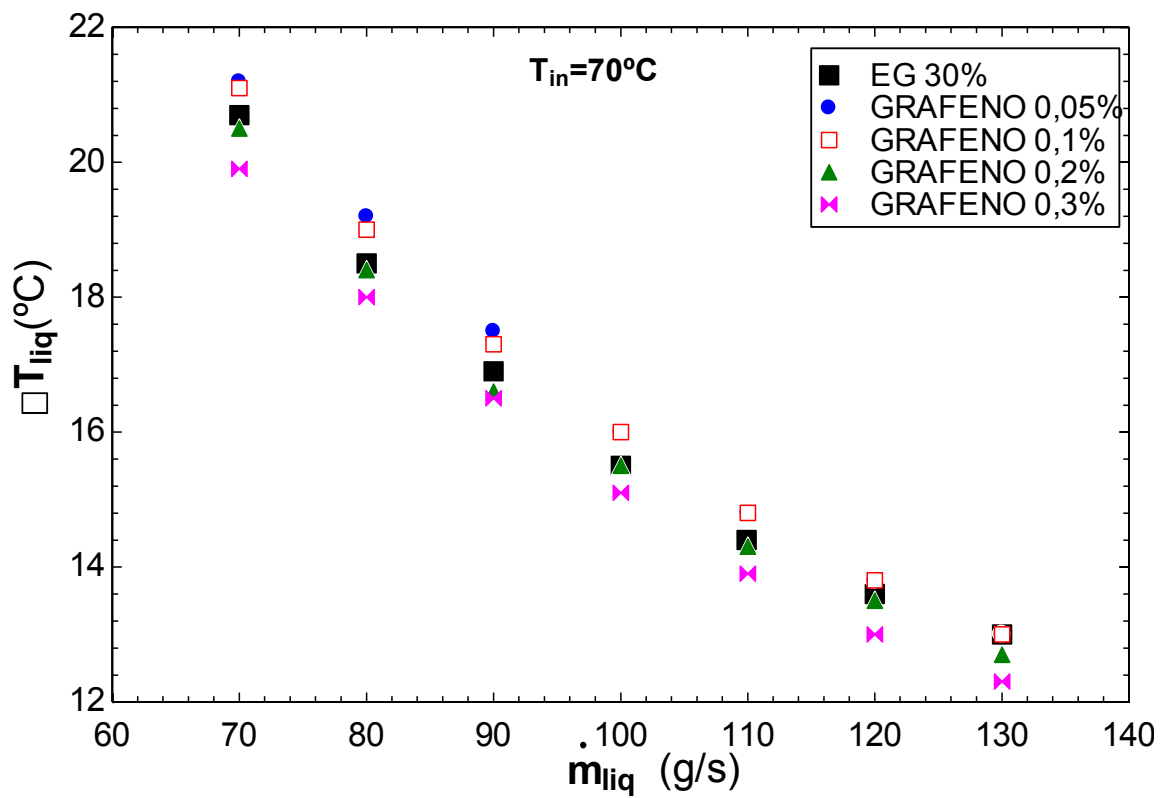


Figura A2.11 – Gradiente de temperatura para os nanofluidos de grafeno para a temperatura de entrada 70°C

