



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS CLEOTON XAXÁ DA SILVA LIMA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E CFD DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR
UTILIZANDO NANOFLUIDOS COM NANOPARTÍCULAS DE GRAFENO
GNP/ÁGUA EM TROCADORES DE CALOR**

RECIFE

2021

CARLOS CLEOTON XAXÁ DA SILVA LIMA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E CFD DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR
UTILIZANDO NANOFLUIDOS COM NANOPARTÍCULAS DE GRAFENO
GNP/ÁGUA EM TROCADORES DE CALOR**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco no Centro de Tecnologia e Geociências como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energia.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Antônio Ochoa Villa

Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa

RECIFE

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- L732a Lima, Carlos Cleoton Xaxá da Silva.
 Análise experimental e CFD da transferência de calor utilizando nanofluidos com nanopartículas de Grafeno GNP/Água em trocadores de calor / Carlos Cleoton Xaxá da Silva Lima. - 2021.
 177 folhas, il.; tab., abr., sigl. e símb.
- Orientador: Prof. Dr. Álvaro Antônio Ochoa Villa.
 Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2021.
 Inclui Referências e Apêndices.
1. Engenharia Mecânica. 2. Trocadores de calor. 3. Nanofluidos. 4. Grafeno. 5. Casco e tubo. 6. Tubo duplo. 7. Placas planas. I. Ochoa Villa, Álvaro Antônio (Orientador). II. Costa, José Ângelo Peixoto da (Orientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-79

CARLOS CLEOTON XAXÁ DA SILVA LIMA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E CFD DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR
UTILIZANDO NANOFLUIDOS COM NANOPARTÍCULAS DE GRAFENO
GNP/ÁGUA EM TROCADORES DE CALOR**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco no Centro de Tecnologia e Geociências como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energia.

Aprovada em: **06/05/2021**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Álvaro Antônio Ochoa Villa (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE

Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof^a. Dr^a. Andrezza Carolina Carneiro Tomás (Examinador Externo)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE

“O primeiro passo para chegar a algum lugar é decidir que você não vai ficar onde está”.

(MORGAN JR, J. P., 2019)

AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo auxílio e incentivo concedido.

Aos meus Orientadores o Professor Dr. Álvaro Antônio Ochoa Villa e o Professor Dr. José Ângelo Peixoto da Costa pela orientação, conselhos, amizade e conhecimento transmitido para a conclusão deste trabalho o qual foi, sem dúvidas, incentivo para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao professor Dr. Frederico Duarte de Menezes por toda ajuda na preparação dos nanofluidos aplicados neste trabalho.

A doutoranda MSc. Clara Carolina de Araújo Azevedo por toda ajuda e conselhos.

A minha mãe e meu pai por toda dedicação, empenho, companheirismo, incentivo e amor, pela sua confiança, força de vontade e palavras de encorajamento, por estar sempre ao meu lado em todas as minhas decisões e por todo apoio financeiro, sem eles nada disto seria possível.

A toda a minha família “busca pé”, desde irmã, tios(as) por todo apoio e incentivo. Em especial a Gardênia Martins por ser está amiga/irmã que me apóia em todas as minhas decisões e por todos os conselhos e por todo amor e carinho.

A todos os meus amigos e colegas de turma em especial a Erike Wilker, Ana Carla, Suellen Alcântara, Sthefanny Helena e Gabriel Neves, por sempre estarem ao meu lado e compartilharem de toda luta, dor e alegria nesta jornada.

Ao IFPE/ Recife pela utilização de seus laboratórios, equipamentos e todo apoio.

Aos bolsistas de Iniciação Científicas do IFPE, Davi e Júlia Mikaelle, que contribuíram nas realizações de todos os experimentos e simulações deste trabalho.

Ao melhor canal do *youtube*, WebTV brasileira com Tati Martins e Marcelo Carlos por todas as noites de diversão e conteúdo de qualidade, ajudando a amenizar problemas relacionados no desenvolvimento desta obra, com muitos sorrisos, contribuindo para uma pele ótima (rs).

E por último, mas não menos especial, a Kátia Nascimento e Joseane Azevedo por toda amizade, conselhos, ajuda e incentivos a cursar uma pós-graduação, desde quando éramos alunos ouvintes do PPGEM/UFRN em 2016.2/2017.1.

A todos, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

Os trocadores de calor desempenham um papel primordial na aplicação industrial, especialmente nas áreas de ciência térmicas, energia e engenharia química, em muitos processos como na indústria de refino de petróleo, geração de energia elétrica, proteção ambiental e em até tratamentos de efluentes, devido ao seu *design* compacto, alto rendimento aliado a seu baixo custo de manutenção. O desempenho geral de um trocador de calor depende das propriedades do seu fluido de trabalho que pode ser apenas água, fluidos refrigerantes ou nanofluidos a base de água, com misturas de água- etilenoglicol ou óleo. O presente trabalho teve o objetivo de investigar e comparar o desempenho do coeficiente global de transferência calor (U) e seu índice de desempenho (η) dos nanofluidos com nanopartículas de Grafeno e água (GNP/água) nos trocadores de calor do tipo tubo duplo, casco e tubo e placas planas. Foram realizados testes com fluidos água/água e GNP/água, com o nanofluido para o circuito de fluido quente e água para o circuito de fluido frio, com sentido de fluxo em contrafluxo, variando as concentrações de nanofluidos em peso de (0,0125%; 0,025%; 0,050%), com temperatura de operação em (40°, 50°e 60°C) e vazões volumétricas entre (0,5 - 2,5 L/min). Os resultados demonstraram que o uso dos nanofluidos de GNP/água foram mais útil em aumentar a trocar térmica entre os fluidos, do que com relação no uso apenas da água. O Trocador de calor casco e tubo obteve o maior U em relação aos outros trocadores, de 22,07% com erro de 2% no nanofluido de 0,0125wt% para a temperatura de 40°C, em comparação com a água. Já o trocador de placas planas apresentou a melhor (η) na utilização dos nanofluidos em relação aos outros trocadores, com 65,71% de melhor desempenho para o nanofluido 0,025wt% em 40°C em relação ao fluido base.

Palavras-chave: trocadores de calor; nanofluidos; Grafeno; casco e tubo; tubo duplo; placas planas.

ABSTRACT

Heat exchangers play a major role in industrial application, especially in the areas of thermal science, energy and chemical engineering, in many processes such as in the oil refining industry, electricity generation, environmental protection and even in effluent treatments, due to its compact design, high performance coupled with its low maintenance cost. The overall performance of a heat exchanger depends on the properties of its working fluid, which can be just water, refrigerants or water-based nanofluids, with mixtures of water - ethylene glycol or oil. The present work aimed to investigate and compare the performance of the global heat transfer coefficient (U) and the efficiency (η) of nanofluids with Graphene and water (GNP/Water) nanoparticles in double tube type heat exchangers, shell and tube and flat plates. Tests were performed with water/water and GNP / water fluids, with the nanofluid for the hot fluid circuit and water for the cold fluid circuit, with a counter flow direction, varying the nanofluid concentrations by (0.0125%; 0.025%; 0.050% by weight), with operating temperature at (40°, 50 ° and 60°C) and volumetric flow rates between (0.5 - 2.5 l/min). The results showed that the use of GNP/water nanofluids proved to be more useful in increasing the thermal exchange between fluids, than in relation to the use of water alone. The shell and tube heat exchanger obtained the highest U in relation to the other exchangers, of 22.07% with an error of 2% in the nanofluid of 0.0125wt% for the temperature of 40°C, in comparison with the water. The flat plate exchanger, on the other hand, presented the best η in the use of nanofluids in relation to the other exchangers, with 65.71% of better performance for the 0.025wt% nanofluid at 40°C in relation to the base fluid.

Keywords: heat exchangers; nanofluids; graphene; shell and tube; double tube; flat plates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Trocador de Calor Duplo Tubo.....	44
Figura 2 -	Trocador de Calor Casco e Tubo.....	45
Figura 3 -	Trocador de Calor Placas Planas.....	46
Figura 4 -	Nanofluido de Grafeno.....	47
Figura 5 -	Esquema de diferentes aplicações dos nanofluidos.....	49
Figura 6 -	Obstruções de canais em trocadores de calor.....	51
Figura 7 -	Mãe de todas as formas de gráficas, as quatro formas alotrópicas dos átomos de carbono: a)Grafeno como um material de construção (2D) para materiais de carbono de todas as outras dimensionalidades; b)Pode ser embrulhado para formar fulerenos (0D); c)Enrolado para formar nanotubos de carbono (1D) ou d)Empilhado para formar grafite (3D).....	52
Figura 8 -	Principais estruturas de materiais a base de Grafeno para nanofluidos: a)Grafeno puro (átomos de carbono de arranjo puro) com átomos de carbono hibridizados e o Grafeno quimicamente modificado, incluindo o; b)Óxido de Grafeno (GO), c)Óxido de Grafeno Reduzido (RGO) e d)Pontos quânticos de Grafeno (GQD).....	53
Figura 9 -	Grafeno dopado de nitrogênio.....	54
Figura 10 -	Grafeno em pó.....	56
Figura 11 -	Decantação de nanopartículas de Grafeno após 24h.....	57
Figura 12 -	Método de preparação de dois passos para nanofluidos.....	59
Figura 13 -	Fluxograma de preparo do Nanofluido de Grafeno.....	60
Figura 14 -	Evolução de linhas de pesquisas no Brasil associada ao Grafeno.....	64
Figura 15 -	Aparato experimental de trocadores de calor.....	67
Figura 16 -	Tanque de armazenamento.....	68
Figura 17 -	Controlador PID.....	68
Figura 18 -	Bomba recirculação de fluido.....	69
Figura 19 -	Válvula de agulha de precisão de vazão.....	69
Figura 20 -	Termopar tipo K.....	70
Figura 21 -	Calibração dos Termopares.....	70
Figura 22 -	Tocador de Calor Tubo duplo.....	71

Figura 23 - Circulação de fluido quente e frio no Trocador Tubo Duplo: a)Paralelo e b)Contra fluxo.....	72
Figura 24 - Trocador de Calor Placas Planas.....	73
Figura 25 - Circulação de fluido quente e frio no trocador de Placas: a)Paralelo e b)Contra Fluxo.....	74
Figura 26 - Trocador de calor por Casca e Tubo.....	75
Figura 27 - Circulação de fluido quente e frio no trocador de Casco e Tubo: a)Paralelo e b)Contra Fluxo.....	75
Figura 28 - Nanofluido a base de Grafeno.....	76
Figura 29 - Barra de Grafite.....	78
Figura 30 - Pré-esfoliação do grafite.....	78
Figura 31- Filtragem do Grafite esfoliado.....	78
Figura 32 - Grafite em pó.....	79
Figura 33 - Homogeneização do Nanofluido.....	79
Figura 34 - Nanofluido de Grafeno.....	79
Figura 35 - Sistema Versátil de Aquisição de Dados.....	82
Figura 36 - Fluxograma de procedimento de experimentos.....	85
Figura 37 - Modelagem CAD Trocador de Calor Tubo Duplo.....	86
Figura 38 - Trocador de calor tubo duplo em CFD e suas vistas: a)Modelo 3d, b)Vista superior, c)Vista lateral e d)Vista Frontal.....	87
Figura 39 - Número de elementos computacional.....	89
Figura 40 - Malha computacional: a)Modelo 3d e b)Vista superior.....	90
Figura 41- Malha computacional em corte.....	90
Figura 42 - Condições de contorno.....	91
Figura 43 - Troca térmica interna no DTHE: a)Modelo 3d e b)Vista superior.....	113
Figura 44 - Vetor Velocidade interno no DTHE.....	115
Figura 45 - Linhas de fluxo no DTHE.....	115
Figura 46 - Forno calibrador.....	151
Figura 47 - Forno calibrador.....	152
Figura 48 - Evolução temporal de amostras de Grafeno disperso com Lauril.....	154
Figura 49 - Evolução temporal de amostras de Grafeno disperso com PSS.....	154
Figura 50 - Microscópio Eletrônico de Varredura.....	155
Figura 51- Difrátômetro de Raio-X.....	156

Figura 52 -	Imagens da morfologia do Grafeno: a) para 500nm e b) 2 μ m.....	157
Figura 53 -	Difratogramas das amostras de grafite.....	158
Figura 54 -	KD2 PRO.....	159
Figura 55 -	Calibração da sonda medição (KS-1).....	160
Figura 56 -	Teste com nanofluidos.....	160
Figura 57 -	Pesagem dos nanofluidos.....	162
Figura 58 -	Viscosímetro.....	163

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Comparativo entre o Nu Exp. x CFD e as correlações padrão para água no DTHE em: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	98
Gráfico 2 -	Comparativo entre o Nu Exp. e CFD para os nanofluidos no DTHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C....	99
Gráfico 3 -	Estimativa de variação no para a concentração de 0,05wt% Exp e CFD.....	101
Gráfico 4 -	Comparativo entre o Nu Exp. e as correlações padrão para a água no STHE em: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	103
Gráfico 5 -	Comparativo entre o Nu Exp. para os nanofluidos no STHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	104
Gráfico 6 -	Comparativo entre o Nu Exp. e as correlações padrão para a água no PHE em: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	105
Gráfico 7 -	Comparativo entre o Nu Exp. para os nanofluidos no PHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	107
Gráfico 8 -	Comparativo do Fator de atrito em relação as correlações padrão para água.....	109
Gráfico 9 -	Comparativo do Fator de atrito dos nanofluidos GNP/Água em relação ao RE.....	110
Gráfico 10 -	Comparativo da Perda de Carga dos nanofluido GNP/Água em relação ao RE.....	110
Gráfico 11 -	Comparativo da Potência de Bombeamento dos nanofluido de GNP/Água em relação ao RE.....	112
Gráfico 12 -	Comparativo entre o U Exp. X CFD para os nanofluidos GNP/Água no DTHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	116
Gráfico 13 -	Comparativo entre o U Exp. para os nanofluidos GNP/Água no STHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C....	118
Gráfico 14 -	Comparativo entre o U Exp. para os nanofluidos GNP/Água no PHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	120
Gráfico 15 -	Comparativo da Efetividade de transferência de calor dos nanofluidos GNP/Água no DTHE em diferentes concentrações: a)	

40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	121
Gráfico 16 - Comparativo da Efetividade de transferência de calor dos nanofluidos GNP/Água no STHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	122
Gráfico 17 - Comparativo da Efetividade de transferência de calor dos nanofluidos GNP/Água no PHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	124
Gráfico 18 - Comparativo da Eficiência dos nanofluidos GNP/Água no DTHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	126
Gráfico 19 - Comparativo da Eficiência dos nanofluidos GNP/Água no STHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	128
Gráfico 20 - Comparativo da Eficiência dos nanofluidos GNP/Água no PHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.....	130
Gráfico 21 - Gráfico de Calibração para os Termopares: a) Termopar T1, b) Termopar T2, c) Termopar T3, d) Termopar T4, e) Termopar T5.	153

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 -	Comparativo de diferentes métodos de preparação do Grafeno.....	61
Tabela 2 -	Dimensões do aparato experimental.....	67
Tabela 3 -	Parâmetros técnicos do trocador de calor tubo duplo.....	72
Tabela 4 -	parâmetros técnicos do trocador de calor de placas planas.....	74
Tabela 5 -	Parâmetros técnicos do trocador de calor de casco e tubo.....	76
Tabela 6 -	Propriedades termofísicas dos nanofluidos de Grafeno.....	80
Tabela 7 -	Testes com Grafeno.....	81
Tabela 8 -	Variações de vazões e temperaturas para trocadores de calor.....	81
Tabela 9 -	Percentual médio dos erros de medições.....	82
Tabela 10 -	Erro de leitura nas temperaturas do circuito fluido frio.....	100
Tabela 11 -	Resultados de todas as análises em relação às temperaturas.....	132
Tabela 12 -	Valores medidos das temperaturas dos termopares para as diferentes temperaturas de referência.....	152
Tabela 13 -	Condutividade térmica de nanofluidos.....	161
Tabela 14 -	Densidade dos nanofluidos.....	162
Tabela 15 -	Viscosidades dos nanofluidos.....	164
Tabela 16 -	Calor específicos dos nanofluidos.....	165
Tabela 17 -	Comparativos de propriedades termofísica de nanofluidos de Grafeno.....	166
Tabela 18 -	Estimativa de erros de medições para o trocador de calor tubo duplo.....	172
Tabela 19 -	Estimativa de erros de medições para o trocador de calor placas planas.....	174
Tabela 20 -	Estimativa de erros de medições para o trocador de calor casco e tubo.....	176

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al_2O_3	Óxido de Alumínio
Al ₂ O ₃	Alumina Boemita
CeO_2	Óxido de Cério
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacionais
CGNPs	Nanopartículas de Grafeno Tratados com Cravos da Índia
CHE	Trocador de Calor Tudo Concêntrico
CNDG	Grafeno Compactado de Nitrogênio
CNDG-WEG	Grafeno Compactado de Nitrogênio disperso em mistura de Etilenoglicol-água
CO_2	Dióxido de Carbono
CPHE	Trocador de Calor Placas Corrugadas
CuO	Óxido de cobre
CVD	Deposição de Vapor Químico
CTAB	Brometo de Cetiltrimetilamônio
DASC	Coletores solares de Absorção Direta
DRX	Difração de Raio-X
DS-RBHX	Trocador de Calor com Defletor Duplo
DTHE	Trocador de Calor Tubo Duplo
EG	Etilenoglicol
Fe_3O_4	Óxido de Ferro
GA	Goma Arábica
GE	Grafeno
GNP	Nanopartículas de Grafeno
GNP-PT	Nanopartículas de Grafeno Decorado com Platina
GO	Óxido de Grafeno
GQD	Pontos Quânticos de Grafeno
H_2O	Água
H_2O -EG	Água e Etilenoglicol
HDHE	Trocador de Calor Tudo Horizontal
IFPE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

INTM	Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais
LTDM	Diferença de Temperatura Média Logarítmica
MEMS	Microssistemas Integrados
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MWCNTs	Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiplas
mm	Milímetro
NH ₃	Amônia
NBG	Nanofluido a base de Grafeno
NDG	Grafeno Dopado de Nitrogênio
NF	Nanofluidos
NMP	n-metilpirrolidona
MPHE	Trocador de Calor de Micro Placa
nm	Nanômetro
µm	Micrômetro
NTC	Nanotubos de Carbono
PHE	Trocador de Calor Placas Planas
PID	Proportional Integral Derivative Controller
RGO	Óxido de Grafeno Reduzido
SDBS	Dodecil Benzeno Sulfonato de Sódio
SDS	Dodecil Sulfato de Sódio
SiO ₂	Dióxido de Silício
SS-RBHX	Trocador de Calor com um Defletor
STHE	Trocador de Calor Casco e Tubo
SHCT-HE	Trocador de Calor Casco e Tubo Helicoidal
VDAS	Sistema Versátil de Aquisição de Dados
TiO ₂	Dióxido de Titânio
ZnO	Óxido de Zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área média de transferência de calor [m^2]
C	Capacidade Calorífica [W/k]
C_p	Calor específico [$J/Kg.k$]
D	Diâmetro [m]
f	Fator de Atrito
h	Coeficiente de transferência de Calor [$W/m.k$]
k	Condutividade Térmica [$W/m.k$]
L	Comprimento do Tubo [m]
$\dot{m}$	Vazão mássica [kg/s]
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Q_{ave}	Taxa média de transferência de calor [W]
q	Taxa de transferência de calor [W]
q''	Fluxo de calor [W/m^2]
q_{max}	Taxa de transferência de calor máxima [W]
Re	Número de Reynolds
V	Velocidade média [m/s]
$\dot{W}$	Potência de Bombeamento [W]
U	Coeficiente Global de Transferência de Calor [$W/m^2.k$]
T	Temperatura [$^{\circ}C$]
ΔT_{LTMD}	Diferença de Temperaturas Média logarítmica [$^{\circ}C$]
ΔP	Perda de carga [Pa]

Letras gregas

Símbolo *Denominação*

ε	Efetividade
η	Índice de desempenho
ρ	Densidade [kg/m^3]
μ	Viscosidade dinâmica [$Kg/m.s$]
$\emptyset$	Volumetria

Subscrito*Símbolo**Denominação*

bf	Fluido base
c1	Entrada do fluido frio
c2	Saída do fluido frio
e	Externo
h	Hidráulico
h1	Entrada do fluido quente
h2	Saída do fluido quente
i	Interno
p	Partícula
nf	Nanofluido
np	Nanopartículas
w	Água
wall	Parede do tubo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	MOTIVAÇÃO.....	23
1.2	OBJETIVO GERAL.....	23
1.3	OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	23
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	24
2	ESTADO DA ARTE.....	26
2.1	CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA.....	39
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	41
3.1	TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	41
3.2	TROCADORES DE CALOR.....	42
3.2.1	Trocador de calor tubo duplo.....	43
3.2.2	Trocador de calor casco e tudo.....	44
3.2.3	Trocador de calor placas planas.....	45
3.2.4	Manutenção dos trocadores de calor.....	46
3.3	NANOFLUIDOS.....	46
3.3.1	Tipos de Nanofluidos.....	48
3.3.2	Aplicações de Nanofluidos.....	49
3.3.3	Vantagens dos nanofluidos.....	50
3.3.4	Desvantagens dos nanofluidos.....	50
3.4	GRAFENO.....	51
3.4.1	Propriedades do Grafeno.....	54
3.4.1.1	<i>Condutividade Térmica do Grafeno.....</i>	<i>54</i>
3.4.1.2	<i>Estabilidade do Grafeno.....</i>	<i>55</i>
3.4.2	Vantagens do Grafeno.....	56
3.4.3	Desvantagens do Grafeno.....	57
3.4.4	Preparação de nanofluidos a base de Grafeno.....	58
3.4.5	Aplicação do Grafeno.....	63
3.4.6	Impactos ambientais do Grafeno.....	64
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	66
4.1	ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	66
4.1.1	Bancada de Teste.....	66

4.1.1.1	Tanque de armazenamento.....	67
4.1.1.2	Válvula de Controle de Vazão.....	69
4.1.1.3	Sensores de Temperatura.....	69
4.2	TROCADORES DE CALOR.....	70
4.2.1	Trocador de calor de Tubo Duplo.....	71
4.2.2	Trocador de calor de Placas Planas.....	73
4.2.3	Trocador de Calor de Casco e Tubo.....	74
4.3	NANOFLUÍDO.....	76
4.3.1	Preparação dos Nanofluidos.....	77
4.3.2	Propriedades Termofísicas dos nanofluidos.....	80
4.4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	80
4.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	82
	MODELAGEM COMPUTACIONAL VIA CFD EM TROCADOR DE	
5	CALOR COM GRAFENO.....	84
5.1	MODELAGEM DO TROCADOR DE CALOR TUBO DUPLO.....	84
5.2	EQUAÇÕES GOVERNANTES.....	89
5.2.1	Processamento de dados.....	90
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	96
	VALIDAÇÃO DA ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DOS	
6.1	TROCADORES.....	96
6.1.1	Comportamento do Número de Nusselt – Nu	97
6.1.2	Comportamento do Fator de atrito – f	108
6.1.3	Comportamento da queda de pressão – ΔP	110
6.2	ANÁLISE PARAMÉTRICA DO COMPORTAMENTO ENERGÉTICO	112
6.2.1	Comportamento de fluxo no modelo via CFD simulação.....	112
6.2.2	Comportamento do Coeficiente Global de transferência de calor – U	115
6.2.3	Comportamento da Efetividade de transferência de calor – ϵ	121
6.2.4	Comportamento do Índice de desempenho nos trocadores de calor – η	125
6.3	CONSIDERAÇÕES CRÍTICAS.....	131
7	CONCLUSÕES.....	134
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	136
	REFERÊNCIAS	137
	APÊNDICE A – AFERIÇÃO DOS TERMOPARES.....	151

APENDICE B – NANOFLUIDO DE GRAFENO.....	154
APÊNDICE C – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS.....	159
APÊNDICE D – ANÁLISE DE ERROS.....	170

1 INTRODUÇÃO

Em detrimento da crescente demanda do consumo de energia mundial nos dias de hoje, a geração e utilização de energia tornou-se uma questão fundamental no mundo. Os custos altos e a crescente utilização de combustíveis fósseis levaram a preocupação de todos, sobre a problemática da escassez desses recursos não renováveis.