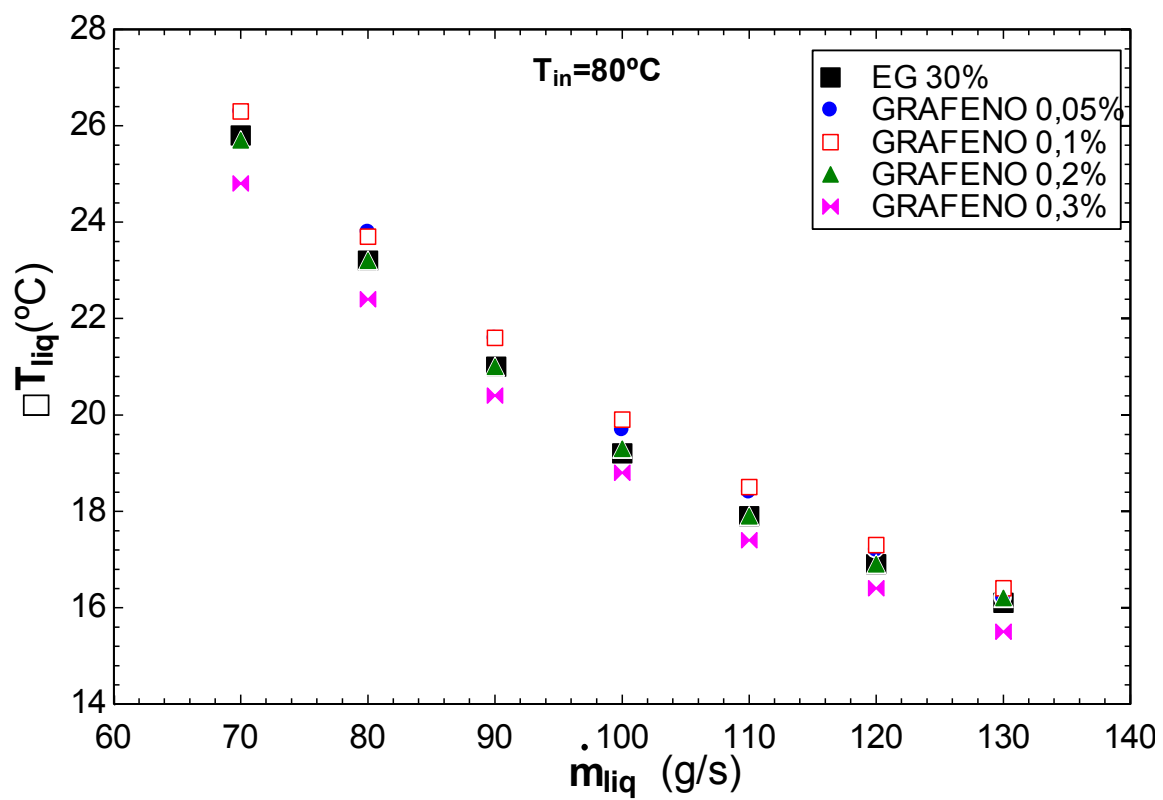


Figura A2.12 – Gradiente de temperatura para os nanofluidos de grafeno para a temperatura de entrada $80^{\circ}C$

ANEXO III

TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO (RADIADOR 2)

A Fig. A3.1 mostra a taxa de transferência de calor para os testes com vazão de líquido 80 g/s. Pode-se observar que para os nanofluidos de grafeno, na temperatura de entrada 50°C, os nanofluidos obtiveram desempenho inferior ao fluido base nas concentrações 0,05 e 0,1%, e ligeiramente superior ao fluido base nas concentrações 0,2 e 0,3%, com incrementos de 6,4 e 3,4%, respectivamente, como pode ser visto na Fig. A3.1a. Para a temperatura de entrada 60°C (Fig. A3.1b) o incremento na taxa de transferência de calor para o nanofluido 0,3% foi de 2,3%, enquanto nas concentrações 0,05 e 0,1% houveram decrementos na transferência de calor de 4,4 e 6,3%. O nanofluido de concentração 0,2% obteve desempenho igual ao do fluido base. Na temperatura de entrada 70°C (Fig. A3.1c), os nanofluidos 0,05, 0,1 e 0,2% foram inferiores ao fluido base para esta vazão, enquanto o nanofluido 0,3% obteve Q igual ao EG30%. A máxima perda na transferência de calor foi 7,7% para a concentração 0,05%. Observa-se nesta condição uma tendência de aumento na taxa de transferência de calor com o aumento da concentração de nanopartículas. Já para a temperatura de entrada 80°C os nanofluidos 0,05, 0,1 e 0,2% foram inferiores ao fluido base (Fig. A3.1d).

Os nanofluidos de MWCNT obtiveram taxa de transferência de calor superior ao fluido base nos testes de temperatura de entrada 50°C (Fig. A3.1a). O maior aumento na taxa de transferência de calor foi na concentração 0,2%, onde um incremento 6,5% foi atingido. Para a concentração 0,3% o incremento foi 3,4%. Nos testes com temperatura de entrada 60°C o nanofluido 0,2% obteve um valor de \dot{Q} 4,1% superior ao fluido base. Estes resultados são apresentados na Fig. A3.1b. Na condição de entrada a 70°C (Fig. A3.1c), apenas o nanofluido 0,2% obteve um ligeiro incremento na taxa de transferência de calor, 1,5%. Os demais nanofluidos apresentaram decrementos, de até 2,7%. Finalmente, nos testes com temperatura de entrada 80°C (Fig. A3.1d), os nanofluidos obtiveram um desempenho muito similar ao do EG30%, sendo que na concentração 0,2% o aumento máximo foi verificado, 2,4%. Nesta condição, as concentrações 0,05 e 0,3% obtiveram um incremento 0,62 e 1,6%, enquanto o nanofluido 0,1% apresentou desempenho igual ao do fluido base.

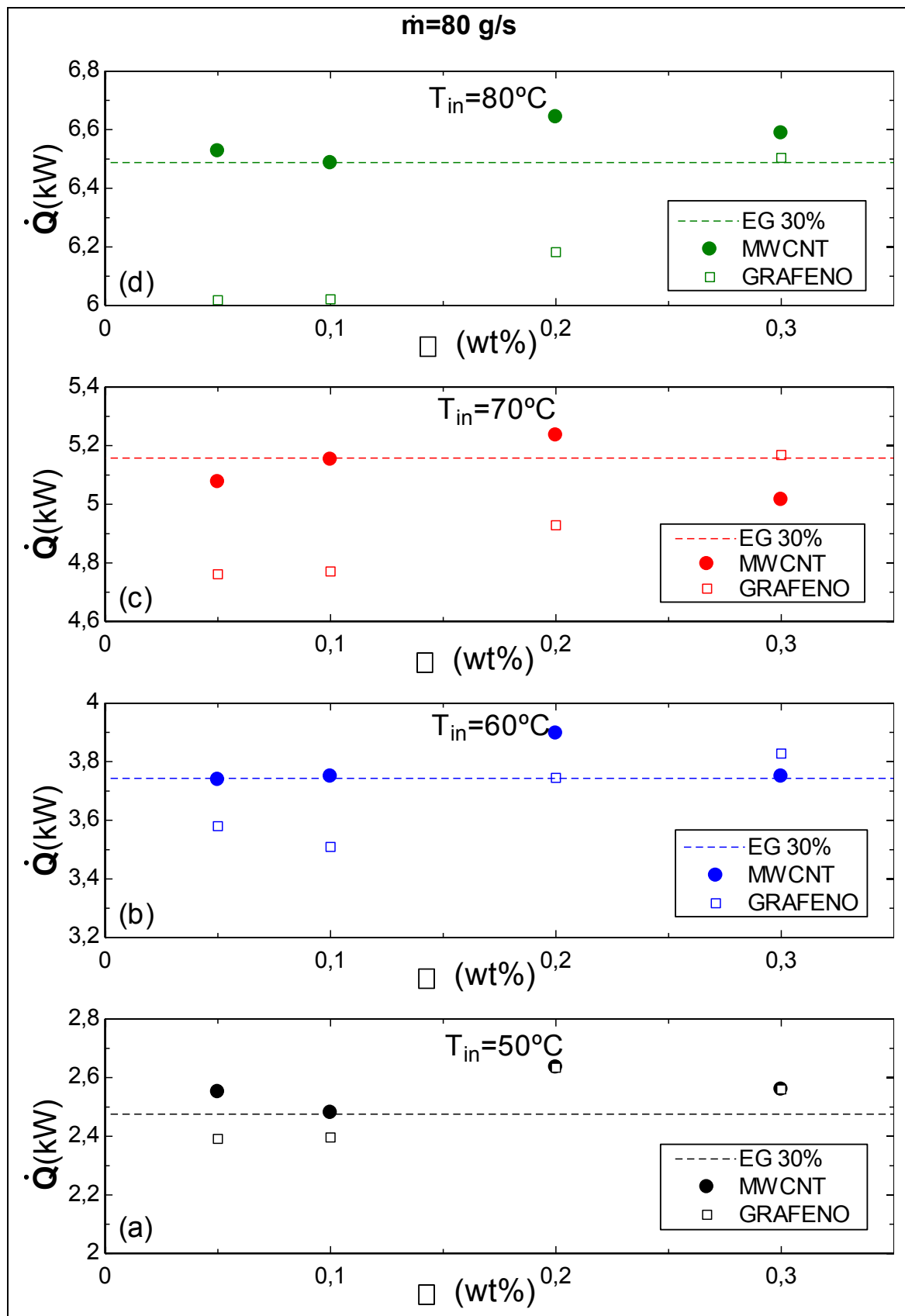


Figura A3.1 – Taxas de transferência de calor obtidas no radiador 2 em função da concentração, para vazão de líquido 80 g/s e todas temperaturas de entrada

A Fig. A3.2 ilustra a taxa de transferência de calor para os testes com vazão de líquido 90 g/s. Pode-se observar que para os nanofluidos de grafeno, na temperatura de entrada 50°C, os nanofluidos tiveram desempenho igual ao fluido base nas concentrações 0,05 e 0,1%, e superior ao fluido base nas concentrações 0,2 e 0,3%, com incrementos de 9,5 e 6,4%, respectivamente, como pode ser visto na Fig. A3.2a. Para a temperatura de entrada 60°C (Fig. A3.2b) o incremento na taxa de transferência de calor para o nanofluido 0,3% foi de 2,2%, enquanto nas concentrações 0,05 e 0,1% houve decremento na transferência de calor de 4,2 e 4%. Nesta condição, o nanofluido 0,2% apresentou calor igual ao do fluido base. Na temperatura de entrada 70°C (Fig. A3.2c), os nanofluidos 0,05, 0,1 e 0,2% foram inferiores ao fluido base para a vazão 90 g/s, sendo a máxima perda na transferência de calor 7,3% para a concentração 0,1%, enquanto na concentração 0,3% o \dot{Q} se igualou ao do fluido base. Já para a temperatura de entrada 80°C os nanofluidos 0,05, 0,1 e 0,2% foram novamente inferiores ao fluido base, enquanto o nanofluido 0,3% obteve desempenho igual ao EG30%. O pior nanofluido foi o de concentração 0,1%, que apresentou um decremento 6,8% na taxa de transferência de calor relativo ao fluido base (Fig. A3.2d).

Os nanofluidos de MWCNT obtiveram taxa de transferência de calor superior ao fluido base nos testes de temperatura de entrada 50°C (Fig. A3.2a). O maior aumento na taxa de transferência de calor foi na concentração 0,2%, onde um incremento 6,2% foi atingido. Para a concentração 0,05% o incremento foi 3,1%, e para a concentração 0,3%, incremento de 3,4%, enquanto para a concentração 0,1% o valor de \dot{Q} foi praticamente igual ao fluido base. Nos testes com temperatura de entrada 60°C o nanofluido 0,2% obteve \dot{Q} superior ao fluido base em 4,1%, enquanto nas demais concentrações o desempenho foi igual ao do fluido base, esses resultados estão evidenciados na Fig. A3.2b.

Na condição de entrada a 70°C (Fig. A3.2c), os nanofluidos 0,05 e 0,2 obtiveram um aumento na taxa de transferência de calor, 1,4 e 3%, respectivamente. Os demais nanofluidos apresentaram valores de \dot{Q} muito próximos ao do EG30%. Finalmente, nos testes com temperatura de entrada 80°C (Fig. A3.2d), os nanofluidos 0,05, 0,2 e 0,3 obtiveram desempenho ligeiramente superior ao fluido base, enquanto o nanofluido 0,1% apresentou decremento de 1,1% no valor de \dot{Q} .