Assim, grandes indústrias preocupadas com a falta de recursos naturais, fizeram grandes investimentos e esforços em desenvolvimento de sistemas e dispositivos de alto desempenho, para encontrar soluções para a redução do consumo de energia e melhorar sua eficiência, possibilitando um consumo mais eficiente, além de evitar danos ao meio ambiente e o esgotamento de recursos em longo prazo (ETTEFAGHI et al., 2017).

Materiais à base de carbono são utilizados em diversos estudos recentes visando aplicações eletroquímicas, em virtude de suas propriedades, estrutura e abundância, juntamente com o fato de serem ambientalmente benignos. Dentre esses materiais destaca-se o Grafeno, alótropo mais recente do carbono (SEGUNDO E VILAR, 2016).

O Grafeno é um material ordenado de átomos de carbono em formato de folha plana, formando uma camada monoatômica, organizada em células hexagonais, que apresenta propriedades estruturais como alta mobilidade eletrônica e de transporte únicas na natureza, com excelentes propriedades mecânicas, químicas e térmica (HAQUE et al., 2018; BORDIGNON, 2018).

Os fluidos convencionais no qual se utiliza de uma suspensão de partículas sólidas, que pode ser obtida pela dispersão de diferentes nanopartículas de tamanho manométrico, com um intervalo de 1–100 nm são chamado de nanofluidos (GHOZATLOO et al., 2014). Os Nanofluidos constituído por nanopartículas de Grafeno (GNP) é um dos fluidos mais promissores na transferência de calor, devido à sua condutividade térmica relativamente alta de 5000 W/m. K (WANG et al., 2018b).

Os nanofluidos são considerados como uma nova classe de fluidos da engenharia e consiste na dispersão de nanomateriais, em fluido base, como por exemplo, etilenoglicol, água, óleos ou até mesmo líquidos iônicos (COSTA et al., 2018). Os nanofluidos que são as suspensões das nanopartículas em um fluido base podem cobrir as desvantagens dos fluidos comuns, devido à sua maior condutividade térmica, em comparação com os fluidos base (água) (ARSHAD et al., 2019).

A nanotecnologia é usada em muitas aplicações de energia, para o uso de suprimento eficiente mais limpo. No entanto, a sua distribuição eficiente de calor através de um sistema

de energia é um ponto chave, que é necessário para reduzir o custo de manutenção ou reinstalação. O desempenho térmico do nanofluido requer um fenômeno de transporte eficiente de propriedades térmicas, incluindo condutividade térmica, bem como calor, viscosidade e densidade (ARSHAD et al., 2019).

Contudo, existem vários outros parâmetros, como a condição da superfície, tipo de surfactantes, propriedades básicas e fluídas, configuração do sistema e material que afeta o desempenho da transferência de calor (ARSHAD et al., 2016b).

A remoção e gestão de calor são uma das principais preocupações de qualquer tecnologia que lida com alta potência e tamanho pequeno. Os usos de nanofluidos em várias aplicações são objeto de interesse por muitos cientistas ao redor do mundo, para demonstrar o mérito de sua empregabilidade (SADEGHINEZHAD et al., 2016).

Os trocadores de calor podem ser aplicados a vários processos industriais em grande variedade de condições operacionais, tais como indústria química, geração de vapor e recuperação de calor residual (INCROPERA et al., 2008).

Existem diferentes tipos de trocadores de calor para diferentes aplicações de transferência de calor, no qual, requerem diversos tipos de dispositivos e configurações de equipamentos de transferência de calor (ÇENGEL e CIMBALA, 2012). Ambos os tipos de equipamentos apresentam alto custo de investimento; portanto, sua otimização é desejada (SALDANHA et al., 2020).

A utilização de nanofluidos em trocadores de calor vem ganhando destaque em pesquisas ao redor do mundo, pois as partículas sólidas em suspensões contribuem para uma maior e melhor troca térmica entre fluido, presente nos trocadores.

Portanto, este projeto procura estudar a viabilidade de fabricação, utilização e melhoria de troca térmica, presente em diferentes tipos de trocadores de calor, através da utilização de nanofluidos com nanopartículas de Grafeno. Para que sua utilização possa ser implantada em diferentes indústrias, que se utiliza de trocadores de calor e água como fluido de trabalho.

A utilização e a escolha dos nanofluidos de Grafeno aplicados nesta pesquisa vieram através da sólida experiência do Grupo de Pesquisa de nanofluido do curso Técnico de Química do IFPE - Recife, juntamente com o Grupo de pesquisa de Energia, no qual, já realizavam análises com o Grafeno em projetos diversos, pelas suas propriedades, melhoria e aumento da condutividade térmica, resultando em uma melhor eficiência. Assim, através dos resultados aplicados as ciências térmicas os nanofluidos foram desenvolvidos para análises e testes em trocadores de calor.

1.1 MOTIVAÇÃO

Diante da escassez de recursos renováveis e do crescente consumo na geração de energia, visando à crescente redução de investimentos no setor energético, nas últimas décadas, vários pesquisadores e diversos laboratórios de pesquisas, começaram a analisar e procurar uma maneira de melhorar a transferência de calor nos fluidos tradicionais a partir da modificação de suas características físicas, sem que haja um alto custo associado a estas mudanças.

Uma maneira de seguir este caminho foi à utilização de suspensão de partículas sólidas da ordem de micrômetros em fluido base, que mostraram um aumento na capacidade de transferência de calor, porém, observou-se uma baixa estabilidade na suspensão, gerando problemas como sedimentação, entupimento de canais e um aumento na perda de carga considerável em trocadores de calor.

Os estudos sobre nanofluidos com nanopartícula de Grafeno são considerados recentes aproximadamente 10 anos apenas, e este aprimoramento está em desenvolvimento. Os desafios que persistem estimulam os cientistas a tentar entender melhor essa nova classe de fluidos térmicos que aparentam ser bem inovadora e promissora.

Outro fator que motivou este trabalho a ser realizado é a relativa escassez de trabalhos científicos encontrados na literatura sobre a transferência de calor por convecção forçada com nanofluidos de Grafeno em diferentes tipos de trocadores de calor, tornando o estudo mais interessante e desafiador.

1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar experimentalmente e numericamente através de CFD, o comportamento da transferência de calor por convecção forçada nos nanofluidos de Grafeno e água em diferentes tipos de trocadores de calor.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a utilização de diferentes tipos de nanofluidos (como o Grafeno) em trocadores de calor com fluido de trabalho;
- Realizar a caracterização morfológica do Grafeno;

- Medir as características termofísicas nos nanofluidos de Grafeno, como a densidade, condutividade térmica, calor específico e viscosidade;
- Analisar experimentalmente as diferentes concentrações dos nanofluidos de Grafeno nos trocadores de calor do tipo tubo duplo, casco e tubo e placas planas;
- Realizar uma análise paramétrica com levantamento de correlações numérica, para a validação no desenvolvimento do modelo simulado em CFD para o trocador de calor tudo duplo, comparando com modelo real.
- Realizar uma comparação de resultados dos nanofluidos a base de Grafeno utilizados em diferentes concentrações, para verificar em qual trocador de calor, temperatura e concentração obteve o melhor desempenho e eficiência.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 7 capítulos, onde são apresentadas as diferentes etapas da utilização de trocadores de calor do tipo tubo duplo, casco e tubo e placas planas, operando com nanofluido de trabalho GNP/Água.

No capítulo 1, apresenta-se a introdução sobre o trabalho, juntamente com a motivação e os objetivos gerais e específicos empregados nesta pesquisa.

O capítulo 2 é dedicado ao estado da arte, onde são apresentados os estudos significativos nos últimos 10 anos relacionados ao uso de nanofluidos e de Grafeno em outros tipos de trocadores de calor e sua utilização em vários setores industriais.

No capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica sobre o Grafeno, sua utilização, suas propriedades termofísicas, vantagens e desvantagens e quais os métodos de preparação deste nanofluido para ser utilizado como fluido de trabalho em trocadores de calor.

O capítulo 4 é apresentado à metodologia utilizada para as análises experimentais na bancada de testes com os trocadores de calor, suas variações de parâmetros como temperatura, vazões, concentração de nanofluido e o processamento dos resultados.

No capítulo 5 é apresentada a metodologia para a simulação em CFD para o trocador de calor do tipo tubo duplo, com as equações governantes utilizadas no processamento e análises dos dados.

No capítulo 6, são apresentados todos os resultados obtidos nesta pesquisa, com a validação do estudo experimental e em CFD em relação à água, às análises termofluidas da transferência de calor avaliadas no Coeficiente Global de Transferência de calor – U e seu

Índice de Desempenho – η , comparando com os resultados obtidos com o fluido base. Verificando qual a concentração de nanofluidos e qual o trocador de calor obteve os melhores resultados.

O capítulo 7 é dedicado a conclusão e sugestões de trabalhos futuros relacionado ao uso de nanofluidos de Grafeno em trocadores de calor.

Posteriormente são apresentadas as referências bibliográficas utilizada nesta dissertação.

E por último são apresentados os Apêndices A, B, C e D, no qual, contém o método de aferição dos termopares utilizados nesta pesquisa, os nanofluidos de Grafeno e sua caracterização morfológica, as análises das propriedades termofísicas dos nanofluidos e a análise de erros, respectivamente.

2 ESTADO DA ARTE

Atualmente ocorrem muitos estudos experimentais por engenheiros e pesquisadores na conversão de fluidos convencionais em Nanofluidos (NF). Nos últimos anos, muitos pesquisadores estudaram as características de transferência de calor dos vários NF. Concentrando-se na transferência de calor convectiva forçada experimentalmente e numericamente, existem vários artigos publicados que discutem e envolvem o uso de NF. O capítulo a seguir apresenta uma série de trabalhos e estudos referentes ao uso do Grafeno (GE) e de NF aplicados a diferentes trocadores de calor nos últimos 10 anos.

Recentemente, as propriedades especiais do GE têm atraído pesquisadores para sua utilização em nanomateriais, como Nanopartículas de Grafeno (GNP) para alcançar alto desempenho térmico em NF. O alto incentivo para usar o GNP emana de sua grande condutividade térmica que pode reduzir a resistência térmica dos NF, mesmo em baixas concentrações. Nos últimos anos, vários estudos concentraram sua atenção no emprego de NF contendo materiais à base de GE em vários dispositivos e para uma ampla gama de aplicações, como no resfriamento de componentes eletrônica, onde se utiliza para dissipar o calor de vários componentes eletrônicos, como supercomputadores, dispositivos de energia e veículos elétricos operados por baterias.

A utilização de Nanofluido a base de Grafeno (NBG) com dissipadores de calor foi investigada por ALI e ARSHAD (2016a), onde através de um estudo experimental foi examinado o efeito dos ângulos de canal de 22,5°; 45° e 90° num dissipador de calor de aleta em pinos, usando NF de GNPs/água destilada, com uma concentração volumétrica das partículas do GNP de 9,5% em peso. Os autores encontraram o ângulo ótimo de 22,5° pino no dissipador de calor com a menor resistência térmica de 0,011K/W, que obteve uma redução de 22,17% usando nanofluido GNP em relação à água destilada convencional. A taxa de incremento no coeficiente de transferência de calor convectivo foi de 23,86% e o melhor coeficiente de transferência de calor no dissipador foi obtido com os ângulos dos pinos de 22,5° e 45°, com 84,30% e 38,48% respectivamente.

Também em ALI e ARSHAD (2016b), eles fizeram a mesma análise para aleta integral, avaliando o desempenho térmico e hidrodinâmico, com 10% de concentração em peso do GNP. O experimento foi realizado em uma faixa a um fluxo de calor de 47,96 KW/m², 59,95 KW/m² e 71,94 KW/m². No fluxo de calor inferior o nanofluido de GNP apresentou melhor desempenho térmico quando comparado para maior fluxo de calor, com o aumento do fluxo de calor o desempenho térmico diminuiu. Foram obtidos em média, 21,51%, 15,38% e

13,76% do aprimoramento de transferência calor convectivo para os fluxos de calor de 47,96 KW/m², 59,95 KW/m² e 71,94 KW/m², respectivamente.

Na indústria automotiva o GE está sendo usado para melhorar o desempenho do resfriamento dos motores automotivos, usando NBG SELVAM et al. (2017a) avaliaram o melhor desempenho de transferência de calor de um radiador automotivo com suspensões baseadas em GE. Eles utilizaram uma mistura de Nanopartículas de Grafeno e água-etilenoglicol (GNP/H₂O-EG), com concentrações de GE variando de 0,1%vol. a 0,5%vol. e relataram que ocorreu um aumento na transferência de calor por convecção de 20% e 51% na entrada de temperaturas de 35°C e 45°C, respectivamente, na maior concentração (0,5 vol.%). O coeficiente convectivo de transferência de calor de NF aumenta com o aumento da concentração de GNP. Portanto os NF com 0,5%vol. são eficazes na região laminar a 45°C para aplicações de resfriamento automotivo com maior coeficiente de transferência de calor e menor queda de pressão.

Já AMIRI et al. (2016) fizeram a mesma análise para radiadores, porém eles utilizaram o Grafeno compactado com nitrogênio (CNDG) em um nanofluido constituído por CNDG disperso em uma mistura de etilenoglicol – água (CNDG-WEG) a um nível muito baixo de concentrações 0,001%, 0,005% e 0,01% em peso. Os resultados demonstraram que o CNDG-WEG apresentou o número Mouromtseff (que avalia o potencial de um nanofluido) maior que 1 para todas as temperaturas e concentrações em peso, a concentração de 0,01% obteve o melhor desempenho para o coeficiente de transferência de calor e a condutividade térmica de 83% e 19,4%, respectivamente. Por isso o nanofluido CNDG-WEG pode ser usado como refrigerantes alternativos em radiadores automotivos.

O Grafeno também pode ser usado para melhorar a absorção de energia solar em Coletores solares de Absorção Direta (DASC) e nas placas solares, em que NF com fortes propriedades de absorção espectral, atuam como fluido de trabalho. WANG et al. (2017) avaliaram essa melhora em DASC utilizando nanofluido de Grafeno/óleo, variando suas concentrações em (0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 mg/ml). A fim de melhorar as propriedades da conversão fototérmica do óleo de transferência de calor, uma pequena quantidade de GE foi adicionada ao óleo base. Os resultados demonstraram que a adição de nanopartículas ao óleo de transferência de calor puro poderia obviamente aumentar a eficiência da coleta de calor, e nanofluidos de Grafeno/óleo obtiveram a maior eficiência de coleta de calor em comparação com o nanofluidos óxido de cobre CuO/óleo.

VAKILI et al. (2016) utilizou o nanofluido de GNP/água através do coletor solar volumétrico para aquecimento de água doméstica em diferentes concentrações de peso

(0.00025%; 0.0005%; 0.001% e 0.005%). Os resultados revelaram que a eficiência do coletor, o coeficiente de absorção, e a condutividade aumentam com o incremento da concentração de peso do Grafeno. O nanofluido com 0,005% foi capaz de absorver completamente a energia solar.

Embora tenha ocorrido um progresso contínuo na melhoria do desempenho de trocadores de calor abordando sua construção e problemas de *layout*, as fracas propriedades de transferência de calor dos fluidos de trabalho utilizados nos trocadores continuam a ser um importante fator limitador de desempenho para esses sistemas. O comportamento de trocadores de calor contendo nanofluidos tem sido objeto de pesquisas, pois como estes fluidos apresentam uma alta condutividade térmica, eles podem ser adotados como fluidos de trabalho e podem aumentar a transferência de calor, no entanto, trabalhos com nanofluidos em um trocador de calor de tubo duplo (DTHE) são escassos, principalmente utilizando o Grafeno.

Alguns pesquisadores avaliaram a transferência de calor utilizando diversos Nanofluidos como WEN et al. (2020) que investigou experimentalmente e numericamente através de simulação CFD a transferência de calor, o comportamento do fluxo, número de Nusselt, queda de pressão e o Fator de atrito dos nanofluido ZnO-EG/água em trocador de mini-canais multportas, com concentrações de nanofluidos em volume de 0,75% e 1,5%. Os resultados demonstraram que o nanofluido ZnO-EG/água pode aumentar a transferência de calor em 6,7% e 9,8% em média com concentrações de 0,75%vol. e 1,5%vol., já para o fator de atrito este aumento foi de 4,6% e 8,6% correspondentemente. Tanto os desempenhos de transferência de calor e da queda de pressão aumentaram com o aumento da concentração de nanofluido.

AKYÜREK et al. (2018) que fizeram um estudo de transferência de calor por convecção e queda de pressão de NF de Óxido de alumínio (Al_2O_3)/água em um trocador de calor de tubo concêntrico (CHE). Os experimentos efetuaram concentrações de volume de partículas de (0,4%; 0,8%; 1,2%; 1,6% vol.). Os resultados mostraram que, NF com menores concentrações de partículas não mostraram uma influência importante sobre mudança de queda de pressão. A queda de pressão máxima foi alcançada com a bobina de fio de 25mm usada com o nanofluido de Al_2O_3 /água 1,6% vol.

KUMAR et al. (2017) em seu estudo experimental verificaram a transferência de calor, o fator de atrito e a efetividade em um DTHE, utilizando como nanofluido Óxido de Ferro (Fe_3O_4) para circuito quente e água para circuito frio em diferentes concentrações (0,005%; 0,010%; 0,030% e 0,060% em peso), com inserções de tiras longitudinais de razão de aspecto

de 1, 2 e 4, o número de Reynolds variou de 15.000 para 30.000. Como resultado, a transferência de calor aumentou com a concentração de partículas e número de Reynolds, entretanto, este aumento foi ainda maior com a diminuição dos valores de razão de aspecto de relação das inserções longitudinais da tira neste estudo.

PALANISAMY e KUMAR (2017) também analisaram a transferência de calor e a queda de pressão em um trocador de tubo horizontal, com nanofluido de Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiplas (MWCNT)/água, variando suas concentrações em volume (0,1%; 0,3% e 0,5%). Os resultados indicaram que a queda de pressão para as concentrações de 0,1%vol., 0,3%vol. e 0,5%vol. foram de 25%, 50% e 81%, respectivamente, acima dos resultados apenas com água. O aumento da queda de pressão deve-se ao aumento da viscosidade do NF ao adicionar nanotubos, o coeficiente de transferência de calor aumentou com o aumento das partículas. Portanto, a utilização do NF no trocador pode ser aplicada para realçar a transferência de calor com uma considerável queda de pressão.

HAN et al. (2017) conduziram uma investigação sobre o efeito na transferência de calor com NF de Al_2O_3 /água em um DTHE em concentrações de 0,25%vol. e 0,5%vol. Os resultados dos experimentos mostraram uma melhora significativa sobre a água, onde o número máximo de Nusselt subiu para 24,5%. Percebeu-se que quando há aumento de temperatura de entrada, ocorre também o aumento da transferência de calor no nanofluido.

GOODARZI et al. (2016) avaliaram o comportamento da transferência de calor em um DTHE, utilizando o nanofluido de Grafeno dopado com Nitrogênio (NDG)/água em várias concentrações (0,01%; 0,02%; 0,04%; 0,06% em peso) com fluido em sentido contrafluxo, variando sua temperatura em (20°, 30°, 40°, 50° e 60°C). Como resultados eles encontraram que o consumo de energia, remoção de calor, e a taxa de transferência de calor foram maiores para os NF do que para a água em todos os casos investigados, para um poder de bombeamento específico. O aumento médio do coeficiente de transferência de calor foi de quase 16,2% para 0,06% e o nanofluido utilizado como fluido de trabalho pode aumentar a eficiência dos dispositivos.

No mesmo contexto, SINGH et al. (2016) investigaram a transferência de calor de nanofluidos à base de CuO /água, com ou sem inserir defletores no tubo anular de um DTHE, variando as concentrações do nanofluido em 0,1%vol. e 0,2%vol. e sua temperatura em (30°, 40°, 50° e 60°C). Pode-se observar que o NF mostrou um aumento na transferência de calor em comparação com a água. A transferência de calor nanofluídica a 0,1%vol. aumentou entre 10-12%, enquanto a transferência de calor nanofluídica a 0,2%vol. foi em 25-30%.

REDDY E RAO (2014) fizeram um estudo experimental para examinar o coeficiente de transferência de calor e fator de atrito do nanofluido Dióxido de Titânio TiO_2 /água em um DTHE com e sem inserções de bobina helicoidal. As concentrações dos nanofluidos variaram de 0,0004%vol. a 0,02%vol. nos experimentos. O fluido base consiste de 40% de etilenoglicol (EG) e 60% de água destilada. Os resultados demonstraram que o coeficiente de transferência de calor em 0,02%vol. de nanofluido aumentou 7,85% para 10,73%, quando o número de Reynolds é de 4000 em comparação com fluido base. E quando há presença de pastilhas helicoidais há um aumento de 7,85% para 16,11% no número de 4000 Reynolds.

ABBASIAN E AMANI (2012) investigaram a transferência de calor convectiva e a queda de pressão, utilizando o nanofluido Dióxido de Titânio TiO_2 /água em um trocador de calor duplo tubo horizontal (HDHE), com circuito contra fluxo, variando suas concentrações de volume em (0,2%; 0,5%; 1,5% e 2,0%vol.). A faixa de números de Reynolds variou de 8.000 para 51.000. Os resultados demonstraram que quando o número de Reynolds ou as concentrações de nanopartículas aumentaram, o número de Nusselt aumentou em seu estudo experimental.

ZAMZAMIAN et al. (2011) pesquisaram o desempenho da transferência de calor de nanofluidos de Al_2O_3 /EG e CuO /EG em um trocador de tubo duplo e placas, em diferentes concentrações de nanopartículas e temperatura de operação em (45°, 60° e 75°C para cada amostra de nanofluido), amostras de 0,1%, 0,5% e 1,0% em Al_2O_3 /EG em peso e amostras de 0,1%, 0,3%, 0,5%, 0,7% e 1,0% de CuO /EG, sob condição de fluxo turbulento e descreveu que, o coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos em comparação com o fluido base (etilenoglicol) aumentou. Os resultados indicaram que quando há um aumento da concentração de nanopartículas e da temperatura do nanofluido, ocorre um aumento do coeficiente convectivo de transferência de calor.

DUANGTHONGSUK E WONGWISES (2009) analisaram experimentalmente a transferência de calor convectiva e queda de pressão do nanofluido TiO_2 /água em um HDHE, sobre condições de fluxo turbulento, com concentrações variando de 0,2%vol. a 2%vol. Os resultados encontrados demonstraram que o coeficiente de transferência de calor do nanofluido foi maior que o da água e estes, aumentaram com o incremento do número de Reynolds e concentração de partículas. A queda de pressão dos nanofluidos não foi muito superior à água e aumentou com o incremento das concentrações volumétricas.