Em geral, não há uma tendência clara no desempenho com relação a concentração de nanopartículas. Os nanofluidos 0,1% apresentaram o pior desempenho para esta vazão de testes, e os nanofluidos 0,2% apresentaram o melhor desempenho no caso dos nanofluidos MWCNT.

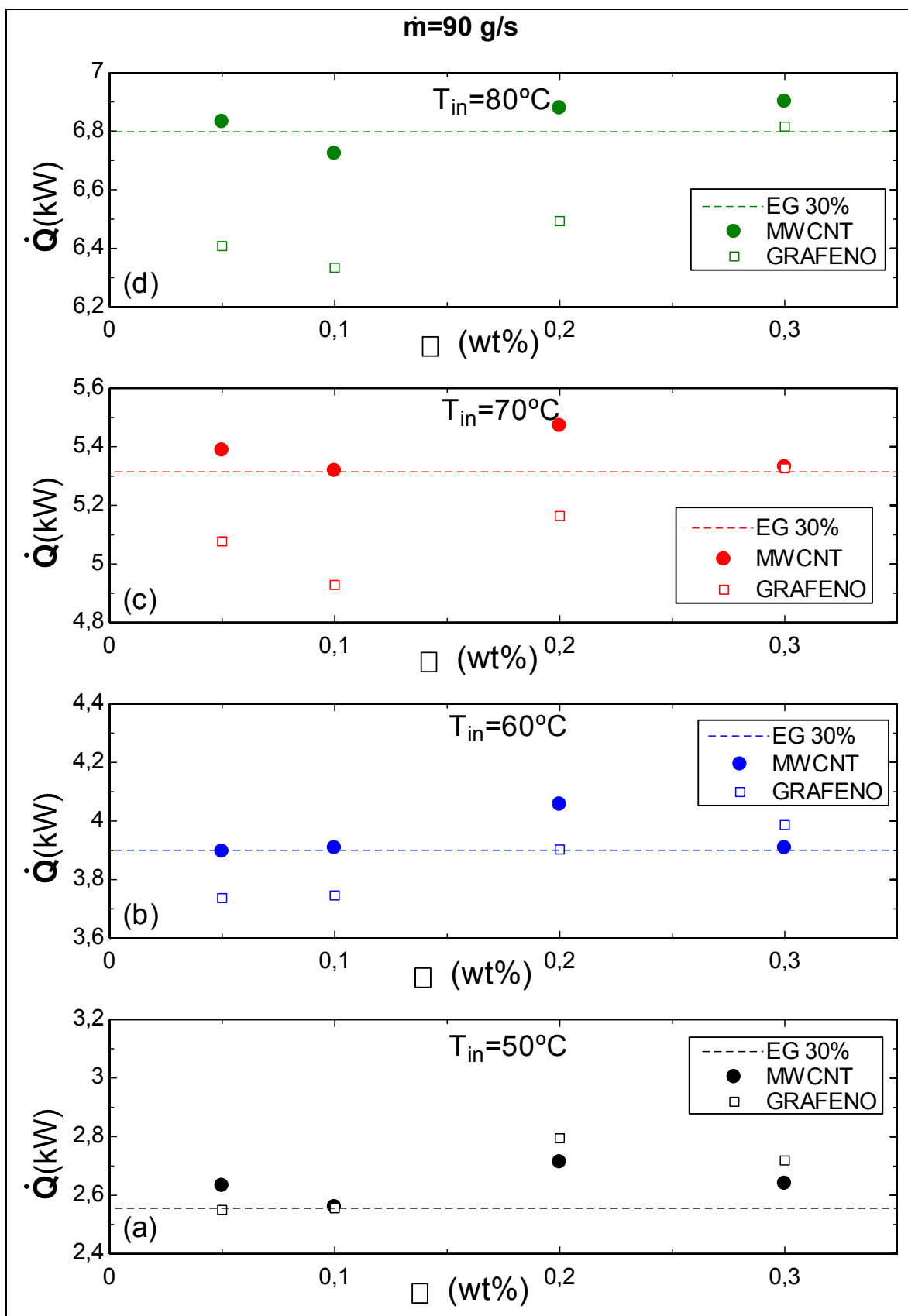


Figura A3.2 – Taxas de transferência de calor obtidas no radiador 2 em função da concentração, para vazão de líquido 90 g/s e todas temperaturas de entrada

A Fig. A3.3 mostra a taxa de transferência de calor para os testes com vazão de líquido 100 g/s. Pode-se observar que para os nanofluidos de grafeno, na temperatura de entrada 50°C, os nanofluidos obtiveram desempenho inferior ao fluido base nas concentrações 0,05 e 0,1%, e ligeiramente superior ao fluido base nas concentrações 0,2 e 0,3%, com incrementos de 5,9 e 3,1%, respectivamente, como pode ser visto na Fig. A3.3a. Para a condição de entrada a 60°C, o desempenho dos nanofluidos de grafeno foi crescente com a concentração, sendo superior ao fluido base apenas na maior concentração analisada, 0,3%. O incremento para esta concentração foi de 2,1% na taxa de transferência de calor. Já para as concentrações 0,05 e 0,1% o desempenho foi inferior ao do fluido base. Estes resultados estão mostrados na Fig. A3.3b. Na temperatura de entrada 70°C (Fig. A3.3c), os nanofluidos foram inferiores ao fluido base para esta vazão, com exceção do nanofluido 0,3% que obteve desempenho igual ao fluido base. O máximo decremento na transferência de calor foi 5,6% para a concentração 0,1%. Já para a temperatura de entrada 80°C todos os nanofluidos de grafeno foram inferiores ao fluido base, porém o pior nanofluido foi o de concentração 0,1%, que apresentou um decremento 7,6% na taxa de transferência de calor relativo ao fluido base (Fig. A3.3d).