Alguns pesquisadores analisaram também o desempenho do trocador de calor de placas planas (PHE) usando nanofluidos, no entanto pesquisas que utilizam NBG é recente, por isso, não há muitas pesquisas publicadas. O desempenho termo-hidráulico de um trocador

de calor de placas modificando suas superfícies do aço inoxidável 304 (SUS304) através do método de corrosão eletroquímica foi estudado por NGUYEN et al. (2020) utilizando a água como fluido de trabalho, analisou experimentalmente o coeficiente geral de transferência de calor, fator de atrito, número de unidades de transferência (NTU), eficácia e fator de desempenho térmico. Os resultados demonstraram que o coeficiente geral de transferência de calor melhorou para 10,5–17,7%, 7,2–16,5% para eficácia e 1,05 para 1,194 para Critério de Avaliação de Desempenho (PEC), enquanto ocorreu um aumento inevitável do fator de atrito em pelo menos 21,3%. O trocador de calor de placa gravada teve um valor consideravelmente mais alto de 0,23–0,32 de NTU e 0,18–0,26 de eficácia, em uma comparação com um simples, um aumento de 9,7–18,5% e 7,2–16,5%, respectivamente.

Já BAHIRAEI e MONAVARI (2020) realizaram seu estudo em um trocador de calor de micro placa MPHE, usando nanofluido de alumina boemita Alooh/água, com nanofluido para o fluido quente e a água para fluido frio, foram analisadas os efeitos das formas das nanopartículas (cinco formato diferentes de partículas) no desempenho termo-hidráulico através do coeficiente global de transferência de calor. Variando as temperaturas em 10°, 20° e 30°C, com números Reynolds entre 500, 1000 e 1500, e a concentração de nanopartícula em 1%vol. Os resultados demonstraram que com o aumento do Re para todas as fórmulas de partículas, ocorria também aumento do coeficiente global de transferência de calor e da eficácia do MPHE.

WANG et al. (2018a) utilizaram como fluido refrigerante o EG/água em 50% do seu peso para cada, como nanofluido de GNP. Foram preparadas quatro concentrações (0,01%; 0,1%; 0,5%; 1,0% em peso), onde foi verificado o desempenho térmico e hidráulico do nanofluido no circuito quente e a água em circuito frio. A análise experimental mostrou que as concentrações de 0,01% a 0,1% em massa obtiveram bons resultados, porém o NF obteve uma queda de pressão aceitável, mas um desempenho de transferência de calor maior em comparação com o fluido base (água) no trocador de calor de placas.

Inúmeros trabalhos da literatura mostram a utilização de diversos tipos de nanofluidos, como o KUMAR et al. (2016) que estudaram o efeito de diferentes espaçamentos (2,5mm; 5,0mm; 7,5mm e 10mm) em PHE, com base no desempenho energético e exergético, usando vários NF como: TiO_2 , Al_2O_3 , Óxido de Zinco (ZnO), Óxido de Cério (CeO_2), híbrido ($\text{Cu}\text{pAl}_2\text{O}_3$), GNP e MWCNT, variando suas concentrações em (0,50%; 0,75%; 1,00%; 1,25% e 2,00% em vol.). A água foi utilizada com circuito de fluido quente e os NFs em fluido frio. Os melhores resultados de transferência de calor nos nanofluidos e seu desempenho exergético foram encontrados com um espaçamento de 5,0 mm. Verificou-se que

o nanofluido MWCNT/água, com um espaçamento de 5 mm no trocador obteve o coeficiente máximo de transferência de calor, que foi 53% maior em comparação com a água a 0,75%vol.

HUANG et al. (2015) investigaram a queda de pressão e desempenho de transferência de calor no PHE, utilizando como nanofluidos o Al_2O_3 /água e MWCNT/água, variando suas concentrações (2,18%; 3,89%; 5,68%; 7,04% e 10,36% em peso). Os resultados mostraram que o desempenho de transferência de calor do nanofluido MWCNT/água foi mais intensivo do que o de nanofluido Al_2O_3 /água para um dado de número Reynolds. A queda de pressão do NF foi razoavelmente superior à da água, e seu aumento se deve ao aumento da concentração em volume de partículas devido ao aumento da viscosidade.

KHAIRUL et al. (2014) analisaram a perda de exergia, os efeitos no coeficiente de transferência de calor, taxa de transferência de calor, queda de pressão e a potência de bombeamento em um trocador de calor de placa corrugada (CPHE), usando o nanofluido Óxido metálico de CuO/água e relataram que o nanofluido reduziu a destruição exergética em 24% empregando NF como transferência de calor com comparação com o fluido convencional. Foram preparados nanofluidos com 0,5%, 1,0% e 1,5%vol. de concentração de partículas e comparados com água. Utilizando a água como fluido quente e o nanofluido como fluido frio. A água mostrou uma perda de exergia de aproximadamente 24%, 16,25% e 8% mais alta, em comparação com os nanofluidos para as faixas de volume 1,5%, 1,0% e 0,5%, respectivamente. Portanto, as médias de 34%, 22% e 12% aumentaram a eficácia da transferência de calor exergética são encontrados para 1,5%vol., 1,0%vol. e 0,5%vol. de nanopartículas em comparação com a água, respectivamente.

TIWARI et al. (2013) fizeram uma investigação experimental para verificar a transferência de calor e a queda de pressão em um trocador de calor de placas onduladas, usando como nanofluido o CeO_2 /água como refrigerante, variando suas concentrações de (0,5%; 0,75%; 1,0%; 1,25%; 1,5%; 2,0% e 3,0 %vol.) para várias taxas de fluxo de fluido (1,0; 2,0; 3,0; 3,5 e 4,0 L/min), a diferentes temperaturas (25°, 30°, 35°, 40°, 45° e 50°C). Como resultados foram obtidos que o nanofluido no trocador de placas obteve um coeficiente de transferência de calor de 39% no máximo em comparação com a água na concentração ótima de 0,75%vol. O coeficiente de transferência de calor do nanofluido aumenta com o aumento da vazão volumétrica da água quente, e aumenta também com a diminuição da temperatura do nanofluido. A taxa de transferência calor diminuiu com a partícula maior que 0,75%vol. Sendo assim, deve-se evitar o uso de nanofluido de CeO_2 /água com concentração de partículas em volume superior a 0,75%vol., pois terá aumento dos custos e causará maior

queda de pressão, devido a sua viscosidade mais alta, sem qualquer benefício na transferência de calor.

PANDEY E NEMA (2012) avaliaram experimentalmente a perda de exergia em um PHE, utilizando como nanofluidos o Al_2O_3 /água variando suas concentrações (2%, 3% e 4%vol.). Eles afirmaram que o desempenho de transferência de calor do trocador de calor diminuiu com o aumento das nanopartículas no fluido base. E mostraram que a perda exergética aumentou com o aumento do volume da concentração. O valor médio de eficácia do trocador em base energética foi de 84% para água/água e 87% para água/nanofluido. Entre os quatro refrigerantes, a perda de exergia é menor com 2% de nanofluido para uma taxa de fluxo de refrigerante de até 3,7 L/min, sendo que a água apresenta o menor valor.

KWON et al. (2011) analisaram o desempenho da transferência de calor e queda de pressão dos nanofluidos de Al_2O_3 e ZnO em um CPHE, variando suas concentrações em (1,0%; 3,0%; e 6,0%vol.) para o Al_2O_3 e 1,0%vol. para o ZnO. Foi concluído, em base aos resultados, que o desempenho do trocador de calor a uma dada taxa de fluxo não aumentou com os nanofluidos. Os resultados mostraram que o coeficiente global de transferência de calor obteve um aumento do número de Reynolds subindo para 30% em 6%vol. Al_2O_3 em comparação com a água. Enquanto o coeficiente de transferência de calor em 1,0%vol. e 3,0%vol. do Al_2O_3 não foi alta em comparação com a água. Portanto, o resultado de investigações relacionadas ao desempenho da transferência de calor usando nanofluidos em trocador de calor por placas permaneceu inconclusivo.

MARÉ et al. (2011) experimentalmente compararam o desempenho térmico de dois nanofluidos, o Al_2O_3 /água e suspensões aquosas de CNTs/água a baixa temperatura em PHE, considerando o regime do fluxo laminar. Os resultados revelaram que o coeficiente de transferência de calor de convecção aumentou aproximadamente 42% e 50% para Al_2O_3 /água e CNTs/água, respectivamente.

KHAN et al. (2010) avaliaram a transferência de calor em CPHE para fluxo monofásico água/água, com corrente de fluido em contra fluxos. As temperaturas usadas foram entre (-40°C, 80°C), onde eles verificaram o efeito na mudança em ângulos de Chevron nas placas (30°/30°; 60°/60°; 30°/60° graus). Resultados experimentais mostraram efeito significativo de ângulo de chevron e número de Reynolds no coeficiente de transferência de calor.

PANTZALI et al. (2009a) estudaram experimentalmente a eficácia de nanofluidos de CuO/água em 4%vol. de nanopartículas como refrigerantes em um PHE com superfície modulada. Eles constataram que a presença das nanopartículas afeta grandemente as

propriedades do fluido base. O uso de NF pode ser uma solução promissora no sentido de projetar sistemas de troca de calor, especialmente quando o volume total do equipamento é a principal questão. Se o trocador de calor funciona em uma condição turbulenta, os nanofluidos serão eficazes apenas se o aumento da condutividade térmica for acompanhado de um aumento nominal da viscosidade. Os experimentos de transferência de calor resultaram que em uma miniatura de trocador de calor de placas, a substituição de água por um nanofluido geralmente aumenta a taxa de transferência de calor.

Uma variedade de trocadores de calor tem sido amplamente utilizada em diferentes aplicações na engenharia, diante dessa demanda, numerosos pesquisadores demonstraram a importância que os nanofluidos apresentam em trocadores de calor casco e tubo (STHE) como fluido de trabalho, para melhorar sua transferência de calor.

Como MAGHRABIE et al. (2020) que realizaram um estudo experimental sobre o efeito do ângulo de inclinação em (0° , 30° , 60° e 90°) de um trocador de calor de casca e tubo helicoidal (SHCT-HE) em seu desempenho utilizando água e os nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{água}$ e $\text{SiO}_2/\text{água}$, variando suas concentrações de nanopartículas em volume (0,1%, 0,2%, e 0,3%), com número de Reynolds entre 6.000 a 15.000, os experimentos foram conduzidos na configuração contrafluxo. Os resultados demonstraram que com o aumento do ângulo de inclinação aumenta o número de Nusselt da bobina e a eficácia do SHCT-HE, enquanto, diminui a queda de pressão da bobina. O ângulo de inclinação de 0° para 90° melhora a eficácia do SHCT-HE em 23%, 8,5% e 6,5% para a água base, e os nanofluidos $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{água}$ de $\text{SiO}_2/\text{água}$ com concentração de 0,1 vol%, respectivamente.

SAID et al. (2019) realizou uma investigação sobre a melhoria da eficiência e o desempenho da transferência de calor em um STHE operando com nanofluido $\text{CuO}/\text{água}$, variando suas concentrações de nanopartículas de 0,05%; 0,1% e 0,3% em volume. Resultados mostraram que o coeficiente convectivo de transferência de calor obtido no caso de operação com NF é ligeiramente superior em comparação com o fluido base (água), para as mesmas temperaturas de entrada de fluido e taxas de fluxo de massa. O estudo revelou que o nanofluido libera mais calor em comparação com a água quando usada como fluxo quente e obteve um aumento de 7% no coeficiente global de transferência de calor.

SALDANHA et al. (2020) investigaram um modelo em que as incertezas dos parâmetros como coeficiente de transferência de calor, queda de pressão, fator de atrito e sua otimização foram consideradas no modelo matemático de um STHE com escoamento monofásico, através de simulação pelo Matlab. Os resultados demonstraram que ao desenhar um STHE considerando as incertezas é importante, aplicando o método multicritério de

tomada de decisão com incertezas, para escolher uma solução racional dado um conjunto de alternativas geradas pela otimização de multiobjetivo. Caso não considerem as incertezas nos parâmetros investigados, podem ocorrer erros de valores nos resultados, as incertezas relacionadas ao problema STHE modificam o resultado da otimização, portanto, considerar as incertezas do problema, seja na fase de modelagem ou na fase de otimização, é fundamental.

Já WANG et al. (2019) avaliaram a transferência de calor em um STHE com defletores (de uma ou duas hastes) utilizando água/água como fluido base. Como resultado foi verificado que o coeficiente global de transferência de calor do DS-RBHX (trocador de calor com defletor duplo) é maior do que o da SS-RBHX (trocador de calor com um defletor) sob a mesma taxa de fluxo de volume em qualquer ponto de teste, o desempenho da transferência de calor do DS-RBHX é superior ao da do SS-RBHX.

SHIRVAN et al. (2018) investigou a transferência de calor e os efeitos das características da superfície ondulada no desempenho térmico em um STHE utilizando como fluido de trabalho água/água. Os resultados mostraram que o fator de desempenho térmico diminui com o aumento da taxa de fluxo de água quente.

ESFAHANI e LANGURI (2017) utilizaram o Óxido de Grafeno (GO) como nanofluido em um STHE, como fluido no circuito quente, preparado por oxidação do grafite natural em flocos purificada através do Método *Hummers* modificado. As concentrações utilizadas foram de 0,01% e 0,1% em peso, o comportamento reológico dos nanofluidos foi investigado a diferentes taxas de cisalhamento (10-1001/s), a temperaturas de 25° e 40°C e a condutividade térmica pelo método do fio quente transitório para as mesmas temperaturas. E obtiveram como resultados a menor perda de exergia no trocador de calor de casco e tubo sob condições laminares e turbulentas. Comparando a perda exérgica de nanofluidos de GO e a água destilada, mostrou que a água destilada causou 22% e 109% maior perda exérgica do que nas condições laminares.

SHAHRIJ et al. (2016) usaram nanofluidos de Al_2O_3 /água, Dióxido de Silício SiO_2 /água e ZnO /água para investigar o desempenho geral de STHE, variando suas concentrações em 0,3%vol. de ZnO , 0,5%vol. para Al_2O_3 e SiO_2 . Os resultados demonstraram que o maior coeficiente de transferência de calor foi observado para o nanofluido ZnO /água, e a menor transferência para o SiO_2 /água. No entanto, o desempenho geral do trocador de calor de Casco e Tubo pode ser melhorado perto de 35% usando nanofluidos de ZnO /água.

GAO et al. (2015) avaliaram a resistência ao fluxo e a transferência de calor em um STHE com defletores helicoidal descontínuo, comparando os cinco ângulos da hélice 8°, 12°, 20°, 30° e 40°, para óleo/água. Os resultados indicam que a queda de pressão no lado do

coeficiente de transferência do trocador de calor com menor ângulo de hélice é maior do que aqueles com maior ângulo, em uma dada vazão de volume do lado da carcaça. O trocador de calor com defletores helicoidais de ângulo da hélice 40° apresentou o melhor desempenho abrangente entre os cinco trocadores de calor de teste.

GHOZATLOO et al. (2014) conduziram uma análise sobre o coeficiente convectivo de transferência de calor de nanofluidos em um STHE, utilizando nanopartículas de GO/água variando suas concentrações em (0,05%, 0,075% e 0,1% em peso). Os resultados demonstraram que o coeficiente convectivo de transferência de calor de nanofluidos a base de Grafeno a 38°C aumentou para 35,6% a uma concentração de 0,1% em peso em comparação com a água, já a condutividade térmica do Grafeno a 25°C aumentou em 15,0%, 29,2% e 12,6% em 0,05%, 0,075% e 0,1% em peso, respectivamente.

ANOOP et al. (2013) também estudou a transferência de calor e a queda de pressão do nanofluido SiO₂/água em um STHE e PHE, variando as concentrações do nanofluido em (2%, 3%, 4% e 6% em peso). No circuito frio foi usada a água e o quente o nanofluido nos testes em contrafluxo. Os resultados revelaram que a adição de nanopartículas teve uma influência significativa nos trocadores. Tanto no aumento e deterioração do coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos dependendo das taxas de fluxo. Contudo, o efeito foi insignificante em menor fração de nanopartículas. Além disso, um aumento máximo de aproximadamente 5% no trocador de calor de casco e tubo foi observado para 2,0% em peso na menor taxa de fluxo de massa.

LOTFI et al. (2012) realizaram o teste experimental no qual se verificava a transferência de calor utilizando um nanofluido de MWNT/água em um trocador de calor casco e tubo. Os resultados indicaram que a transferência de calor é reforçada na presença de nanotubos de paredes múltiplas em comparação com o fluido base.

FARAJOLLAHI et al. (2010) usaram nanofluidos Al₂O₃/água e TiO₂/água em um STHE sob condições de fluxo turbulento, para avaliar o desempenho da transferência de calor, variando suas concentrações em (0,30%, 0,50%, 0,75%, 1% e 2%) em volume para Al₂O₃ e (0,15%, 0,3%, 0,75% e 0,5%) em volume para TiO₂. Eles relataram que os nanofluidos Al₂O₃/água apresentaram melhor comportamento de transferência de calor em maior concentração de volume, mas o nanofluido TiO₂/água apresentaram melhor comportamento de transferência de calor em concentrações mais baixas. Os resultados demonstraram que houve um aumento de 19-56% e 18-56% de concentração variando de 0,3%vol. a 2%vol., para Al₂O₃/água e TiO₂/água, respectivamente. Os nanofluidos Al₂O₃/água apresentaram melhor comportamento de transferência de calor do que os nanofluidos de TiO₂/água.

A revisão acima mostrou que os nanofluidos têm sido empregados em diversos trocadores de calor, esses nanofluidos podem melhorar as características térmicas dos trocadores de calor significativamente. Em alguns casos, fica inviável fazer pesquisas experimentais por causa dos elevados custos para a aquisição de trocadores de calor que forneçam dados experimentais precisos nas análises, uma alternativa para a realização destas análises é a obtenção de dados em análises numéricas através de Dinâmica dos Fluidos Computacionais – CFD que são simulações numéricas que podem verificar os processos físicos e físico-químicos em que apresentem escoamento de fluido, reduzindo assim os custos das pesquisas.

A fim de reduzir os custos associados aos estudos experimentais BAHIRAEI et al. (2019a) fizeram um estudo de simulação numérica realizadas em 3D aplicando nanofluido de Grafeno em um trocador de calor espiral, utilizando o sentido de fluido em contrafluxo avaliando a transferência de calor. Os resultados demonstraram que o índice de desempenho aumenta em qualquer concentração do número de Reynolds, de modo que o índice de desempenho para o nanofluido aumenta quase 142%, aumentando os números Reynolds de 1000 a 3000.

Eles também analisaram numericamente em BAHIRAEI et al. (2019b) o desempenho da transferência de calor de um nanofluido híbrido contendo nanopartículas de Grafeno composta por platina em um trocador de triplo tubo equipado com nervuras inseridas, variando suas concentrações em (0; 0,02%; 0,06%; 0,1%vol.) o sentido da corrente no trocador é em contrafluxo, no circuito quente utiliza-se o nanofluido e o circuito frio a água. Os resultados com base no aprimoramento da transferência de calor mostraram que os coeficientes globais de transferência de calor, a eficiência e a taxa de transferência de calor do trocador aumentaram, quando ocorre um aumento da concentração de nanopartículas de Grafeno.

Por outro lado, LIMA et al. (2019) utilizaram a simulação em CFD para analisar a transferência de calor e massa em um absorvedor que consiste em trocador de calor de placas plana, usando Amônia (NH_3)/água como fluido de trabalho. Seus resultados foram comparados com de outros encontrados na literatura, apresentando erros menores que 10%. Verificou-se que houve um aumento de 10% na fração de massa de amônia na entrada do absorvedor levando a um aumento de 17,9% na quantidade de amônia presente na saída do absorvedor.

SADRI et al. (2018) fizeram um estudo em uma série de simulações em CFD a fim de prever o desempenho da transferência de calor de nanofluidos contendo nanopartículas de

Grafeno tratados com cravos da Índia (CGNP) em um tubo de aço inoxidável aquecido, variando suas concentrações em (0,025%, 0,075% e 0,1% em peso). O modelo tridimensional foi construído e as condições de escoamento turbulento foram avaliadas usando o modelo SST k- ω . Os resultados demonstraram a precisão e confiabilidade do modelo de CFD proposto para avaliar o desempenho térmico dos nanofluidos. Em geral, há boa concordância entre os dados simulados e resultados experimentais para queda de pressão, com um desvio médio relativo de 8,02%; 6,82% e 5,94% para uma concentração de peso de CGNP de 0,025%; 0,075% e 0,1%, respectivamente. Além disso, houve uma boa concordância do coeficiente de transferência de calor convectivo com o desvio médio de aproximadamente de 8,2% e 6%, respectivamente, para um CGNP concentração de peso de 0,025%; 0,075% e 0,1%, respectivamente.

No mesmo contexto, COSTA et al. (2018) fizeram um estudo comparativo numericamente/experimentalmente da transferência de calor presente em um STHE, utilizando nanofluido a base de GE/água, com concentrações de 0,01% e 0,25% em volume, respectivamente da análise experimental e do modelo em simulação CFD. Os resultados demonstraram que houve um aumento de 3% na eficiência térmica para a concentração de 0,01%vol. no experimento executado. Já para a simulação com a concentração de 0,25% vol. demonstrou um aumento na eficiência energética de 15% em relação ao circuito com a água.

SAJJAD et al. (2018) avaliaram numericamente a transferência de calor convectiva de nanofolhas de GO/EG-W em regime de fluxo laminar, variando suas concentrações em (0,00; 0,01%; 0,05%; 0,07%; 0,1% em peso). Foi verificado que o aumento do coeficiente de transferência de calor foi menor quando comparado com a queda de pressão para todas as concentrações em peso. O aumento máximo do coeficiente médio de transferência de calor foi de 13% para $Re = 2000$ e concentração de peso de 0,1%. O fator de desempenho térmico dos nanofluidos foi menor que 1 para todas as concentrações de peso e os nanofluidos não mostraram vantagem sobre o fluido base como fluido de transferência de calor no regime de fluxo laminar.

KIM et al. (2018) investigaram a comparação da transferência de calor experimentalmente/numericamente através de simulação em CFD presente em nanofluido a base de Al_2O_3 /água em um trocador de calor de tubo, variando suas concentrações em 0,25%; 0,5% e 1% em peso. Os resultados indicaram que o coeficiente de transferência de calor e número Nusselt aumentou com o acréscimo do número de Reynolds e foi verificado que o número de Prandtl diminuiu quando a concentração de nanofluidos aumentou. Os dados experimentais e as características da tendência dos dados em CFD foram muito semelhantes.

SOMASEKHAR et al. (2018) fizeram um estudo em CFD aplicado em trocadores de calor casco e tubo, avaliando a transferência de calor e a queda de pressão com nanofluido Al_2O_3 /água variando suas concentrações em volume de 0,3%, 0,5%, 0,75%, 1%, 2% em condições de fluxo turbulento. Os resultados simulados em CFD são comparados com os resultados experimentais. A adição de nanopartículas ao fluido base (água destilada) causou um aumento significativo das características de transferência de calor.

Na mesma temática, WANG et al. (2018b) investigaram o desempenho da transferência de calor através de simulação CFD em trocador de calor casco e tubo com defletores helicoidais com diferentes ângulos (18° , 27° , 35° e 40°) no pré-aquecimento de chorume de água de carvão. Os resultados demonstraram que o número de Nusselt cresce gradualmente e o coeficiente de atrito diminui com o aumento da velocidade média no lado do casco. O número Nusselt e o coeficiente de atrito tendem a ser estáveis, e as parcelas ilustram que uma velocidade média adequada pode ser obtida para trocadores de calor de casco e tubo com diferentes dobras de defletores helicoidais. O desempenho de fluxo e transferência de calor no trocador com 50% de grau de sobreposição foi o mais alto entre os trocadores de calor simulados.