Os nanofluidos de MWCNT obtiveram taxa de transferência de calor próxima ao fluido base nos testes de temperatura de entrada 50°C (Fig. A3.3a). Nas concentrações 0,05% e 0,3% o desempenho foi muito próximo ao fluido base, enquanto na concentração 0,2% observou-se um ligeiro incremento. Para a temperatura de entrada 60°C (Fig. A3.3b) apenas o nanofluido de concentração 0,2% se mostrou superior ao EG30%, com um incremento de 3,9%, enquanto as demais concentrações apresentaram valores de \dot{Q} semelhantes ao do fluido base. Na condição de entrada a 70°C (Fig. A3.3c), a tendência obtida foi similar, não houve diferença com relação ao EG30% nas concentrações 0,05 e 0,1%, contra um ligeiro aumento (1,44%) na concentração 0,2% e um ligeiro decremento (1,13%) na concentração 0,3%. Finalmente, nos testes com temperatura de entrada 80°C (Fig. A3.3d), os nanofluidos obtiveram um desempenho próximo ao fluido base, sendo que um ligeiro incremento, de 1,2% no valor de \dot{Q} , pode ser observado para a concentração 0,2%. Para as concentrações 0,05 e 0,1% houve um decréscimo de 1% na taxa de transferência de calor.

Em geral, os nanofluidos de grafeno apresentaram Q crescente com a concentração de nanopartículas, enquanto os nanofluidos de MWCNT apresentaram Q crescente até a concentração 0,2%, e de 0,2 para 0,3% ocorre um decremento na taxa de transferência de calor.

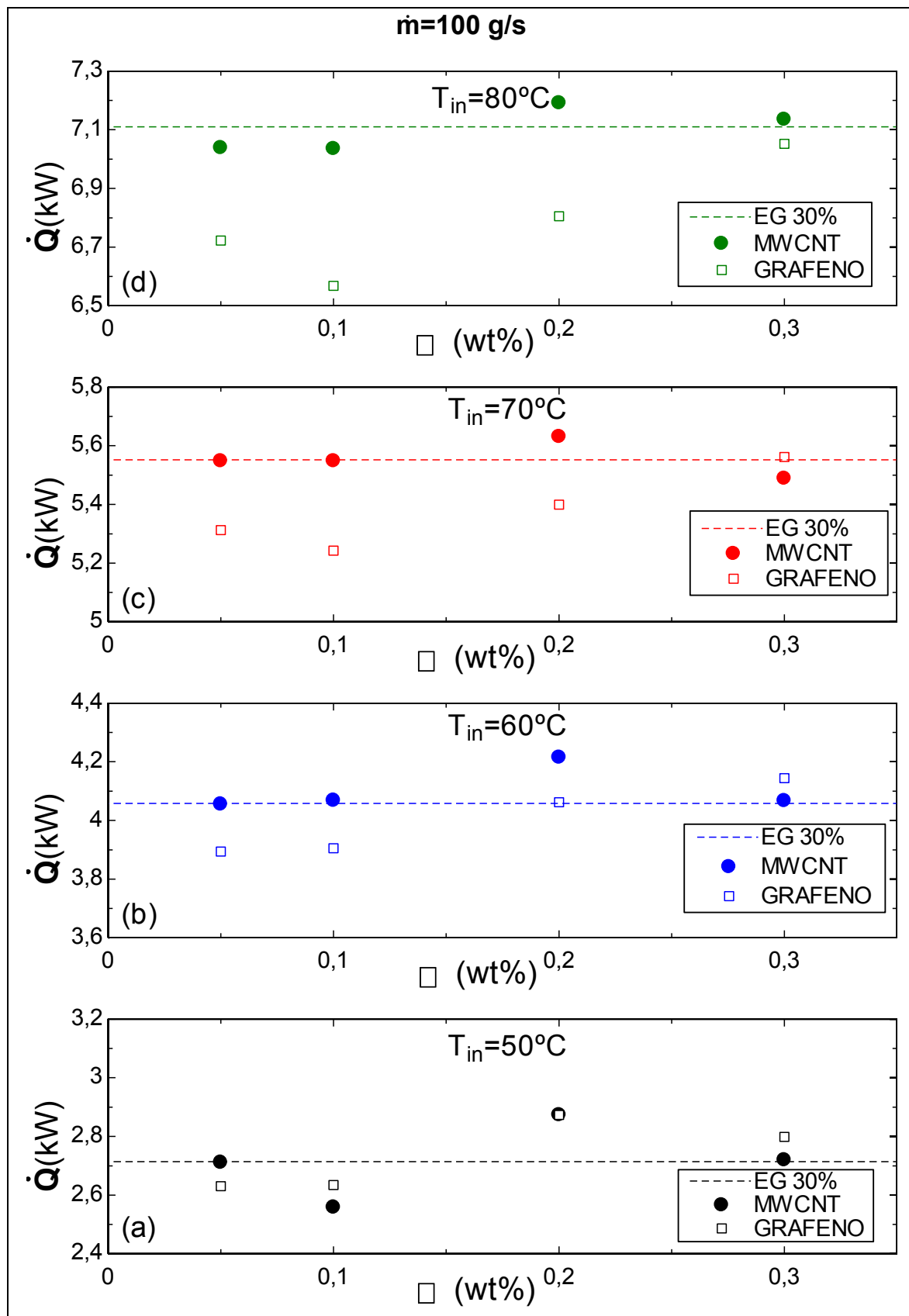


Figura A3.3 – Taxas de transferência de calor obtidas no radiador 2 em função da concentração, para vazão de líquido 100 g/s e todas temperaturas de entrada

A Fig. A3.4 mostra a taxa de transferência de calor para os testes com vazão de líquido 110 g/s. Pode-se observar que os nanofluidos de grafeno, na temperatura de entrada 50°C, o nanofluido obteve desempenho inferior ao fluido base na concentração 0,1%, com taxa de transferência de calor 2,9% menor que o EG30%. Para as concentrações 0,2 e 0,3%, observa-se um incremento no \dot{Q} de 5,7 e 5,9%, respectivamente, enquanto na menor concentração, 0,05%, o desempenho foi muito próximo ao fluido base. Estes resultados são mostrados na Fig. A3.4a. Para a temperatura de entrada 60°C (Fig. A3.4b) apenas o nanofluido 0,3% apresentou um ganho de 2% na taxa de transferência de calor, enquanto para as outras concentrações houve um decremento no valor de \dot{Q} , sendo o decremento máximo 3,6% no valor de \dot{Q} . Na temperatura de entrada 70°C (Fig. A3.4c), todos os nanofluidos de grafeno foram inferiores ao fluido base para esta vazão, sendo a máxima perda na transferência de calor 6,7% para a concentração 0,1%. Já para a temperatura de entrada 80°C a tendência encontrada foi semelhante, na qual todos os nanofluidos foram inferiores ao fluido base, e o pior resultado obtido foi um decremento de 8,4% no \dot{Q} para a concentração 0,1% (Fig. A3.4d).

Os nanofluidos de MWCNT obtiveram taxa de transferência de calor superior ao fluido base nos testes de temperatura de entrada 50°C (Fig. A3.4a), nas concentrações 0,05, 0,2 e 0,3%. O maior ganho foi 5,7% para a concentração 0,2%. Nos testes com temperatura de entrada 60°C (Fig. A3.4b), apenas o nanofluido 0,2% obteve resultado melhor que o fluido base (ganho de 1,9% no valor de \dot{Q}), contra um ligeiro decremento no calor para as concentrações 0,1 e 0,3%. Na condição de entrada a 70°C (Fig. A3.4c), nenhum dos nanofluidos de MWCNT apresentou ganho na transferência de calor, o melhor resultado obtido nesta condição retornou desempenho semelhante ao do fluido base nas concentrações 0,05 e 0,2%. Finalmente, nos testes com temperatura de entrada 80°C (Fig. A3.4d), o nanofluido de concentração 0,2% apresentou um ligeiro ganho no valor de \dot{Q} , 1,1%, enquanto na concentração 0,1% houve uma perda de 7% relativo ao fluido base. Nas demais concentrações os resultados obtidos para esta condição foram muito próximos ao do EG30%.

Em geral, o desempenho dos nanofluidos de grafeno aumentou com o incremento da concentração, porém sem apresentar ganho significativo com relação ao fluido base. Já para os nanofluidos de MWCNT, nas concentrações analisadas, há um pico de desempenho na concentração 0,2 e queda ao aumentar para 0,3%.