IZADKHAH et al. (2014) simularam através de CFD a transferência de calor em tubo circular contendo nanofluido de nanofolhas de Grafeno com dois fluidos bases, água/n-metilpirrolidona (NMP) em diferentes concentrações (0; 0,001%; 0,01%; 0,015%; 0,02%; 0,025%vol.). Os resultados mostram que o coeficiente convectivo de transferência de calor de dois nanofluidos aumentou pela adição de nanopartículas, bem como pelo aumento da vazão, especialmente em regime turbulento. O melhor desempenho é observado para o nanofluido de GE/água em comparação com o nanofluido GE/NMP.

2.1 CONTRIBUIÇÃO CIENTIFICA

Nesta dissertação está sendo proposta uma análise experimental e numérica via CFD da utilização de nanofluido a base de Grafeno em trocadores de calor, para verificar há melhoria no coeficiente global de transferência de calor. Segue as contribuições deste trabalho:

Uso de diferentes concentrações de nanopartículas de Grafeno nos trocadores de calor Casco e tubo, Tubo Duplo e Placas Planas, visto que, pesquisas envolvendo Grafeno são recentes e não apresentam muitos trabalhos publicados em diferentes trocadores, além de considerar o nanofluido promissor e inovador.

A caracterização morfologia do Grafeno, comprovando que o grafite que foi esfoliado eletroquimicamente realmente apresenta folhas em camadas de Grafeno, e seu método de fabricação e sua utilização como nanofluido possa contribuir para que ocorra um melhor desempenho de troca térmica entre fluidos de trabalho, através de suas propriedades termofísicas.

A utilização de testes com os nanofluidos em circuito de fluido quente, análise está, que na maioria das publicações e estudos os nanofluidos sempre são utilizados nos trocadores de calor no circuito de fluido frio.

Desenvolvimento do modelo de simulação em via CFD do trocador de calor tudo duplo, a validação de seu modelo e a comparação com os resultados experimentais.

E finalmente, um estudo da influência do trocador de calor é demonstrado com qual concentração de nanofluido, em qual temperatura e em qual trocador de calor o fluido obteve melhor desempenho térmico, para que em alguns casos, possa ser utilizado na indústria.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo refere-se aos conceitos teóricos da literatura. Objetiva-se nessa parte, uma abrangência sobre a transferência de calor, os tipos de trocadores de calor e suas aplicações e a utilização de nanofluidos como fluidos de trabalho. Discutindo também sobre o Grafeno, seu conceito, classificação, vantagens, suas aplicações em diferentes nanofluidos para utilização em trocadores de calor e em diferentes ramos da indústria e os impactos ambientais. Este capítulo permitirá uma melhor compreensão do tema proposto e os motivos das escolhas realizadas no desenvolvimento deste trabalho.

3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Segundo Incropera et al. (2008) a transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço, ou seja, pode ser definida como a transmissão de energia de uma região a outra resultante de uma diferença de temperatura entre eles (KREITH et al., 2011). A transferência de calor pode ocorrer de três formas: condução, convecção e radiação.

Transferência de calor por Condução está diretamente relacionado à atividade atômica, molecular e eletrônica (BEZERRA, 2003), sendo que a transferência de calor ocorre através do meio, que pode ser um sólido, pelo movimento de elétrons ou fluido pelo movimento cinético (INCROPERA et al., 2008), sendo transferida de um meio para outro. É assim que ocorre a condução de calor, a energia propaga-se em virtude da agitação molecular. Esse processo é mais eficiente em materiais como os metais, que são bons condutores de calor.

Transferência de calor por Convecção ocorre com o contato entre um fluido em movimento e uma superfície, estando os dois a diferentes temperaturas (KREITH et al., 2011). Este processo pode ser descrito como a transferência de energia ocorrendo no interior de um fluido devido aos efeitos combinados da condução e do escoamento global do fluido (INCROPERA et al., 2008), que é ocasionada pela diferença entre as densidades, fazendo com que o calor seja transferido para todo o líquido.

A transferência de calor em um trocador de calor geralmente envolve convecção em cada fluido e condução através da parede que separa os dois fluidos (ÇENGEL et al., 2012).

Transferência de calor por Radiação, também conhecida como irradiação, ocorre pela energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura acima de 0°C, não-nula, não precisando de um meio material para propagação, pois a energia é transmitida na forma de

ondas eletromagnéticas (ou ainda na forma de fótons) (INCROPERA et al., 2008). Assim, todos os corpos em presença uns dos outros, e que se apresentam a diferentes temperaturas, trocam calor por radiação (BEZERRA, 2003). Todos os corpos emitem radiações térmicas que são proporcionais à sua temperatura. Quanto maior a temperatura, maior a quantidade de calor que o objeto irradia.

3.2 TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são equipamentos que realizam a operação de troca de calor entre dois fluidos, que se encontra em diferentes temperaturas, e separados por uma parede sólida na maioria dos casos metálica, evitando a mistura de um com outro, possibilitando o resfriamento e o aquecimento de fluidos (ÇENGEL et al., 2012; KREITH et al., 2011; INCROPERA et al., 2008).

No trocador de calor, o fluido quente é aquele que fornece calor e se não houver mudança de fase se resfria. Já o fluido frio é aquele que recebe calor e se não houver mudança de fase se aquecerá (ARAUJO, 2002). Existem diferentes trocadores de calor para diferentes aplicações de transferência de calor, no qual, requerem diversos tipos de dispositivos e configurações de equipamentos de transferência de calor (ÇENGEL et al., 2012).

Os trocadores de calor podem ser classificados de várias maneiras, uma delas é pelo tipo de serviço que realizam dentro de um processo (ARAUJO, 2002). São utilizados, na prática, em uma ampla gama de aplicações, desde sistemas de aquecimento, ar condicionado doméstico, processos químicos e produção de potência em grandes usinas (KREITH et al., 2011).

De acordo com Saunders (1988) os trocadores de calor podem ser classificados em quatro categorias:

- Tubular: casco e tubo, duplo tubo, resfriadores a ar, tubo aquecido.
- De placa: placa, espiral, lamela, placa aletada.
- De materiais altamente resistentes a corrosão: grafite, vidro, teflon.
- Especiais: rotativos, elétricos.

Já Araújo (2002) exemplifica alguns tipos de trocadores e suas funções como:

- Trocadores/recuperadores: recuperam calor entre duas correntes do processo.
- Condensadores: são trocadores de calor que removem calor latente de um vapor.

- Resfriadores: são trocadores de calor utilizados para resfriar uma corrente do processo, utilizando água, como fluido refrigerante.
- Aquecedores: são trocadores de calor utilizados para aquecer uma corrente do processo.
- Refervedores: são equipamentos que fornecem energia na forma de vapor (calor latente) para colunas de destilação.
- Evaporadores: são utilizados para a evaporação de água ou de outro solvente para concentrar uma solução.
- Vaporizadores: são utilizados para vaporização de fluidos, exceto água.

Dentre todos os trocadores de calor apresentados daremos apenas ênfase nos trocadores de calor utilizados na pesquisa deste trabalho, descritos abaixo.

3.2.1 Trocador de calor duplo tubo

O Trocador de calor duplo tubo (Figura 1) é o mais simples trocador utilizado e é constituído por dois tubos concêntricos de diferentes diâmetros, geralmente com dois trechos retos e com conexões apropriadas nas extremidades de cada tubo, no qual, em um o fluido escoia através do tubo menor, enquanto o outro escoia através do espaço anular entre os dois tubos, a troca de calor ocorre através da parede do tubo interno (ARAÚJO, 2002; ÇENGEL et al., 2012).

As principais vantagens desse tipo de trocador são a facilidade de construção e de montagem, ampliação de área, ou seja, pode ser instalada área adicional em uma unidade já existente, facilidade de manutenção, pode-se ter fácil acesso para limpeza em ambos os lados de escoamento, dependendo das conexões das extremidades (KREITH et al., 2011; ARAÚJO, 2002).

Suas desvantagens são o grande espaço físico que ocupa para pouca área de troca que fornece, e o alto custo por unidade de área de troca de calor (ARAÚJO, 2002).

Figura 1 - Trocador de Calor Duplo Tubo.



Fonte: Global Trocadores (2019).

3.2.2 Trocador de calor casco e tudo

O trocador de calor casco e tubo (Figura 2) é o trocador mais comumente utilizado na indústria, a transferência de calor ocorre com um fluido escoando no interior dos tubos, enquanto o outro fluido escoar fora dos tubos, através do casco. Em alguns casos, são colocadas chicanas no casco para forçar o fluido do lado do casco a escoar através dele, aumentando a transferência de calor e mantendo a uniformidade do espaçamento entre os tubos (ÇENGEL et al., 2012).

As chicanas têm por função suportar os tubos, para evitar curvaturas e possível vibração e direcionar o escoamento do lado do casco, melhorando a transferência de calor e evitando regiões mortas (ARAÚJO, 2002). Elas são instaladas para aumentar o coeficiente convectivo no fluido no lado do casco, induzindo turbulência e um componente de velocidade na direção do escoamento cruzado. Elas apóiam fisicamente os tubos, reduzindo a vibração dos tubos induzida pelo escoamento (INCROPERA et al., 2008).

O trocador de calor casco e tubo são compostos por um casco cilíndrico, contendo um conjunto de tubos, colocado paralelamente ao eixo longitudinal do casco. Os tubos são presos em suas extremidades, a placa perfurada denominadas espelhos em todos os furos corresponde um tubo do feixe. Os espelhos, por sua vez, são presos ao casco. Os tubos que compõem o feixe atravessam várias placas perfuradas que contém as chicanas (ÇENGEL et al., 2012; INCROPERA et al., 2008; ARAÚJO, 2002).

Figura 2 - Trocador de Calor Casco e Tubo.



Fonte: Incase (2019).

O trocador de calor casco e tubo podem operar ainda com líquidos, gases ou vapores, como condensador ou vaporizador, em posição horizontal ou vertical, dependendo da necessidade da operação (ÇENGEL et al., 2012). Os tubos podem ser de inúmeros materiais, na maioria das aplicações são de metais, como aço carbono, cobre, latão, aço inox e ligas nobres. Há trocadores com tubos de grafite e teflon com especificações próprias (ARAÚJO, 2002).

3.2.3 Trocador de calor placas planas

O trocador de calor placas planas (Figura 3) consiste em uma série de placas planas corrugadas, independentes de metal, sustentadas por barras, que são presas por compressão, com passagens para o escoamento. Os fluidos quentes e frios escoam em passagens alternadas, e a troca de calor se dá através de cada placa, assim, um lado tem-se o fluido frio e do outro o quente (KUMAR et al., 2015; ÇENGEL et al., 2012; ARAÚJO, 2002).

Segundo Araújo (2002) as placas são feitas por prensagem e apresentam superfície com corrugações, as quais fornecem maior resistência à placa e causam maior turbulência aos fluidos em escoamento. Podem ser feitas de qualquer material que possa ser prensado. Normalmente, são utilizados materiais nobres como aço inox, titânio, ligas titânio-paládio, entre outros. Os mais utilizados é o aço inoxidável 316 (INCROPERA et al., 2008).

Figura 3 - Trocador de Calor Placas Planas.



Fonte: Alfa Engenharia (2019).

As principais vantagens deste tipo de trocador é que este trocador de calor fornece grandes áreas de troca de calor, ocupando pouco espaço, tem baixo custo inicial, são trocadores compactos comparados com o casco e tubo, e podem operar com mais de dois fluidos (ARAÚJO, 2020).

Apresentam elevados coeficientes de transferência de calor para ambos os fluidos, obtidos em razão das corrugações das placas e incrustação reduzida em razão da alta turbulência, ocasionando menos paradas para limpeza. Com um pequeno volume de fluido retido no trocador permite respostas rápidas no controle de variáveis (ÇENGEL et al., 2012; KREITH et al, 2011; WANG e LI, 2016).

3.2.4 Manutenção dos trocadores de calor

A manutenção dos trocadores de calor é um serviço utilizado para corrigir ou prevenir algum problema apresentado pelo equipamento, com o objetivo de melhorar ou aumentar sua eficiência energética, além de prolongar sua vida útil. Os tipos de manutenção realizada nos trocadores de tubo duplo, casco e tudo e placas planas são a eliminação de vazamentos, limpeza, retubagem (desentupimento dos canais como o acúmulo de sujeira na parede de seus tubos) e substituição do casco.

A manutenção realizada nos trocadores de calor tubo duplo é a de mais fácil acesso em comparação com outros trocadores, porém necessita de um longo espaço físico ao seu redor para que ela seja realizada, o que geralmente em indústria este espaço é bem reduzido, por

este motivo é que diversas empresa opta por usar trocadores de placa planas, pois apresentam menores dimensões e não necessitam de longo espaço para sua instalação e manutenção.

3.3 NANOFLUIDOS

De acordo com Zamzamiam et al. (2011) o termo Nanofluido (NF) é aplicado a uma suspensão de partículas sólidas, que pode ser obtida pela dispersão de diferentes nanopartículas (GHOZATLOO et al., 2014) de tamanho nanométrico em fluidos convencionais, nanopartículas com um intervalo de 1–100 nm (AKYÜREK et al., 2018). Estes sólidos podem ser metais, óxidos metálicos, grafite (Figura 4) ou nanotubos de carbono - NTC (IJADKHAN et al. 2018).

O uso de partículas de dimensões nanométricas foi usado em vários estudos realizados no Laboratório Nacional Argonne há cerca de uma década por Choi (1995), que foi o primeiro a chamar os fluidos com partículas suspensas de dimensões nanométricas de Nanofluidos (DUANGTHONGSUK e WONGWISES, 2009).

Figura 4 - Nanofluido de Grafeno.



Fonte: O autor, 2019.

Os fluidos convencionais de transferência de calor têm baixas propriedades de transferência, portanto, há sempre uma demanda crescente para desenvolver fluidos que melhorem sua transferência (SAID et al., 2019). Os fluidos de processos convencionais, como água, óleo e etilenoglicol com baixa condutividade térmica, não pode satisfazer a necessária transferência de calor de alta intensidade em muitos setores diferentes, incluindo transporte, microeletrônica, aeroespacial e manufatura (ESFAHANI e LANGURI, 2017).

Uma maneira de melhorar esta deficiência é com o uso dessas partículas nanométricas, quando adicionadas aos fluidos base, mostram propriedades melhoradas quando comparadas com seus fluidos base (KUMAR et al., 2015).

As características mais proeminentes de tais fluidos incluem características de calor aprimoradas, como transferência de calor por coeficiente de convecção e condutividade térmica em comparação com o fluido base, sem alterações consideráveis nas propriedades físicas e químicas (ZAMZAMIAM et al., 2011).

Os nanofluidos são refrigerantes em potencial, que podem proporcionar excelente desempenho térmico em trocadores de calor, para aplicações de transporte de energia térmica, que promete maior absorção de calor e capacidade de transporte de calor (KHAIRUL et al., 2014; KUMAR et al., 2015).

Este aumento considerável na transferência de calor pode, sobre condições operacionais adequadas, levarem a uma diminuição de despesas, diminuição da entrada de matérias-primas, tamanho reduzido do equipamento, e consequentemente, redução de despesas e aumento na eficiência (ZAMZAMIAM et al., 2011).

3.3.1 Tipos de Nanofluidos

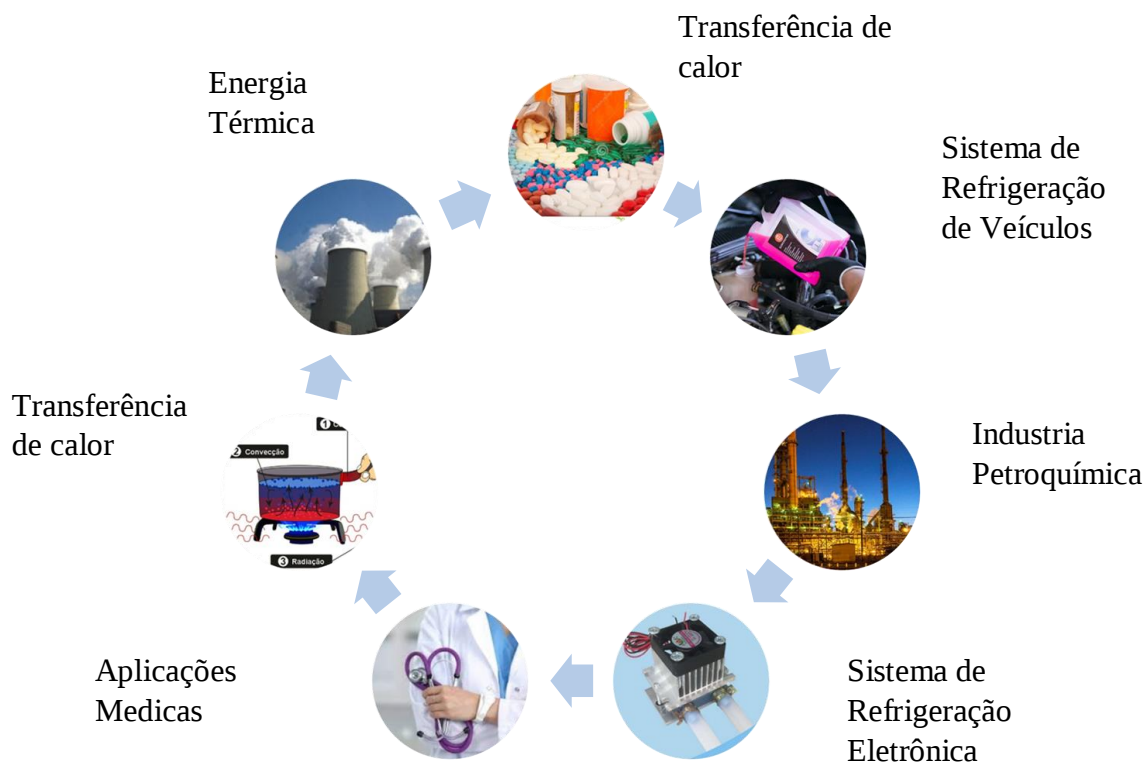
Diversos estudos estão sendo feitos com diferentes nanofluidos por pesquisadores ao redor do mundo. O desempenho e eficiência dos fluidos de trabalhos são de primordial importância, para suas utilizações em diferentes aplicações industriais. Vários fatores, incluindo tamanho da nanopartícula, forma, composição do material, concentração de volume, e a acidez afeta a condutividade térmica dos nanofluidos (KUMAR et al., 2017).

Entre os diferentes tipos de NFs de partículas metálicas que estão sendo usados estão os Cu, Al, Fe, Au, e Ag, e de NFs de partículas na forma oxidada estão os Al_2O_3 , CuO, Fe_3O_4 , TiO_2 , CeO₂, SiO₂, ZnO, e de partículas à base de Grafeno estão o GNP, GO, RGO, que receberam notável atenção devido a sua grande condutividade térmica (k) intrínseca e baixa densidade comparada as nanopartículas de metais ou óxidos metálicos (WANG et al., 2018a). De acordo com Hajjar et al. (2014) os NFs de óxido de Grafeno em diferentes concentrações mostraram condutividades térmicas substancialmente mais altas que fluidos base.

3.3.2 Aplicações de Nanofluidos

Os nanofluidos têm propriedades inovadoras que os tornam potencialmente úteis em muitas aplicações, por isso, foram testados em vários campos: aplicações médicas, produtos farmacêuticos e em processos ambientais, na transferência de calor (HUMINIC e HUMINIC, 2012), na geração de energia incluindo sistemas solares térmicos, sistemas petrolíferos (KASAEIAN et al. 2017), sistemas de refrigeração como nanorefrigerantes, sistemas de refrigeração de veículos (AMIRI et al., 2016), motores híbridos (CAMPOS, 2010), compressores e geradores (BARBOSA et al., 2016), sistemas de travagem hidráulicas, sistemas de refrigeração eletrônicos (ALYMOV et al., 2016), refrigeradores domésticos (BENITO, 2012), microeletrônica (EL-KADY E KANER, 2013), células de combustível (RAJI et al., 2017; QIE et al., 2017), na usinagem, sistemas de combustão e na redução da temperatura dos gases de combustão da caldeira (SOMASEKHAR et al., 2018; AKYÜREK et al., 2018; ESFAHANI e LANGURI, 2017; ZAMZAMIAM et al., 2011). A figura 5 apresenta algumas das diferentes aplicações dos nanofluidos.

Figura 5 - Esquema de diferentes aplicações dos nanofluidos.



Fonte: O autor, 2019.

3.3.3 Vantagens dos nanofluidos

Nos últimos anos, os nanofluidos mostraram-se que são capazes de melhorar notavelmente a condutividade térmica, estabilidade e o coeficiente de transferência calor, com menor queda de pressão em comparação com fluidos base, ajudando a reduzir a energia consumida e os custos (ABBASIAN e AMANI, 2012; GHOZTLOO et al., 2014).

Eles são adequados para aplicações de engenharia e apresentam duas vantagens principais sobre as suspensões sólido/líquido:

1. Maior área de superfície específica, resultando em mais superfície de transferência de calor entre partículas e fluidos e;
2. Maior dispersão e estabilidade com movimento browniano de partículas aumentadas (ESFAHANI e LANGURI, 2017).

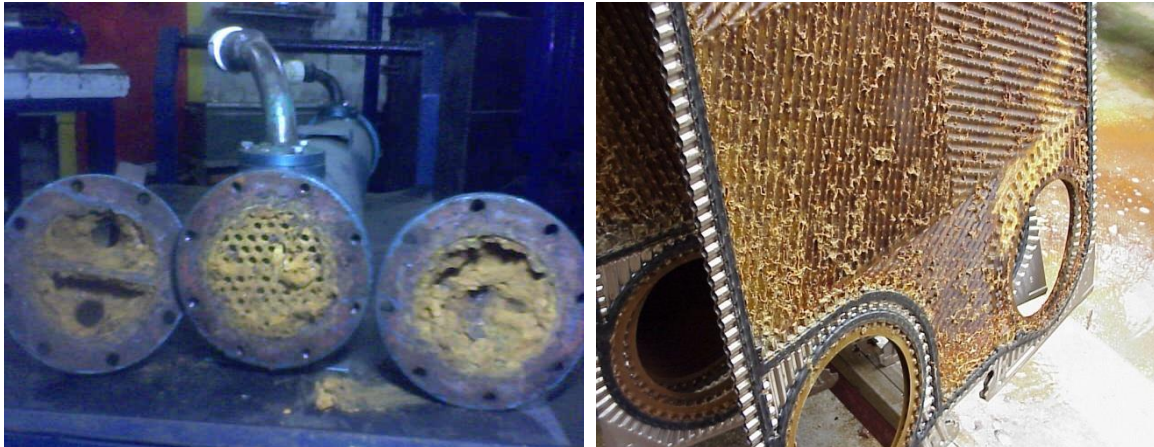
Essas vantagens apresentam uma tendência crescente no uso de NF em diferentes tipos de trocadores de calor, devido ao consumo otimizado de energia. E suas propriedades termo fluídas desempenham um papel vital na melhoria de tais dispositivos eficientes de transferência de calor (FARAJOLLAHI et al., 2010).

3.3.4 Desvantagens dos nanofluidos

O uso de partículas grandes pode causar problemas graves no equipamento de transferência de calor. Em particular, partículas grandes tendem a não ficar em suspensão e, assim, ao passar por micro canais podem causar obstrução severa e entupimento do fluxo de canais (Figura 6), com pouca estabilidade e aumento considerável na queda de pressão (SAJJAD et al., 2018). Esses problemas podem ser resolvidos usando dispersões de partículas de tamanho nanométrico (AKYÜREK et al., 2018).

A instabilidade de partículas resulta em incrustação de partículas no reservatório, tubos, bombas e outros equipamentos de ciclo térmico, bem como pressão reduzida (ZAMZAMIAM et al., 2011).

Figura 6 - Obstruções de canais em trocadores de calor.