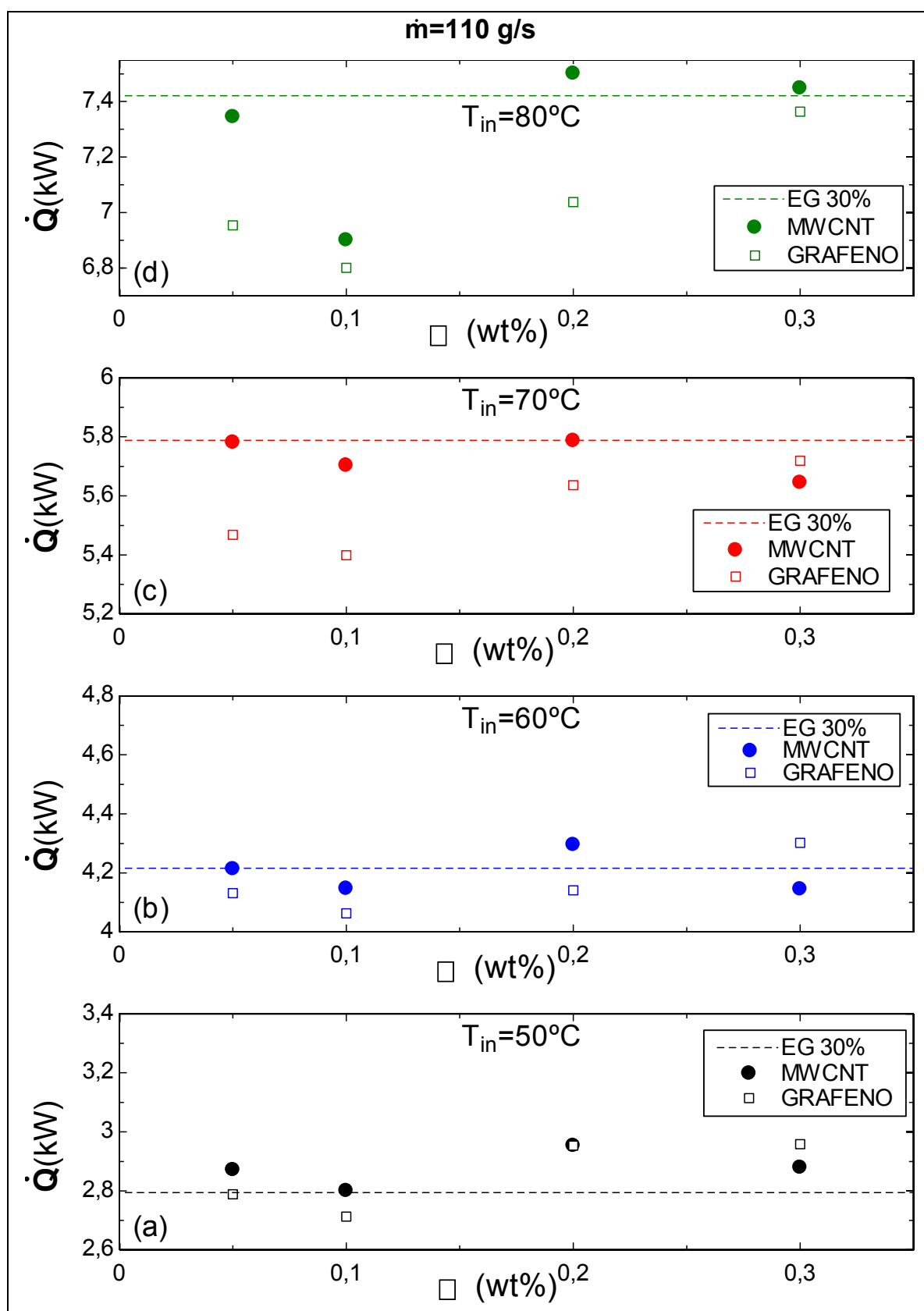


Figura A3.4 – Taxas de transferência de calor obtidas no radiador 2 em função da concentração, para vazão de líquido 110 g/s e todas temperaturas de entrada

A Fig. A3.5 apresenta a taxa de transferência de calor para os testes com vazão de líquido 120 g/s. Pode-se observar que os nanofluidos de grafeno, na temperatura de entrada 50°C, obtiveram desempenho próximo ao fluido base nas concentrações 0,05 e 0,1%, e ligeiramente superior ao fluido base nas concentrações 0,2 e 0,3%, com incrementos de 5,4 e 5,6%, respectivamente, como pode ser visto na Fig. A3.5a. Para a temperatura de entrada 60°C (Fig. A3.5b), apenas o nanofluido 0,3% apresentou um ligeiro incremento com relação ao fluido base (2%), enquanto nas demais concentrações houve uma queda no desempenho relativo. Na temperatura de entrada 70°C (Fig. A3.5c), todos os nanofluidos foram inferiores ao fluido base para esta vazão, sendo a máxima perda na transferência de calor 6,4% para a concentração 0,1. Para a temperatura de entrada 80°C (Fig. A3.5d) todos os nanofluidos de grafeno foram também inferiores ao fluido base, e o pior nanofluido foi o de concentração 0,1%, que apresentou um decremento 8,0% na taxa de transferência de calor relativo ao fluido base.

Os nanofluidos de MWCNT obtiveram taxa de transferência de calor superior ao fluido base para as concentrações 0,05 e 0,2% nos testes de temperatura de entrada 50°C (Fig. A3.5a). O incremento nos dois casos foi 2,6%. Para a concentração 0,1% houve um decremento 2,6% no valor de \dot{Q} . Nos testes com temperatura de entrada 60°C (Fig. A3.5b), apenas o nanofluido 0,2% obteve um valor de \dot{Q} 1,8% acima do fluido base. Por outro lado, na concentração 0,1% houve um decremento também pequeno, 1,6%. Nas concentrações 0,05 e 0,3%, o desempenho foi ainda mais semelhante ao fluido base. Na condição de entrada a 70°C (Fig. A3.5c), o desempenho do nanofluido de concentração 0,25 foi igual ao do fluido base e nas demais concentrações foi inferior, com um decremento máximo 2,6% na concentração 0,1%. Finalmente, nos testes com temperatura de entrada 80°C (Fig. A3.5d), os nanofluidos obtiveram um desempenho inferior ao fluido base, com exceção da concentração 0,2% que obteve um desempenho próximo ao EG30%. O pior nanofluido foi o de concentração 0,1% com desempenho 6,7% menor que o fluido base

Em geral, o desempenho dos nanofluidos de grafeno melhorou com o incremento da concentração, com algumas exceções na concentração 0,1%, porém não apresentaram ganho relativo ao fluido base. Já para os nanofluidos de MWCNT, nas concentrações analisadas, novamente é observado um pico de desempenho na concentração 0,2% e queda ao aumentar-se para 0,3%.

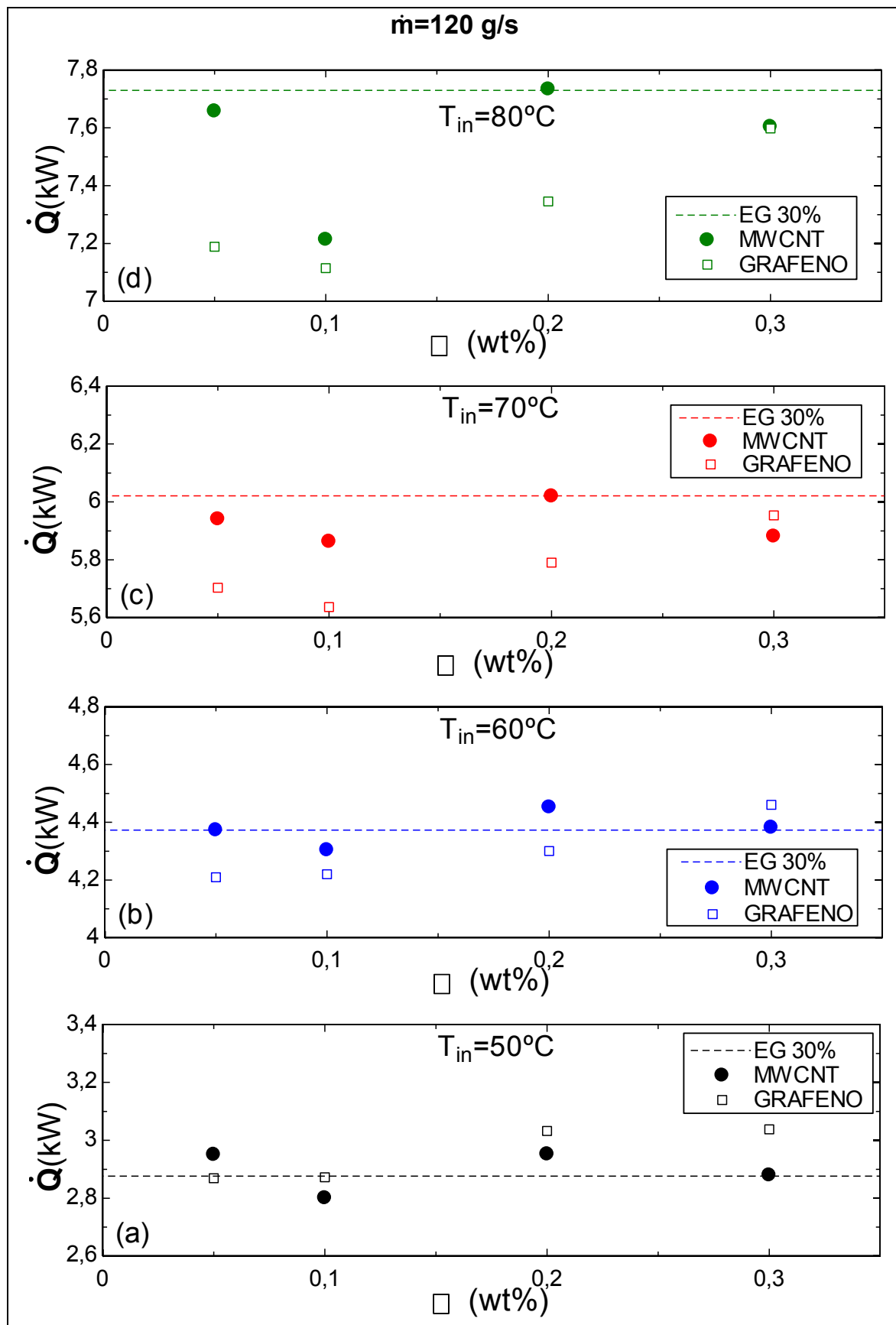


Figura A3.5 – Taxas de transferência de calor obtidas no radiador 2 em função da concentração, para vazão de líquido 120 g/s e todas temperaturas de entrada

ANEXO IV

CÓDIGO PARA CÁLCULO DAS CONCENTRAÇÕES DE NANOFLUIDOS

$\rho_{EG}=1113$

$\rho_w=997$

$\rho_{surf}=1114$

$\rho_G=2100$

$\phi_{m_G1}=0,1$

$\phi_{m_w1}=0,89$

$\phi_{m_surf1}=0,01$

$\phi_{G2}=0,001$

$V_{inicial}=V_G+V_{w1}+V_{surf}$

$\phi_{G1}=m_G/(V_{w1}+V_{surf}+V_G)$

$\phi_{G2}=V_G/(V_{surf}+V_G+V_{w1}+V_{w2})$

$\phi_{surf1}=V_{surf}/V_{tot1}$

$\phi_{surf2}=V_{surf}/V_{tot2}$

$V_{w1}=m_{w1}/\rho_w$

$V_{w2}=m_{w2}/\rho_w$

$V_{surf}=m_{surf}/\rho_{surf}$

$V_G=m_G/\rho_G$

$V_{final}=V_G+V_{w1}+V_{surf}+V_{w2}$

$V_{final}=0,01$