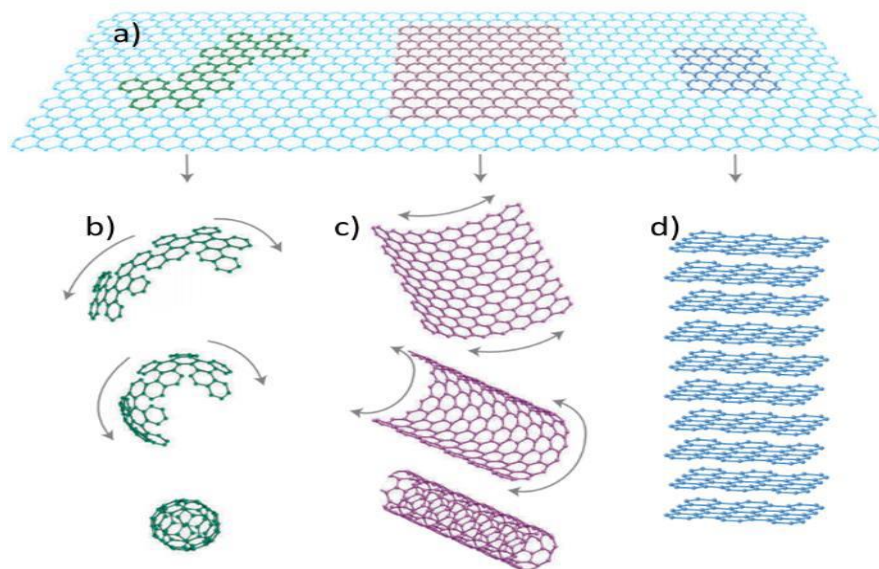
Fonte: AC industrial, 2019.

3.4 GRAFENO

O Grafeno (GE) é definido como um material ordenado, constituído exclusivamente de átomos de carbono em folha plana, formando uma camada monoatômica, organizada em células hexagonais com átomos hibridizados na forma sp^2 , resultando em um elétron livre por átomo de carbono no orbital p , dispostos em uma estrutura com morfologia do tipo cristal em “favo de mel”.

GE apresenta propriedades estruturais, alta mobilidade eletrônica e de transporte únicas na natureza, com excelentes propriedades mecânicas, químicas e térmicas. Podendo ser considerado como o único sistema bidimensional realmente genuíno na natureza, por isto foi classificado como um material 2D (HAQUE et al., 2018; BORDIGNON, 2018; COSTA et al., 2018; SEGUNDO E VILAR, 2016). A Figura 7 apresenta as formas alotrópicas dos átomos de carbono.

Figura 7 - Mãe de todas as formas de grafíticas, as quatro formas alotrópicas dos átomos de carbono: a) Grafeno como um material de construção (2D) para materiais de carbono de todas as outras dimensionalidades; b) Pode ser embrulhado para formar fulerenos (0D); c) Enrolado para formar nanotubos de carbono (1D) ou d) Empilhado para formar grafite (3D).



Fonte: Geim e Novoselov (2007).

A estrutura do GE foi conhecida há mais de 70 anos, desde o estudo do grafite por cristalografia de raio-X (WALLACE, 1947). Entretanto, somente em 2004 o GE foi descoberto por Geim e Novoselov (2004) pesquisadores da Universidade de Manchester, que desenvolveram um método para isolar planos de GE individuais sobre uma superfície de óxido de silício (SiO_2) (BORDIGNON, 2018), um feito julgado impossível, através desta descoberta ganharam o Premido Nobel da Física em 2010, pela identificação, isolamento (Geim e Novoselov, 2007), produção e caracterização de Grafeno obtido intencionalmente pelo método de esfoliação mecânica (PINTO, 2016).

O termo GE foi adotado em 1962, a partir da junção de grafite com o sufixo (eno), devido à dupla ligação existente. Sendo uma das mais novas nanopartículas amplamente utilizadas em vários campos da nanotecnologia e tornando-se um material utilizável em várias aplicações (IJADKHAN et al., 2014).

Diferentes nanofluidos à base de GE pode ser utilizado, como podem ser vistos nas diferentes pesquisas abaixo discriminadas:

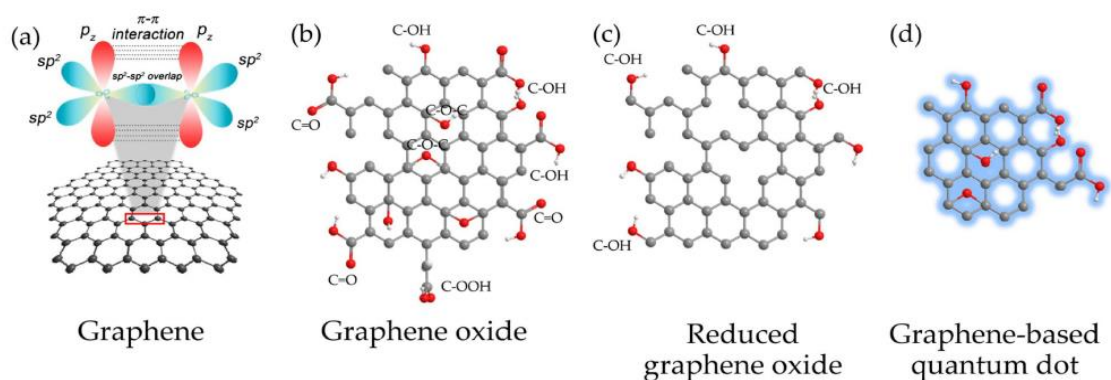
- Pontos quânticos de Grafeno - GQD: utilizado nas pesquisas de Sedaghat e Yousefi (2019), Soleymaniha et al. (2018), Ettefaghi et al. (2017). Uma das vantagens dos pontos quânticos de Grafeno é sua estabilidade em longo prazo dentro do fluido base, sem qualquer utilização de surfactante químico.

- Óxido de Grafeno - GO: Hummers e Offeman (1958), Sajjad et al. (2018), Efahani e Languri (2017) e Ghosatloo et al. (2014).
- Óxido de Grafeno Reduzido - RGO: Eda et al. (2008).
- Nanopartículas de Grafeno Tratados com Cravos da Índia - CGNPs: Sadri et al. (2018), Sadri et al. (2017).
- Nanopartículas de Grafeno - GNP: Costa et al. (2018), Kumar et al. (2016).
- Grafeno Compactado de Nitrogênio - CNDG: Goodarzi et al. (2016),
- Nanopartículas de Grafeno Decorado com Platina - GNP-PT: Bahiraei et al. (2019a); Bahiraei et al. (2019b); Yarmand et al. (2016).

A Figura 8 e 9 ilustra os principais tipos de materiais a base de Grafeno que são utilizados no preparo de nanofluidos (NF) para várias aplicações de engenharia.

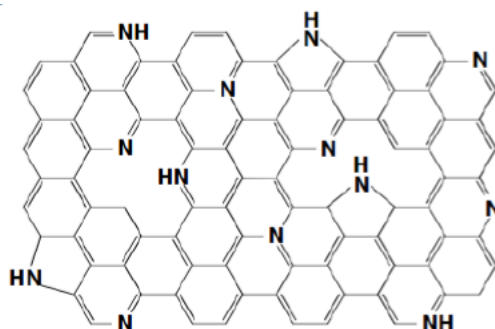
O Grafeno apresenta uma estrutura que confere um conjunto de propriedades intrínsecas que tornam seu material de elevado interesse científico e tecnológico. Propriedades como a excelente condutividade elétrica e térmica, a transparência ótica, a grande resistência mecânica e flexibilidade, concedem uma ampla aplicabilidade em diferentes ramos tecnológicos tais como, painéis e células solares, eletrônica, detectores gasosos, transístores de alta velocidade entre outras potenciais aplicações (PINTO, 2016).

Figura 8 - Principais estruturas de materiais a base de Grafeno para nanofluidos: a) Grafeno puro (átomos de carbono de arranjo puro) com átomos de carbono hibridizados e o Grafeno quimicamente modificado, incluindo o; b) Óxido de Grafeno (GO), c) Óxido de Grafeno Reduzido (RGO) e d) Pontos quânticos de Grafeno (GQD).



Fonte: adaptado de Arshad et al. (2019).

Figura 9 - Grafeno dopado de nitrogênio.



Fonte: Sakulsermsuk, (2016).

3.4.1 Propriedades do Grafeno

O GE apresenta uma qualidade cristalina elevada, podendo ser quimicamente estável à temperatura ambiente, no seu estado livre (suspensão), apresenta ligeiras ondulações e enrugamentos que permitem aniquilar as vibrações térmicas que desestabilizam a estrutura (PINTO, 2016).

O Grafeno é o material mais leve, resistente e fino que existe, sendo 200 vezes mais forte que o aço e 1 milhão de vezes menor que um fio de cabelo (SEGUNDO e VILAR, 2016). Devido a sua estrutura, ele apresenta propriedades físicas e químicas que justificam o número crescente de publicações relacionadas a aplicações diversas com este material (COSTA et al., 2018).

Segundo COSTA et al. 2018 a condutividade elétrica do o GE é considerado como um semicondutor “zero-gap”, onde a mobilidade eletrônica pode exceder $15.000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, apresentando uma resistividade da ordem de 10^{-6} ohm.cm , para uma folha única de GE. Dependendo da aplicação, as propriedades do Grafeno podem ser modificadas de diversos modos, tais como, a dopagem química, pressão mecânica ou manipulação do campo elétrico aplicado (GEIM e NOVOSELOV, 2007).

3.4.1.1 Condutividade Térmica do Grafeno

A condutividade térmica do GE em temperatura ambiente pode atingir 5000 W/m.K (para comparação, a do cobre é 400 W/m.K), o que sugere usos potenciais para gerenciamento

térmico em uma variedade de aplicações. Apresenta área superficial muito elevada ($2600 \text{ m}^2/\text{g}$), muito maior do que as áreas superficiais do grafite ($10 \text{ m}^2/\text{g}$) e nanotubos de carbono ($1300 \text{ m}^2/\text{g}$) (SADEGHINEZHAD et al. 2016)

Alta condutividade térmica do GE sugere melhor desempenho desta nanopartícula em comparação com outras nanoestruturas, mesmo nanotubos de carbono. O problema é que o GE não pode se dispersar na água por muito tempo; assim, é necessário funcionalizar o GE ou usar surfactantes para torná-lo hidrofílico (GHOZATLOO et al. 2013). Esses tratamentos levam à formação de defeitos, promovem significativamente o espalhamento de fônons e reduzem a condutividade térmica do Grafeno (IJADKHAN et al. 2014).

Quanto maior a concentração de GE, maior será sua condutividade térmica (ESFAHANI E LANGURI, 2017). Vários estudos demonstraram que os nanofluidos a base de água, etilenoglicol apresentam um efeito melhorado da condutividade térmica do fluido de transferência de calor em sua taxa de transferência de calor (SEDAGHAT e YOUSEFI, 2019).

3.4.1.2 Estabilidade do Grafeno

Um dos principais desafios na aplicação de nanofluidos na indústria é a estabilidade das nanopartículas no fluido base. O uso de surfactantes pode ajudar a estabilizar as nanopartículas, contudo, encontrar as nanopartículas e surfactantes mais adequados para cada sistema é de grande importância (ASKARI et al., 2016).

Para dispersar o GE em fluidos a base de água, vários autores utilizaram surfactantes como o caso da pesquisa de Akyürek et al. (2018) e Sarsam et al. (2016) que investigou o efeito de vários produtos químicos tensoativos, incluindo Dodecil benzeno sulfonato de sódio (SDBS), Dodecil sulfato de sódio (SDS), brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB) e goma arábica (GA), sobre a estabilização das nanoplaquetas de Grafeno (GNP) na água. Utilizando-se de um ultrassom para homogeneizar o nanofluido. Os resultados obtidos mostraram que a amostra contendo surfactante SDBS a razão de 1:1 e duração ultrassônica de 60 minutos apresentaram boa estabilidade em 60 dias, ou seja, houve decantação das GNP após este período, no Apêndice B é apresentado o teste de qual o melhor surfactante é utilizado para esta obra.

A adição de surfactantes afeta o desempenho da transferência de calor dos nanofluidos, especialmente em altas temperaturas (AKYÜREK et al., 2018), porém eles devem ser utilizados no preparo do fluido. A estabilidade dos nanofluidos depende da

característica da nanopartícula depositada no fluido base (ARSHAD et al., 2019), vários autores utilizaram-se de vários métodos para verificar a estabilidade do nanofluido em suas pesquisas, como (BORDIGNON, 2018), (HAQUE et al., 2018), (SADEGHINEZHAD et al., 2016), (AMIRI et al., 2016) e (YANG et al., 2012), dentre outros.

Segundo Arshad et al. (2019) existem vários métodos para se avaliar a estabilidade dos nanofluidos, como:

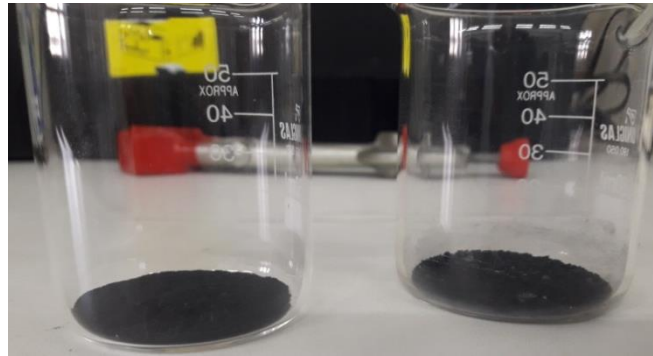
- Medições do potencial Zeta
- Espectrofotômetro UV-Vis
- Captura de fotografias de sedimentação
- Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM)
- Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM)
- Método de equilíbrio de sedimentação
- Método 3ω
- Centrífuga do analisador de dispersão
- Medição de condutividade térmica

3.4.2 Vantagens do Grafeno

As vantagens das nanopartículas de GE sobre outras nanopartículas podem ser listadas como: alta condutividade térmica, alta estabilidade, baixa erosão e corrosão, maior mobilidade do transportador (ARSHAD et al., 2019), facilidade de síntese, tempo de suspensão longo (significando mais estável), grande relação área-volume e baixa demanda por potencial de bombeamento (ESFAHANI e LANGURI, 2017), maior condutividade térmica, redução no estoque de fluido de transferência de calor e economia de energia significativa (SADEGHINEZHAD et al., 2016). Pode também apresentar vantagens em aplicações eletroquímicas, devido principalmente aos seus atributos atóxicos e propriedades condutoras. (SEGUNDO E VILAR, 2016)

O Grafeno apresenta uma grande condutividade térmica, superior até mesmo à do diamante (BORDIGNON, 2016) e o maior módulo de elasticidade entre os materiais (COSTA et al., 2018). De acordo com Segundo e Vilar (2016) as estruturas eletrônicas do GE podem apresentar propriedades de resistência mecânica maior que a do aço, mobilidade eletrônica mais elevada que o silício, condutividade térmica mais alta que o cobre e área superficial maior que a observada para o grafite (Figura 10).

Figura 10 - Grafeno em pó.



Fonte: O autor, 2019.

3.4.3 Desvantagens do Grafeno

O GE tem uma grande desvantagem associada que se prende com o fato de ser extremamente insolúvel em solventes orgânicos e aquosos (BORDIGNON, 2018). Esta insolubilidade surge devido à atração existente entre as folhas de Grafeno por via de interações de Van der Waals (dispersão do GE no fluido a base de água), o que promove a sua aglomeração (HAQUE et al., 2018). Este fato torna a utilização de Grafeno em aplicações térmicas complicada, como em nanofluido para utilização em trocadores de calor. Portanto é necessário promover uma boa dispersão destes materiais em solução. O Apêndice B.1 apresenta sobre a utilização surfactantes e aglomeração de nanopartículas observada nesta obra (Figura 11).

Figura 11 - Decantação de nanopartículas de Grafeno após 24h.



Fonte: O autor, 2019.

3.4.4 Preparação de nanofluidos a base de Grafeno

Existem na literatura diversos métodos de desenvolvimento e aperfeiçoamento para produção de nanofluidos de GE. Em função da qualidade do produto desejado e da aplicação a que se destina, um ou mais métodos podem ser utilizados.

Do ponto de vista da engenharia, a convecção forçada utilizando fluidos em regimes de fluxo laminar ou turbulento é sempre uma solução para o transporte de calor (SADEGHINEZHAD et al., 2016). As concentrações térmicas dos nanofluidos aumentam à medida que a concentração de volume de partículas aumenta, sendo maior que a da água (HUANG et al., 2015).

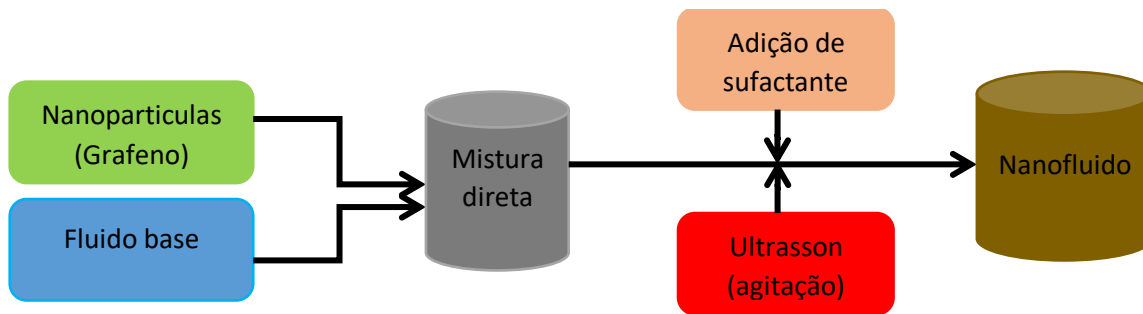
Os NF são produzidos dispersando partículas de tamanho nano no fluido base, incluindo água, óleo, etilenoglicol (EG) e normalmente são produzidos com único passo (por exemplo, óxido de Grafeno, STANKOVICH et al. 2007) ou método de preparação de dois passos (como o GNP)(ARSHAD et al., 2019).

De acordo com Arshad et al. (2019) no método de um passo o nanofluido é preparado simultaneamente, produzindo e dispersando nanopartículas na base líquida, que incluem os métodos de deposição química de líquidos e vapores. Nele ocorre um método de uma etapa, secagem, armazenamento, transporte e dispersão de estabilidade das nanopartículas, para minimizar a sua aglomeração.

O método mais usado para sintetizar nanofluidos é o método de dois passos (duas etapas), que utiliza o nanopartículas, nanoferragens, nanovaras, nanofios, nanofolhas, nanotubos, gotículas e outros nanomateriais (ARSHAD et al., 2019). No método de dois passos, as nanopartículas são sintetizadas na forma de pó seco ultrafino e posteriormente dispersas no fluido base mediante processos físicos (Oliveira, 2012).

Inicialmente, o pó seco é preparado por métodos mecânicos e químicos, como moagem. Este pó nanizado é então misturado com o hospedeiro fluido (água, ou etilenoglicol, ou óleo) com vibradores ultrassônicos, agitação de força magnética, alta mistura de cisalhamento, homogeneização e moagem de bolas. A agitação constante reduz a aglomeração de nanopartículas, que é uma questão importante de sintetização de nanofluido (WANG et al., 2008). A figura 12 apresenta um esquema do método de preparo de dois passos, método este, que é utilizado no preparo dos nanofluidos desenvolvido neste trabalho no capítulo 4 na seção 4.3 é apresentado o seu preparo e no Apêndice B é realizado a análise de estabilização no uso dos surfactantes utilizados.

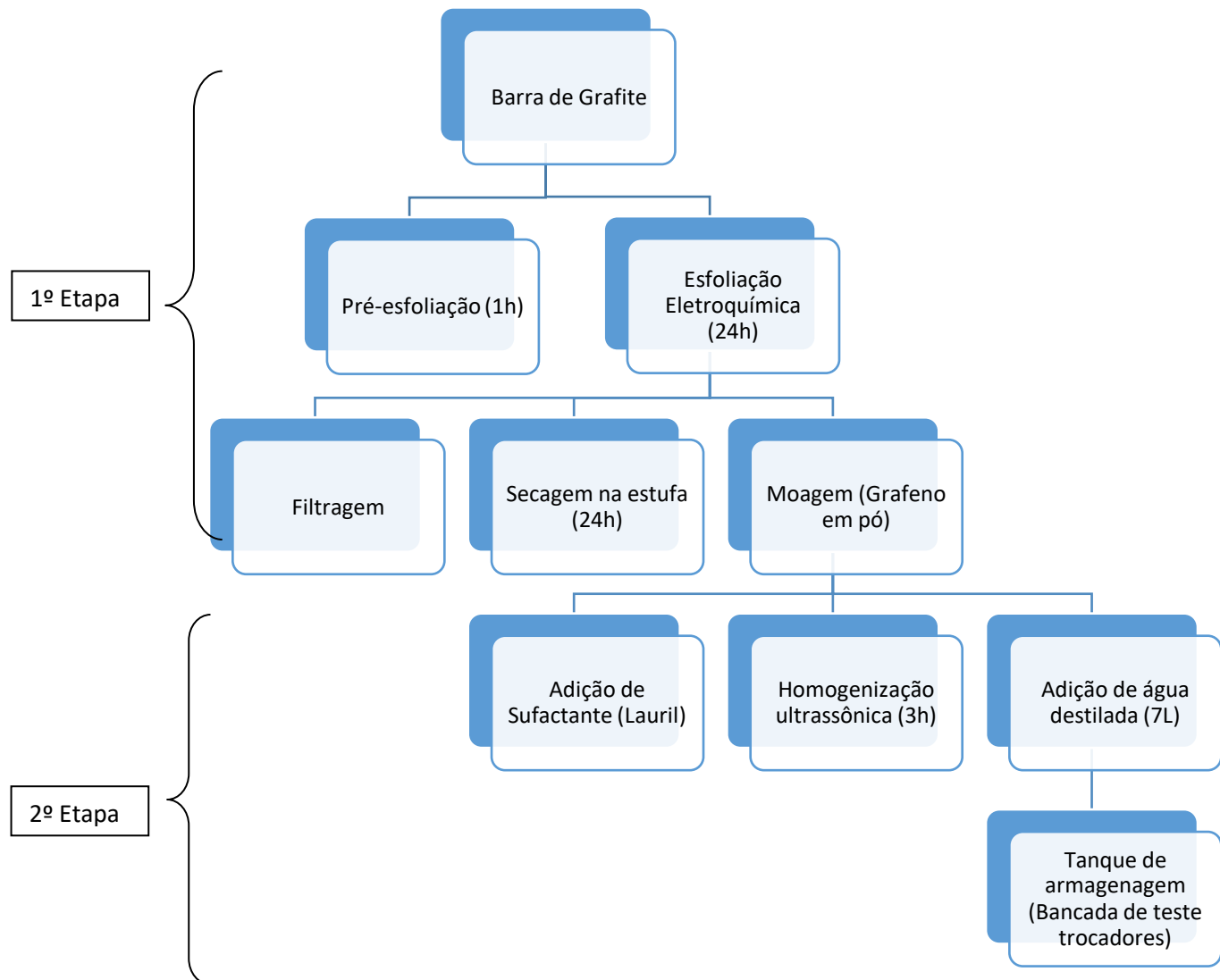
Figura 12 - Método de preparação de dois passos para nanofluidos.



Fonte: adaptado de Solangi et al. (2015).

O método de *Hummers* e *Offeman* (1958) foi desenvolvido para produzir Óxido Grafeno – GO como método mais rápido, seguro e eficiente e é o método mais utilizado por vários pesquisadores. Como Soleymaniha et al., (2018) que empregou um método modificado de *Hummers* para preparar as folhas de óxido de Grafeno a partir de grafite natural em pó. Antes do desenvolvimento do método de *Hummers*, a produção de GO era perigosa e lenta devido ao uso de ácido nítrico e sulfúrico (ANGAYARKANNI E PHILIP, 2015). A Figura 13 apresenta o fluxograma de preparo do nanofluido desenvolvido para esta pesquisa.

Figura 13 - Fluxograma de preparo do Nanofluido de Grafeno.



Fonte: O autor, 2019.

A Tabela 1 apresenta diferentes métodos de preparações de GE, tal como esfoliação mecânica, métodos químicos, como a redução química do óxido de grafite (REN et al., 2018) e a deposição química em fase vapor (CVD) (CHEM et al., 2010). O procedimento de síntese pode ser amplamente classificado em deposição de vapor químico (CVD), esfoliação, dopagem e redução do óxido de Grafeno (ANGAYARKANNI E PHILIP, 2015).

Tabela 1 - Comparativo de diferentes métodos de preparação do Grafeno.

Comparativo de diferentes métodos	Materiais de partida	Técnicas de operação	Vantagens	Desvantagens	Sugestões	Autores
Esfoliação mecânica	Grafite pirolítico altamente orientado - HOPG	Fita adesiva	Simplicidade, elevada qualidade estrutural e eletrônica	Delicado, demorado, baixo rendimento	Pesquisa fundamental	GEIM E NOVOSELOV (2004)
Crescimento epitaxial CVD	Hidrocarbonetos (tal como CH ₄)	Deposição química em fase de vapor sob alta temperatura	Produção em grande escala, boa qualidade, uniforme	Temperatura e custo elevados, não uniforme, baixo rendimento	Pesquisa básica e eletrônica à base de Grafeno	SUTTER et al. (2008)
Conversão de nanodiamante	Nanodiamante	Aquecimento do nanodiamante em alta temperatura	Simples, direto	Temperatura alta, alto custo	Matérias compostos	SUBRAHMANYA M et al. (2008)
Redução química do óxido de grafite	Grafite	Esfoliação e oxidação do grafite, subsequente redução do óxido de grafite esfoliado	Alto rendimento, baixo custo, excelente processabilidade	Defeitos estruturais, perturbações da estrutura eletrônica do Grafeno	Compósitos, eletrônicos, optico-eletrônicos e potenciais dispositivos tecnologicamente viáveis	EDA et al. (2008)
Esfoliação em fase líquida	Grafite	Dispersão e esfoliação de grafite em solventes orgânicos	Direto, simples, produção em larga escala e de baixo custo, prático	Demorado, impuro	Dispositivos eletrônicos, eletrodos transparentes e compósitos condutores	HERNANDEZ et al. (2008)

Desenrolamento de nanotubos de carbono	Nanotubos de carbono	Solução baseada na ação oxidativa de permanganato de potássio e ácido sulfúrico, ou ataque por plasma	Simples escala larga, produção direta, baixo custo, alta qualidade (ataque por plasma)	Processo complicado e lento	Eletrônicos e compósitos	KOSYNKIN et al. (2009)
Descarga de arco de Grafite	Grafite	Descarga de arco em corrente direta	Processo de síntese de um passo, baixo custo, produção em larga escala	Não uniforme, impuro	Novos materiais compostos	SUBRAHMANYA M et al. (2009)

Fonte: Adaptado de Chen et al. (2010).

3.4.5 Aplicação do Grafeno

Segundo Arshad et al. (2019) a composição do GE atrai também muitas aplicações, devido às suas excelentes propriedades físico-químicas, mecânicas, térmicas, elétricas e ópticas (HAQUE et al., 2018), como na engenharia e ciências médicas, sensores, tubos de calor (SADRI et al., 2017), micro-canais (EL-KADY e KANER, 2013), dissipadores de calor (AMIRI et al., 2016), dispositivos de energia limpa (VAKILI et al., 2016), materiais compostos, medicina, automóveis (SELVAM et al., 2017), cosméticos, refrigeração e ar condicionado, dispositivos de energia solar (WANG et al., 2017), lubrificantes e refrigerantes (WANG et al., 2018a).

Em baterias a utilização do GE como um material integrante dos eletrodos, por exemplo, pode solucionar as limitações tanto das baterias como dos supercapacitores convencionais (RAJI et al., 2017). Baterias à base de GE, além de contornar esse problema, resultam em sistemas de menores dimensões e mais leves, com elevada densidade de energia e potência (QIE et al., 2017).

Em eletrodos para supercapacitores, no qual são destinados ao armazenamento de energia eletroquímica tem sido amplamente relatado, como pode ser visto em Zang et al. (2014) eletrodos de GE podem aumentar de 20% a 30% a capacitância de supercapacitores.

Em transistores de rádio frequência segundo Veligura et al. (2011) transistores fabricados à base de GE podem melhorar o desempenho nas aplicações de radio frequência, devido à elevada mobilidade eletrônica observada no GE.

O Grafeno foi aplicado na medicina na pesquisa de Wu et al. (2011), que encontrou resultados significativos, podendo ser observados tanto em frequências elevadas como em temperaturas criogênicas, ampliando a faixa de operação em relação a dispositivos convencionais.

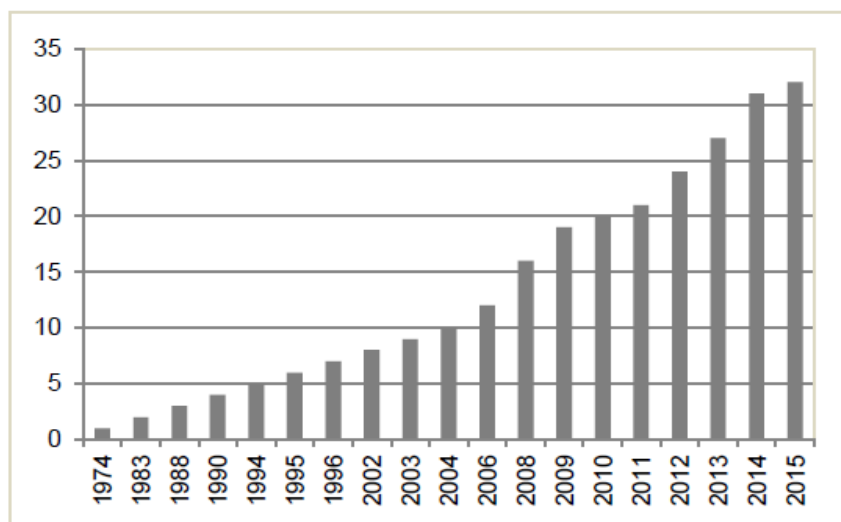
Em Transferência de calor Ranjbarzadeh et al. (2017) aplicou o Grafeno em um trocador de calor. Já Arzani et al. (2015) aplicou nanofluido de Grafeno em um trocador de calor anular, ambos para investigar o comportamento do coeficiente convectivo de transferência de calor.

Em torres de resfriamento Askari et al. (2016) observou desempenho térmico, utilizando nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWNTs) e nanofluidos de Grafeno nanoporosos.

Tendo em vista as diversas vantagens do uso do Grafeno, vários grupos de pesquisas no mundo e no Brasil desenvolvem estudos com este material. Como ocorre no grupo de

estudo de pesquisa de nanofluido do curso Técnico de Química do IFPE/Recife, juntamente com o Grupo de pesquisa de Energia a realizarem análises com o Grafeno em projetos diversos de Energia como na utilização de nanofluidos aplicados em trocadores de calor, estudo desta pesquisa. A Figura 13 apresenta uma evolução do crescente número de linhas de pesquisas no Brasil associada ao Grafeno.

Figura 14 - Evolução de linhas de pesquisas no Brasil associada ao Grafeno.



Fonte: Diretório dos Grupos de Pesquisa – CNPq (Adaptado de Segundo e Vilar, 2016).

3.4.6 Impactos ambientais do Grafeno

A descoberta e a utilização do Grafeno no ramo da engenharia como nas ciências térmicas tem aproximadamente 10 anos, ou seja, muito recente quando se compara com outros métodos já existentes, e entre os obstáculos a serem superados antes de levá-lo ao mercado industrial, está o desenvolvimento de métodos de fabricação em massa, a redução dos custos e seus impactos causados ao meio ambiente. Os pesquisadores estudam materiais que possam ser usados para uso da tecnologia, que seja resistente, rentável e ecologicamente menos agressivo.

O Óxido de Grafeno que é um derivado do seu material apresenta suas nanopartículas com alta mobilidade, e pode quando imersas na água apresentar ser um grande agente poluidor para o meio ambiente e seus resíduos do material poderiam chegar a rios e lagos por meio de vazamentos ou descarte inadequado.

Segundo Lanphere et al. (2014) investigaram a estabilidade do óxido de Grafeno em águas subterrâneas, comparando-a com sua estabilidade em águas superficiais, e obtiveram resultados que demonstram que as nanopartículas em águas subterrâneas tornaram-se menos estáveis e acabaram por se instalar fora. Já em águas superficiais, essas nanopartículas se mantiveram estáveis e foram capazes de viajar mais longe. As nanopartículas são mais móveis em águas presentes em rios e lagos, podendo causar danos ambientais.

Já Ahmed e Rodrigues, (2013) e Duch et al. (2011) informaram que o óxido de Grafeno pode ser ter efeitos tóxicos em organismos vivos, como nos seres humanos, devido ao fato de a borda do Grafeno ser extremamente reativa.

Para que um produto seja comercializado e gere, portanto, valor à organização, é necessário que este seja economicamente viável. No entanto, é importante estudar as implicações ambientais desta nova nanotecnologia, para programar-la de forma sustentável.

Para nosso conhecimento, não há artigos publicados que investiguem os impactos do Grafeno na natureza, por se tratar de um nanomaterial com aplicações recentes. No momento, os pesquisadores ainda estão adequando suas pesquisas, ensaios e simulações para a melhoria no ganho energético, como foi utilizado nesta pesquisa, visando o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção através dos nanofluidos em trocadores de calor.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentadas as metodologias e materiais utilizados para as análises experimentais de testes no preparo dos nanofluidos a base de Grafeno, como na sua utilização nos trocadores de calor tubo duplo, casco e tubo e placas planas. No qual através destes, compara-se a troca térmica de calor presente nos nanofluidos. Neste capítulo também será apresentado o método de preparo dos nanofluidos, todas as propriedades termofísica, que serão de fundamental importância para a realização da simulação computacional do processamento dos dados apresentada no capítulo 5 e da análise paramétrica do comportamento energético no capítulo 6.

4.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos foi utilizado um aparato experimental do tipo bancada de teste que permite a utilização de diferentes tipos de trocadores de calor (tubo duplo, casco e tubo, e placas planas). Esta bancada de teste está localizada no Laboratório de Termofluidos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE, Campus Recife.

4.1.1 Bancada de Teste

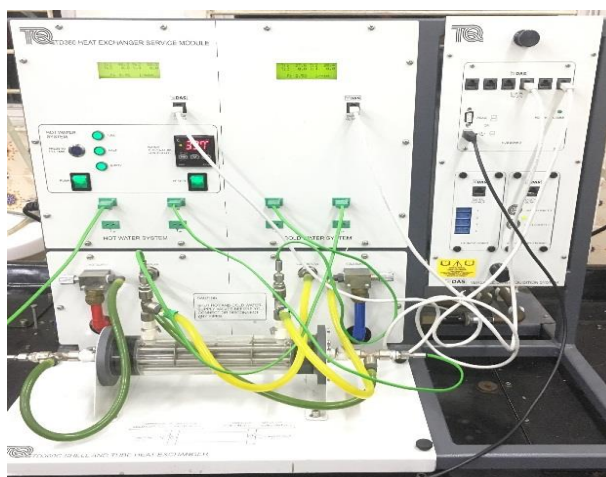
O aparato experimental TD 360 da TQ TecQuipment ano 2009 e suas dimensões específicas são apresentadas na Tabela 2, e consiste em uma estrutura de montagem que permite a verificação do comportamento dos trocadores de calor. O sistema é constituído por dois circuitos de água, um para frio e outro para água aquecida. Ele dispõe de sensores medidores de temperatura Termopar tipo K, medidor de vazão tipo turbina, um controlador PID e uma bomba centrífuga, permitindo o funcionamento, adequação e troca de diferentes tipos de trocadores de calor (Figura 15).

Tabela 2 - Dimensões do aparato experimental.

Itens	Descrição
Comprimento (mm)	1350
Profundidade (mm)	500
Altura (mm)	500
Peso Bruto (Kg)	40
Voltagem (V)	220
Frequência (Hz)	50
Amperagem (A)	13
Temperatura Mínima fluido frio (°C)	5
Temperatura Máxima fluido frio (°C)	20

Fonte: TQ TecQuipment, (2009).

Figura 15 - Aparato experimental de trocadores de calor.



Fonte: O autor, 2019.

4.1.1.1 Tanque de armazenamento

O sistema de fluido quente da bancada de testes inclui um tanque com capacidade de armazenamento de 7L (Figura 16), com uma resistência elétrica para aquecimento elétrico controlado por PID – *Proportional Integral Derivative Controller* (Figura 17). O tanque de armazenamento também possui sensores de bóia de nível de fluido conectados a indicadores que permitem verificar o nível do reservatório através de um visor.

Figura 16 - Tanque de armazenamento



Fonte: O autor, 2019.

Figura 17- Controlador PID.



Fonte: O autor, 2019.

O circuito do fluido quente fornece vazões e temperaturas estáveis, funcionando sempre dentro de um circuito fechado. Uma bomba centrífuga é usada para recircular o fluido do circuito quente (Figura 18). Este fluido escoar através de uma válvula de controle de vazão com ajuste manual, através do trocador de calor e de volta ao tanque.

O circuito de água fria da bancada de teste tem sua conexão ligada para um suprimento externo de água da rede de abastecimento do município, ou seja, ligada diretamente na torneira e seu descarte se faz através da tubulação da rede de esgoto, não sendo um circuito fechado.

Figura 18 - Bomba recirculação de fluído.



Fonte: O autor, 2019.

4.1.1.2 Válvula de Controle de Vazão

O circuito do fluído frio quanto o de quente apresentam válvulas agulha de precisão, em aço inoxidável em alumínio, utilizada para controle de vazão com medidor do tipo turbina ajustadas manualmente (Figura 19) com precisão de $\pm 1\%$, apresentado num mostrador de circuito de vazão e temperatura de fluído quente e frio presente na bancada.

Figura 19 - Válvula de agulha de precisão de vazão



Fonte: O autor, 2019.

4.1.1.3 Sensores de Temperatura

A bancada de testes de trocadores de calor possui sensores de temperatura (Termopares do Tipo k - Figura 20) para medição do circuito quente e frio. Estes termopares são formados por fios de chromel, como termoelemento positivo, e Alumel como termoelemento negativo e são adequados para medição contínua desde -200°C até 1260°C , com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ de referência de temperatura externa e interna e erro de instrumento de medição de $0,05^{\circ}\text{C}$.

Figura 20 - Termopar tipo K.



Fonte: O autor, 2019.

Os termopares medem as temperaturas de fluxos de entrada e saída do circuito quente e frio. Alguns trocadores de calor também possuem termopares embutidos para medições extras de temperatura, como por exemplo, o trocador de calor duplo tubo que apresenta termopar para medir a temperatura média dos circuitos.

A calibração dos termopares (Figura 21) foi realizada através do forno de calibração da EcilBat, e o procedimento e as curvas de calibração dos circuitos foram descritos no Apêndice A.

Figura 21 - Calibração dos Termopares



Fonte: O autor, 2019.

4.2 TROCADORES DE CALOR

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados três (3) tipos de trocadores de calor:

- Tubo Duplo

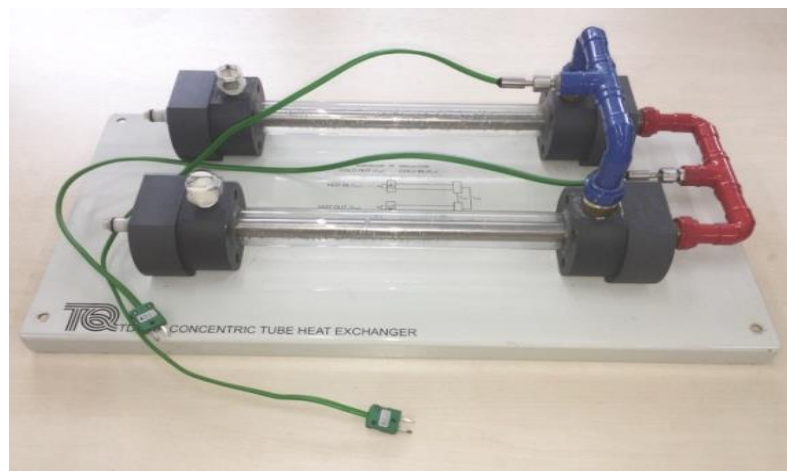
- Placas planas
- Casco e tubo

Cada trocador de calor se encaixa no aparato experimental, sendo acoplado aos seus circuitos de fluido e circuito de medição de temperatura. Os trocadores de calor tubo duplo, placas planas e casco e tubo possibilitam gerar ensaios com os circuitos de fluídos em fluxo paralelo e contra fluxo, e apresentam a mesma área de troca de $0,02\text{m}^2$. Todos os ensaios deste estudo foram realizados com circuitos de fluídos em contra fluxo.

4.2.1 Trocador de calor de tubo duplo

O trocador de calor tubo duplo consiste em um trocador simples tubular, constituído por dois tubos, um dentro do outro. O tubo interno conduz o fluído do circuito quente à bancada de testes e o outro tubo conduz o fluído do circuito frio (Figura 22).

Figura 22 - Trocador de Calor Tubo duplo.

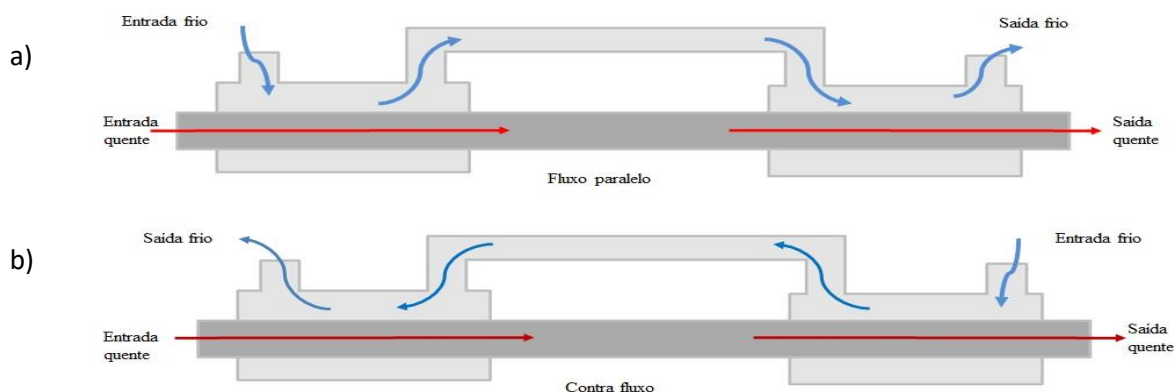


Fonte: O autor, 2019.

O calor se transfere entre os dois tubos. Este trocador possui termopares nas entradas e saídas dos fluídos quente e frio, como também, termopares para verificação de temperaturas média dos circuitos. A Figura 23 representa o esquema de circulação do fluído quente e frio dentro do trocador para seu fluxo paralelo e contra fluxo. A Tabela 3 fornece os parâmetros técnicos e dimensões específicas do trocador de calor de tubo duplo.

Figura 23 - Circulação de fluido quente e frio no Trocador Tubo Duplo:

a)Paralelo e b)Contra fluxo.



Fonte: O autor, 2019.

Tabela 3 - Parâmetros técnicos do trocador de calor tubo duplo.

Itens	Descrição
Largura (mm)	500
Profundidade (mm)	260
Altura (mm)	160
Peso (Kg)	3,5
Tubo externo (casca):	Material Acrílico Transparente
Diâmetro externo (mm)	30
Diâmetro interno (mm)	20
Tubo interno:	Material Aço inoxidável
Diâmetro externo (mm)	1
Diâmetro interno (mm)	10
Área média de transferência de calor (m ²)	0,02

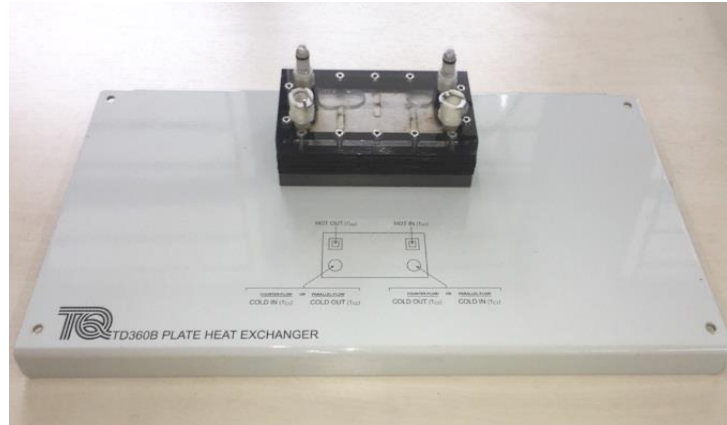
Fonte: TQ TecQuipment, (2009).

4.2.2 Trocador de calor de Placas Planas

O trocador de calor de placas planas consiste em camadas de placas de metal separadas por juntas ou espaçadores (Figura 24). As placas e juntas possuem furos, então os

circuitos de fluído quente e de fluído frio passam alternadamente através das placas. Os circuitos são completamente separados, porém o calor é transferido através deles por intermédio das placas planas de metal.

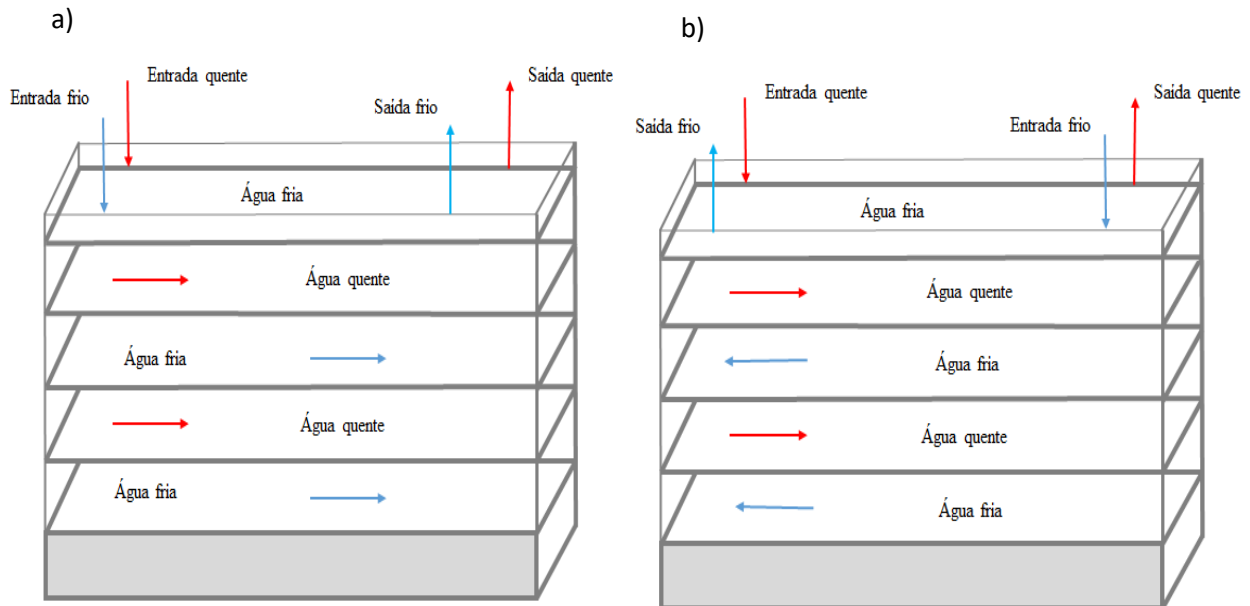
Figura 24 - Trocador de calor Placas planas.



Fonte: O autor, 2019.

A Figura 25 representa o esquema de como ocorre o fluxo e troca de calor dentro do trocador de placas planas para fluxo paralelo e contra fluxo. O tamanho e a quantidade das placas determinam o desempenho deste trocador de calor, portanto, maior quantidade de placas significa maior área de transferência de calor, como também, pode possibilitar uma melhor troca de calor, devido a uma maior turbulência em função dos canais formados entre as placas. A Tabela 4 fornece os parâmetros técnicos e dimensões que caracterizam o trocador de calor de placas planas.

Figura - 25 Circulação de fluido quente e frio no trocador de Placas:
a)Paralelo e b)Contra Fluxo.



Fonte: O autor, 2019.

Tabela 4 - Parâmetros técnicos do trocador de calor de placas planas.

Itens	Descrição
Largura (mm)	500
Profundidade (mm)	260
Altura (mm)	100
Peso (Kg)	2,4
Material	4 placas de Aço Inoxidável
Comprimento das placas (m ²)	Cada uma com 0,005
Área média de transferência de calor (m ²)	0,02

Fonte: TQ TecQuipment, (2009).

4.2.3 Trocador de Calor de Casco e Tubo.

O trocador de calor de Casca e Tubo consiste em um grande tubo (o casco) que aloja feixe de tubos (Figura 26). O fluido quente passa pelo feixe tubos e o circuito frio passa pelo casco, por fora destes tubos, o calor se transfere entre eles. O feixe de tubos possui chicanas para aumentar a turbulência (mistura) dentro do casco. A Figura 27 representa o esquema de

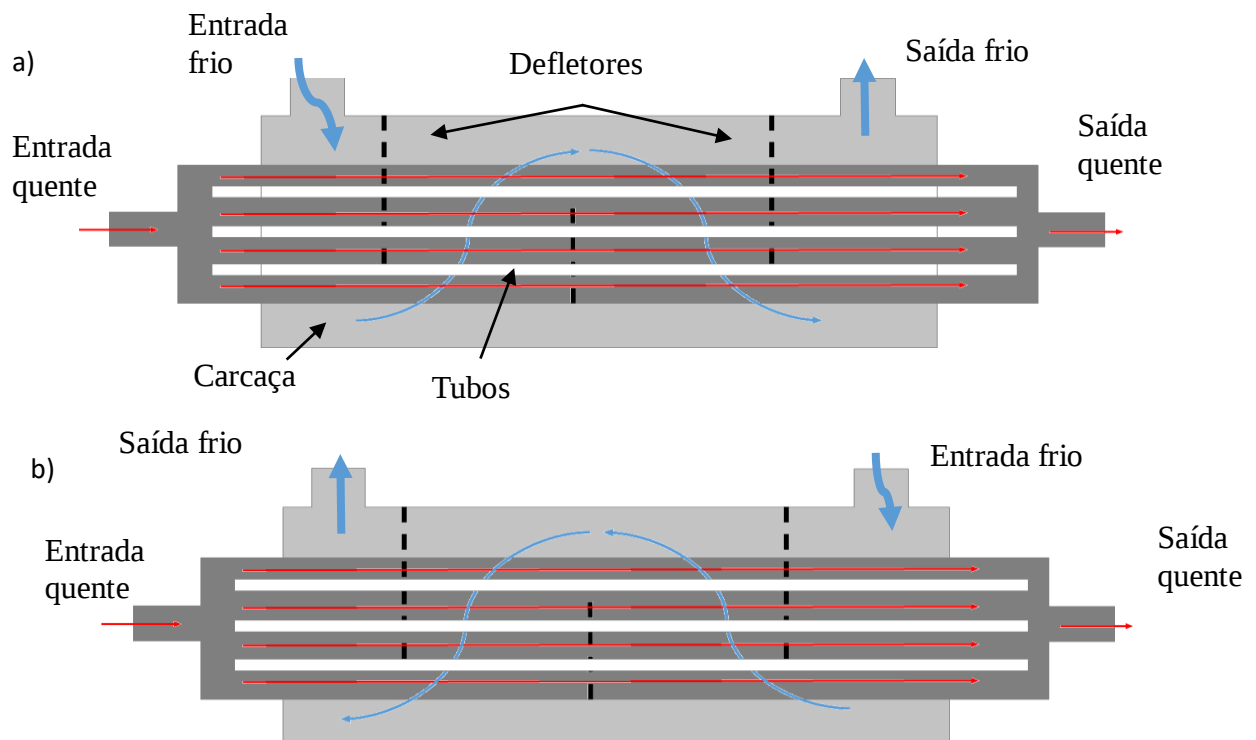
circulação do fluido quente e frio dentro do trocador casco e tubo para seu fluxo paralelo e contra fluxo. A Tabela 5 fornece os parâmetros técnicos e dimensões específicas do trocador de casco e tubo.

Figura 26 Trocador de calor por Casca e Tubo.



Fonte: Autor.

Figura 27 - Circulação de fluido quente e frio no trocador de Casco e Tubo: a)Paralelo e b)Contra Fluxo.



Fonte: O autor, 2019.

Tabela 5 - Parâmetros técnicos do trocador de calor de Casco e Tubo.

Itens	Descrição
Largura (mm)	500
Profundidade (mm)	260
Altura (mm)	150
Peso (Kg)	2,7
Tubo externo (casca):	Material
	Acrílico
	Transparente
Diâmetro externo (mm)	6
Diâmetro interno (mm)	4
Tubo interno:	Material
	Aço inoxidável
Defletores	3
Tubos	6
Diâmetro externo (mm)	1
Diâmetro interno (mm)	10
Área média de transferência de calor (m ²)	0,02

Fonte: TQ TecQuipment, (2009).

4.3 NANOFLUÍDO

O Nanofluido a base de Grafeno (Figura 28) foi desenvolvido no Laboratório de Eletroquímica e Materiais Nanoestruturados – LEMAN do Curso Técnico de Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE, campus Recife e sua metodologia de preparação é apresentada abaixo.

Figura 28 - Nanofluido a base de Grafeno.



Fonte: O autor, 2019.

4.3.1 Preparação dos nanofluidos

O nanofluido a base de Grafeno foi desenvolvida no Laboratório de Eletroquímica e Materiais Nanoestruturados – LEMAN do Curso de técnico de Química do Instituto Federal Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE, Campus Recife e sua metodologia de preparo foi realizada de acordo com a descrita no Capítulo 3 no item (3.4.4), no qual, se fez através no método de dois passos.

Foram utilizados os seguintes reagentes no preparo de solução para pré-esfoliação e esfoliação do grafite:

- Hidróxido de sódio (NaOH; 1M);
- Ácido sulfúrico (H₂SO₄; 0,5M);
- Sulfacquitante Lauril Sulfato de Sódio

Inicialmente na pré-esfoliação a barra de Grafite (Figura 29) é colocada em um balão de três vias com 100 ml da solução de hidróxido de sódio (NaOH; 1M), ligada a uma Fonte ICEL PS-1500 com a potência a 10.0V durante 1 hora (Figura 30), com uma tensão constante, onde o Grafite é colocado no eletrodo positivo e no negativo um fio de platina (Pt).

Posteriormente, os eletrodos foram transferidos para uma solução de ácido sulfúrico (H₂SO₄; 0,5M); com uma potência de 7,5V durante 24 horas, com o objetivo de esfoliar ao máximo o grafite. Ao final da esfoliação o precipitado é filtrado com papel filtro (Figura 31) e lavado com água destilada, etanol e propanol para uma maior remoção de impurezas e regulação de Ph.

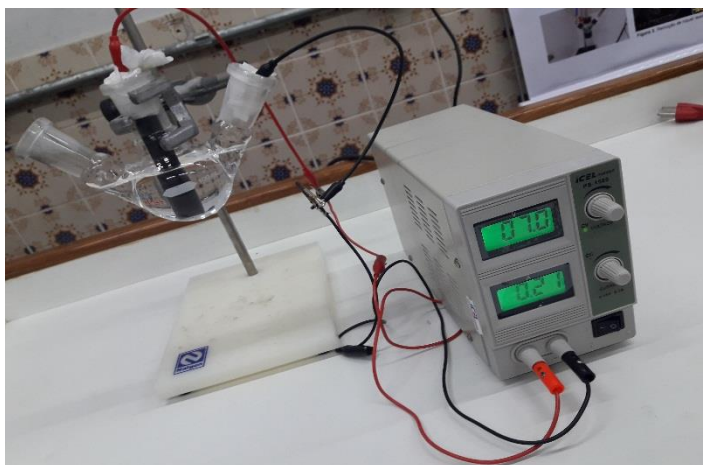
O grafite esfoliado em forma de pó (Figura 32) foi colocado em uma estufa para secar a 60°C durante 24 horas. Logo em seguida, depois de passar pela secagem o Grafeno é moído e dissolvido em 500ml de água destilada com Lauril Éter Sulfato de sódio e colocado em um homogeneizador ultrassônico da Bandelin por 3 horas, para homogeneizar a solução (Figura 33). Ao final da homogeneização o nanofluido de Grafeno é dissolvido em 7L de água destilada (Figura 34), para que possa ser utilizado nos testes com os trocadores de calor.

Figura 29 - Barra de Grafite.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 30 - Pré-esfoliação do grafite.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 31- Filtragem do Grafite esfoliado.



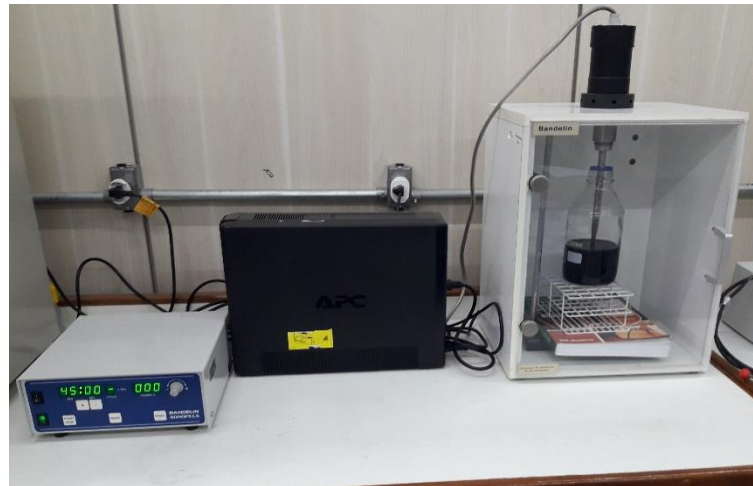
Fonte: O autor, 2019.

Figura 32 - Grafite em pó.



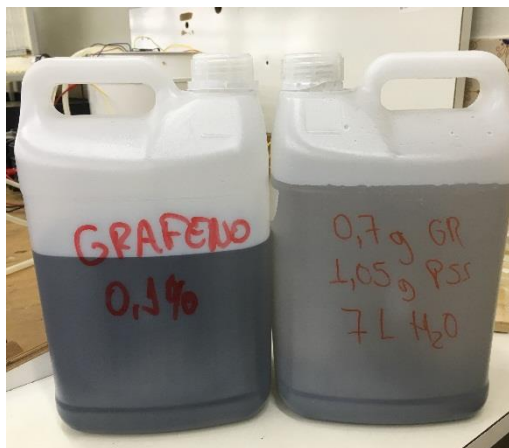
Fonte: O autor, 2019.

Figura 33 - Homogeneização do Nanofluido.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 34 - Nanofluido de Grafeno.



Fonte: O autor, 2019.

4.3.2 Propriedades Termofísicas dos nanofluidos

No Apêndice C são apresentadas todas as metodologias e análises realizadas para as propriedades termofísicas dos nanofluidos de Grafeno. Verificando as condutividades térmicas (k) através do KD2 PRO, as densidades (ρ) pela balança de precisão e um picnômetro, as viscosidades (μ) através de um viscosímetro e os calores específicos (C_p) dos nanofluidos calculados através da Equação 1. A Tabela 6 apresenta todas as propriedades dos nanofluidos geradas a partir deste trabalho.

$$C_{nf} = \frac{(1-\phi_V)\rho_{fb}C_{p,fb} + \phi_V\rho_{np}C_{p,np}}{(1-\phi_V)\rho_{fb} + \phi_V\rho_{np}} \quad (1)$$

Tabela 6 - Propriedades Termofísicas dos Nanofluidos de Grafeno.

Wt %	k (w/mK)	ρ (Kg/m ³)	μ (Kg/ms)	C_p (J/kg.k)	T (°C)
Água	0,62	937,5	0,000891	4120,0	25
0,0125	0,57	947,1	0,000919	3842,0	
0,025	0,60	964,0	0,000948	3846,1	
0,050	0,63	971,5	0,001008	3854,5	

Fonte: O autor, 2020.

4.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para realização dos experimentos foram feitos testes nos trocadores de calor, o nanofluido foi utilizado no circuito de fluido quente e para o circuito de fluido frio utilizou-se a água natural da concessionária de abastecimento do município de Recife/PE. No experimento 1 utilizou-se água para todos os circuitos (quente e frio), para validar os teste, nos demais variou-se a concentração das nanopartículas do Grafeno como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Testes com Grafeno.

Experimentos	Circuitos		Concentração peso (wt%)
	Frio	Quente	
1	Água	Água	-
2	Água	Grafeno	0,0125
3	Água	Grafeno	0,025
4	Água	Grafeno	0,050

Fonte: O autor, 2020.

Nos trocadores de calor analisados foram realizados testes variando as vazões de circuito quente e de temperaturas, com a vazão de circuito frio constante como demonstra a Tabela 8. Para cada mudança de vazões e de temperaturas realizada, foi necessário esperar 10 minutos para estabilização das temperaturas, após esse período, foram obtidas as leituras em intervalos de 1 segundo cada. Para cada temperatura foram realizadas 50 leituras, 150 para cada trocador e 450 para cada nanofluido. Estes dados foram salvos e armazenados em arquivos de planilhas Excel para análise e foram tratados estatisticamente.

Tabela 8 - Variações de vazões e temperaturas para trocadores de calor.

	Temperatura (°C)			Vazão (L/min)	
				Quente	Frio
Experimentos	40	50	60	0,5	2,5
	40	50	60	1,0	2,5
	40	50	60	1,5	2,5
	40	50	60	2,0	2,5
	40	50	60	2,5	2,5

Fonte: O autor, 2020.

Os resultados das médias das temperaturas de entrada e saída do circuito quente e frio foram corrigidos pelas equações características de calibração apresentadas no Apêndice A. Com os valores atualizados realizou-se a análise estatística das incertezas e erros dos dados coletados, que foram apresentados no Apêndice D análise de erros. A Tabela 9 apresenta o percentual médio dos erros estimados de medições referentes aos fluidos utilizados nas três

temperaturas (40°, 50°, 60°C) nesta pesquisa na bancada de testes dos trocadores de calor, erros estes, que no geral ficaram entre $\pm 1\%$.

Tabela 9 - Percentual médio dos erros de medições.

Experimentos	Fluidos	Erros
1	Água	$\pm 1,5\%$
2	0,0125g	$\pm 1\%$
3	0,025g	$\pm 1\%$
4	0,050g	$\pm 1\%$

Fonte: O autor, 2020.

4.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para as realizações dos experimentos e das leituras e análise de dados foi utilizado o *software* Sistema Versátil de Aquisição de dados – VDAS (Figura 35), no qual, pode-se anexar em planilha do Excel todas as leituras das trocas térmicas existentes entre os fluidos. Com os dados das leituras foi possível efetuar e calcular através das fórmulas apresentadas no capítulo 5 os índice de desempenho (η), a diferença de temperatura média logarítmica (LTDM) e o Coeficiente Global de Transferência de Calor (U), dentre outros parâmetros, para obter os resultados finais. O fluxograma na Figura 36 demonstra como foram realizados os procedimentos de testes na bancada de serviços com os trocadores de calor.

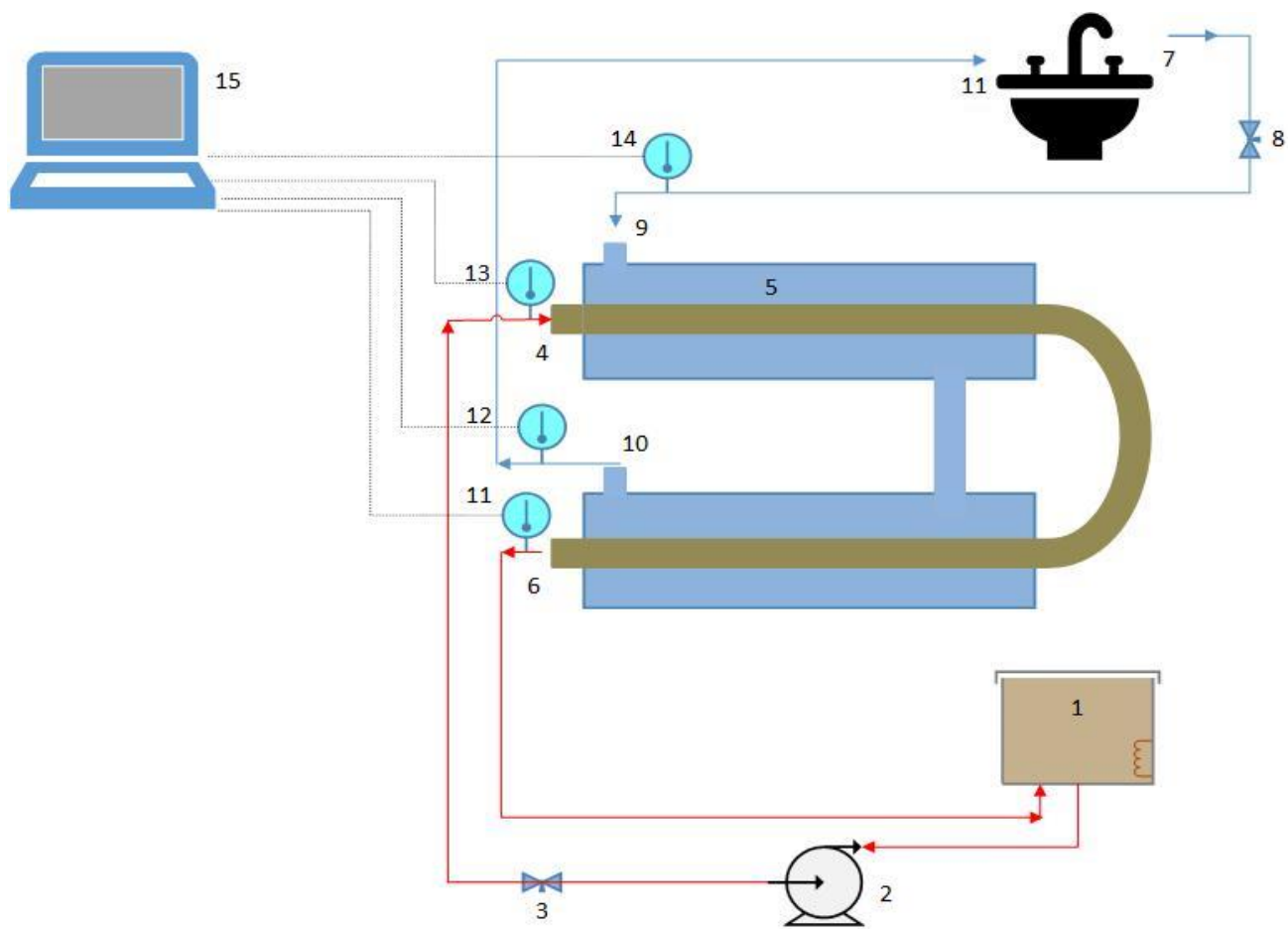
Figura 35 - Sistema Versátil de Aquisição de Dados.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 36 - Fluxograma de procedimento de experimentos.

Legenda	
1	Tanque de armazenamento Nanofluido
2	Bomba
3	Válvula de controle vazão
4	Entrada do nanofluido quente
5	Trocador de calor
6	Saída do nanofluido quente
7	Abastecimento de água
8	Válvula de controle vazão
9	Entrada água fria
10	Saída da água fria
11	Termopar Th2
12	Termopar Tc2
13	Termopar Th1
14	Termopar Tc1
	Sistema de aquisição de dados
15	



Fonte: O autor, 2019.

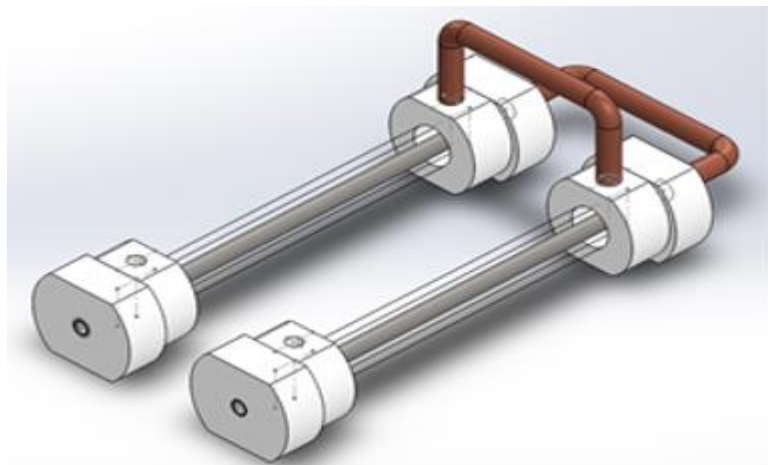
5 MODELAGEM COMPUTACIONAL VIA CFD EM TROCADOR DE CALOR COM GRAFENO

Neste capítulo são apresentadas as metodologias para a simulação computacional realizadas no desenvolvimento do trocador de calor duplo tubo, utilizado no aparato experimental demonstrado no Capítulo 4. Para que seja realizada uma análise energética do trocador de calor, avaliando a transferência de calor utilizando nanofluidos de Grafeno, comparando-o os resultados experimentais com a simulação. A Modelagem computacional foi baseada no *design* do trocador (Figura 22), parâmetros específicos (Tabela 3) e suas configurações de fluxos (Figura 23) e nas variações de vazões e temperaturas (Tabela 8) de acordo com os casos reais apresentados posteriormente.

5. 1 MODELAGEM DO TROCADOR DE CALOR TUBO DUPLO

A modelagem computacional do trocador de calor tubo duplo foi realizada por meio do método CFD (*Computational Fluid Dynamics*), utilizando o *SolidWorks* para a modelagem física, separando os domínios sólidos e de fluidos. A simulação foi realizada no Laboratório de Mecânica Computacional no IFPE/Recife, utilizando uma máquina com processador Intel® Core™ i7-6500U 3.1GHz 6ª geração, 8 GB de RAM DDR4, placa de vídeo dedicada de 2GB. Na Figura 37 é mostrado o desenho computacional do trocador de calor tubo duplo.

Figura 37 - Modelagem CAD Trocador de Calor Tubo Duplo.



Fonte: O autor, 2020.

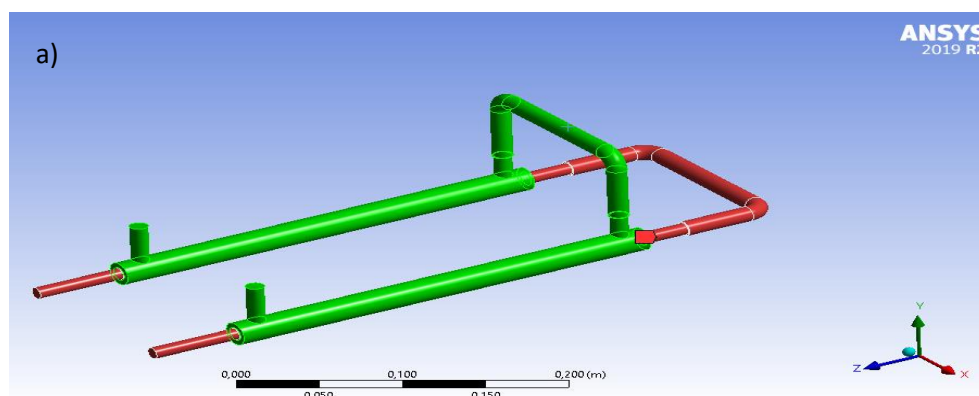
A dinâmica dos fluidos computacionais é a área de pesquisa que trata das simulações numéricas de escoamento de fluidos, transferência de calor e outros fenômenos relacionados, como combustão, reações químicas e turbulência. Os fluídos são governados por equações diferenciais parciais que representam as leis de conservação da massa, quantidade de movimento e energia (LIMA et al., 2019).

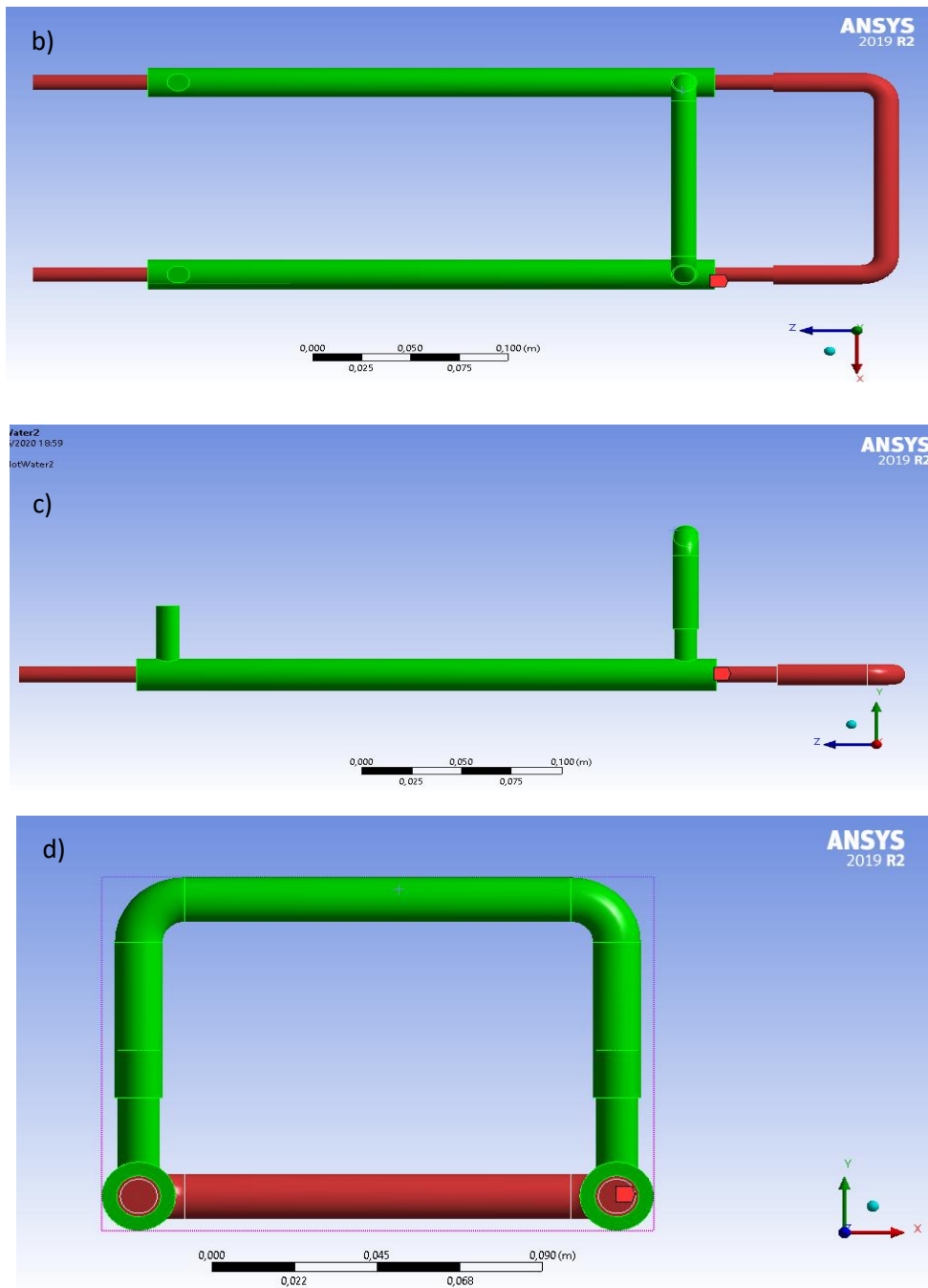
A fim de modelar o fluxo turbulento na investigação e garantir a precisão dos resultados o modelo k- ϵ foi implantado no procedimento numérico, isso inclui duas equações de transporte extras para representar as propriedades turbulentas do escoamento para fluxos internos e limitados por parede, o modelo dá bons resultados apenas nos casos em que os gradientes de pressão médios são pequenos (MOHD et al., 2018).

Foram realizadas simulações usando a mesma geometria e dimensões do trocador tubo duplo dos testes experimentais e nas mesmas condições de operação que as utilizadas no estudo experimental.

Além de analisar as alterações geométricas descritas anteriormente, a ferramenta CFD adotada neste estudo, permite através da coleta das temperaturas e vazões da água e do nanofluido, determinar o desempenho energético do trocador de calor em função do Nanofluido GNP/Água. A Figura 38 apresenta o modelo do trocador de calor via CFD, com as diferenças de circuito de fluxo quente nanofluido (vermelho) e frio água (verde) e suas vistas.

Figura 38 - Trocador de calor tubo duplo em CFD e suas vistas: a)Modelo 3d, b)Vista superior, c)Vista lateral e d)Vista Frontal.

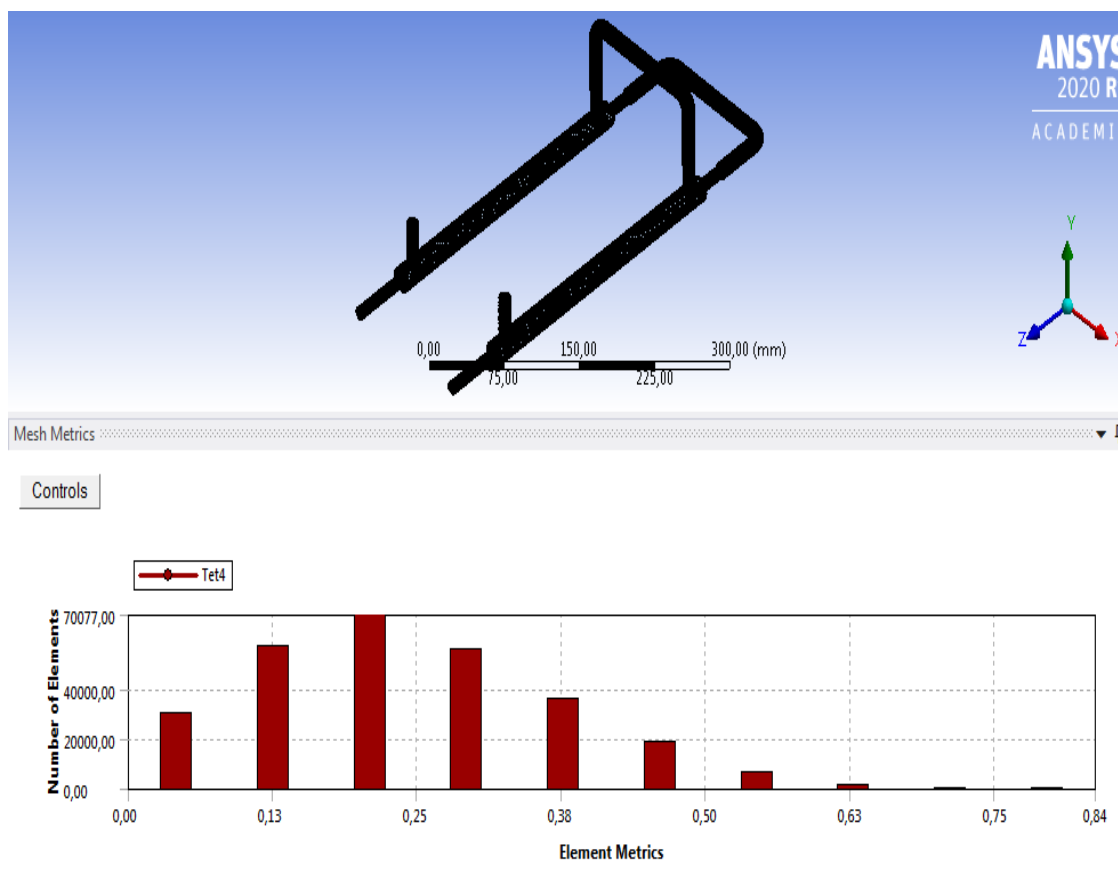




Fonte: O autor, 2020.

Na geração de malha utilizou-se o ANSYS *Meshing* onde se construiu uma malha tetraédrica por meio da métrica de qualidade *skewness*, com 70.077 elementos (Figura 39) e foi verificado através da análise de malha, que o ganho em exatidão com o aumento do número de nós era abaixo de 1%, critério usado baseado na exatidão dos termopares tipo K utilizados no experimento, sendo este de 2% do valor lido.

Figura 39 - Número de elementos.



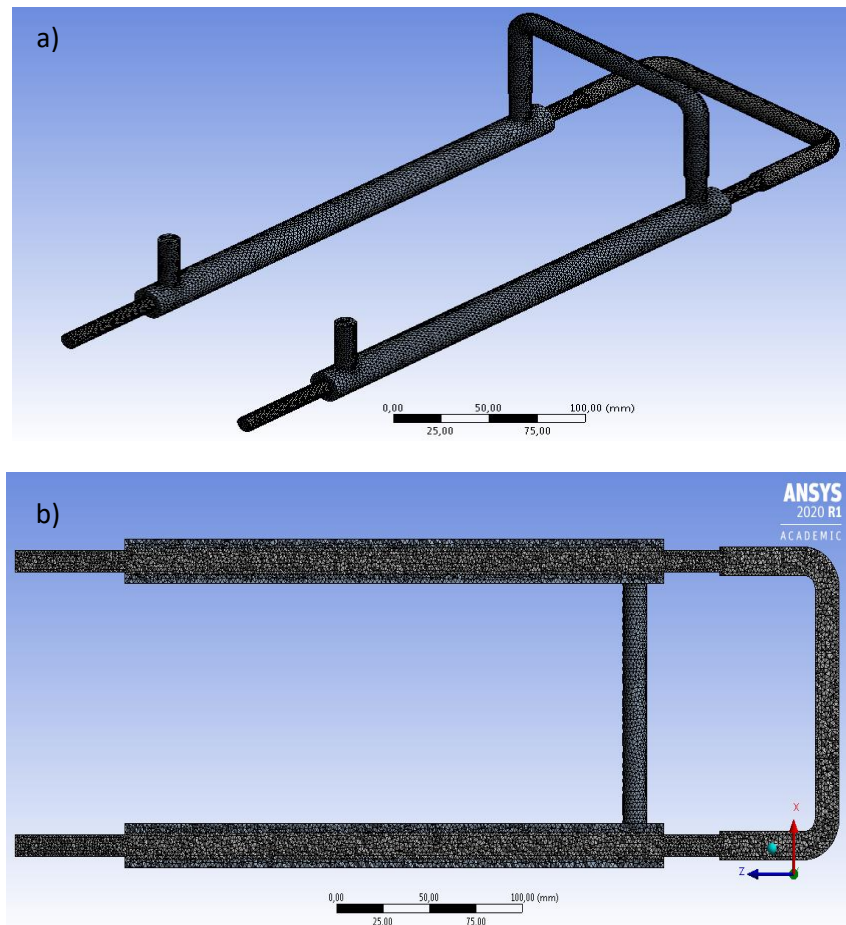
Fonte: O autor, 2020.

A Figura 40 e 41 apresenta a forma da malha e suas vistas do modelo. Após a geração de malha procedeu-se a análise da física e das condições de contorno do modelo CFD (Figura 42) as quais foram variadas de acordo com o experimento, determinando os pontos de monitoramentos correspondentes às posições dos termopares do experimento, igual ao modelo real, para fins de validação do modelo CFD.

O solver utilizado foi o ANSYS CFX e inicialmente simulou-se o trocador de calor apenas com água nos dois circuitos de fluxos, para validar a precisão do modelo e seus resultados numéricos foram comparados com os experimentais.

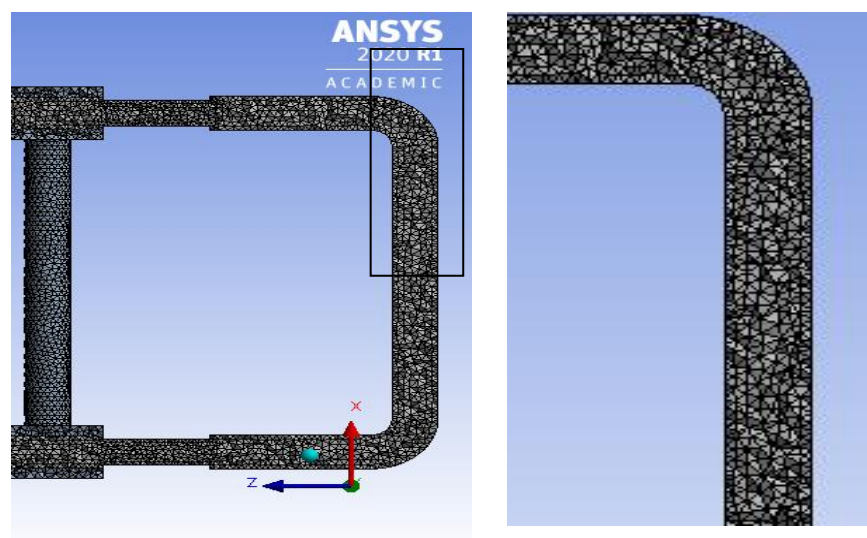
O CFX também é capaz realizar estudos de escoamentos externos e internos, onde se pode avaliar o perfil do escoamento e a influência da rugosidade das paredes das tubulações. Ele também pode estudar o escoamento de multicomponentes e multifásicos, estes tipos de escoamento são essenciais para o cálculo dos fenômenos de transferência de calor e massa (LIMA, 2018).

Figura 40 - Malha computacional: a)Modelo 3d e b)Vista superior.



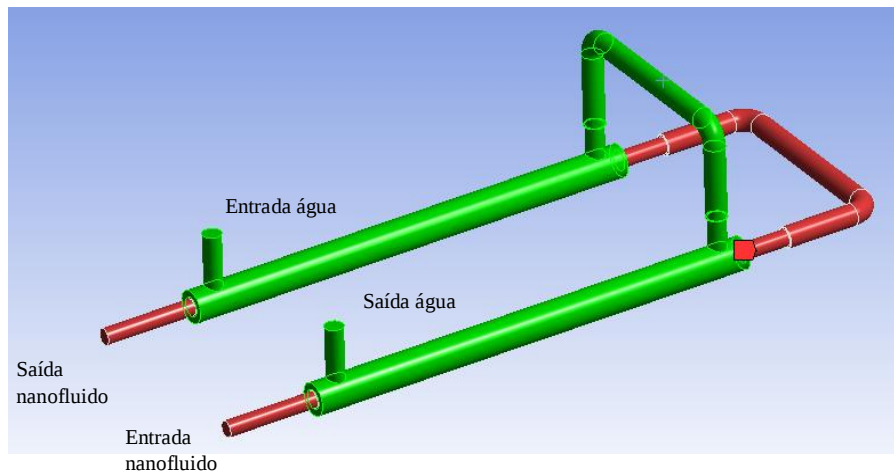
Fonte: O autor, 2020.

Figura 42 - Malha computacional em corte.



Fonte: O autor, 2020.

Figura 43- Condições de contorno.



Fonte: O autor, 2020.

O CFX é baseado na técnica de volumes finitos, o qual combina um *solver* avançado com poderosos recursos de pré e pós-processamento, além de interfaces com outras linguagens de programação sob a forma de interações com sub-rotinas ou pacotes externos. O *solver* é responsável por resolver as equações de Navier-Stokes e demais equações inseridas para estabelecer os fenômenos de transferência de calor e massa através do método dos volumes finitos (SILVA, 2019)

Este software permite, explicar resultados internos ao equipamento, como perfil de temperatura, velocidade, entre outras em regiões de difícil acesso no equipamento real. Além de ser capaz de analisar o comportamento do escoamento e o impacto da inserção de alterações geométricas, como ranhuras, aletas, chicanas e superfícies rugosas (LIMA et al., 2019).

5.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES

Para analisar os nanofluidos nos trocadores de calor foram utilizadas equações de transporte. Conservação da massa, conservação de momento (*navier-stokes*) e conservação de energia resolvida com propriedades efetivas, calculando o modelo, resolve-se o campo de velocidade e calculou a média e com ela calculou-se as vazões. Os fluidos foram considerados fluidos newtonianos com escoamento incompressível permanente, com fluxo contracorrente monofásico turbulento em tubos lisos, ou seja, sem rugosidade no escoamento. As equações governamentais relevantes em suas formas gerais são as seguintes (Bahiraei et al., 2019a):

Conservação de massa:

$$\delta m_x + \delta m_y + \delta m_z - \left[\delta m_x + \frac{\partial \delta m_x}{\partial x} dx \right] - \left[\delta m_y + \frac{\partial \delta m_y}{\partial y} dy \right] - \left[\delta m_z + \frac{\partial \delta m_z}{\partial z} dz \right] = \frac{\partial \delta m}{\partial t} \quad (2)$$

Onde:

δm_x : é o fluxo de massa entrando na direção x

δm_y : é o fluxo de massa entrando na direção y

δm_z : é o fluxo de massa entrando na direção z

δm : massa acumulada

Conservação do momento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

Onde:

$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v})$: é o termo de acúmulo da quantidade de movimento

$\nabla (\rho \vec{v} \vec{v})$: é o termo convectivo da quantidade de movimento

p: é pressão estática

pg: é a força gravitacional

F: são as forças externas, resultante da interação entre as fases na interface, atuando sobre o corpo

Conservação de Energia:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla (k \nabla T - \sum_j h_j J_j) + S_h \quad (4)$$

5.2.1 Processamento de dados

Através do balanço de massa e energia no processamento de dados para análise das características de transferência de calor por convecção dos nanofluidos a base de Grafeno em trocadores de calor, é realizada a avaliação do coeficiente global de transferência de calor,

número de Nusselt, número de Prandtl e sua eficiência, para que sua utilização possa ser realizada em diversos setores industriais.

A partir dos dados de temperatura médias, com base nas medições das temperaturas de entrada e saída apresentadas na Tabela 18, 19 e 20 no Apêndice D, juntamente com as vazões mássicas dos fluidos quentes e frios são usados os seguintes conjuntos de equações:

As vazões mássicas, área de transferência de calor, velocidade média, taxa de capacidade térmica, os fluxos de calor, as taxas de transferência de calor e a taxa média de transferência de calor podem ser calculados através das equações 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 respectivamente.

$$\dot{m} = \rho VA \quad (5)$$

$$A = \pi D_i L \quad (6)$$

$$V = \frac{4\dot{m}}{\rho \pi D_h^2} \quad (7)$$

$$C_w = (\dot{m}C_p)_w \quad (8a)$$

$$C_{nf} = (\dot{m}C_p)_{nf} \quad (8b)$$

$$q'' = \frac{Q_{ave}}{A} \quad (9)$$

$$q_w = \dot{m}_w C_{p_w} (T_{c2} - T_{c1})_w \quad (10a)$$

$$q_{nf} = \dot{m}_{nf} C_{p_{nf}} (T_{h1} - T_{h2})_{nf} \quad (10b)$$

$$Q_{ave} = \frac{q_{nf} + q_w}{2} \quad (11)$$

A taxa de capacidade térmica de um escoamento é definida como a taxa de transferência de calor necessária para alterar a temperatura do fluido de 1°C ao escoar através de um trocador de calor (ÇENGEL et al., 2012). O coeficiente de transferência de calor por convecção (Eq. 12) onde ocorre mudança de fase de um fluido pode ser expresso e calculado pela Lei de Resfriamento de Newton (ABBASIAN e AMANI, 2012), este coeficiente (h) não é uma propriedade do fluido e sim um parâmetro determinado experimentalmente, cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção, tais como a geometria da superfície, a natureza do movimento do fluido, as propriedades do fluido e a velocidade da massa de fluido (ÇENGEL et al., 2012).

$$h = \frac{q''}{T_{wall} - T_{nf}} \quad (12)$$

O método utilizado para escolher um trocador de calor que permite alcançar uma mudança de temperatura específica com vazões mássicas conhecidas, é o método da Diferença de Temperaturas Média logarítmica – LMTD (Eq. 13), que é o método mais utilizado e mais adequado para a análise. Com este método pode-se selecionar um trocador de calor que satisfaça as exigências necessárias na sua utilização para a indústria ou até para as pesquisas em laboratórios.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (13)$$

Onde o ΔT_1 e ΔT_2 são as diferenças de temperaturas entre o fluido quente e frio em ambas as extremidades (entrada e saída) no trocador de calor.

$$\Delta T_1 = T_{h2} - T_{c1} \quad (14a)$$

$$\Delta T_2 = T_{h1} - T_{c2} \quad (14b)$$

Através das equações 6, 9 e 13 pode ser calculado o Coeficiente Global de Transferência de calor – U pela Equação 15.

$$U = \frac{Q_{ave}}{\Delta T_{LMTD} A} \quad (15)$$

O número de Reynolds e o número Prandtl podem ser calculados através das equações 16 e 17 respectivamente. Para escoamento Turbulento o número de Reynolds deve ser $Re \geq 2300$. As equações 16a e 16b representam o número de Reynolds calculado no tubo e no anular, respectivamente.

$$Re_{nf} = \frac{\rho V D_i}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi D_i \mu} \quad (16a)$$

$$Re_w = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi (D_e + D_i) \mu} \quad (16b)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (17)$$

As correlações para os coeficientes de atritos em escoamentos turbulentos são baseadas em estudos experimentais, devido à dificuldade de se lidar teoricamente com o escoamento turbulento (ÇENGEL et al., 2012). Para tubos lisos com escoamento turbulento completamente desenvolvido, o fator de atrito pode ser calculado através da equação explícita de Petukhov (1970) (Eq. 18) para fluido base (água).

$$f = (0,790 \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad 2300 < Re < 5 \times 10^6 \quad (18)$$

As correlações de Balsius (1908), Von Kármán (Andrade e Carvalho, 2001), Prandtl (ÇENGEL, 2009) e Colebrook (1939) também são usadas para verificar e comparar os resultados dos valores dos coeficientes de atrito, através das equações 19, 20, 21 e 22 respectivamente. Para determinar o fator de atrito dos nanofluidos foi utilizada a Equação 23, de acordo com a queda de pressão na seção de testes.

$$f = 0,3164 Re^{-0,25} \quad 3000 < Re < 10^5 \quad (19)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}}\right) \quad (20)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log(\sqrt{f}) - 0,8 \quad (21)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\frac{E}{D}}{3,7}\right) \quad (22)$$

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{L \rho V^2}{D \cdot 2}} \quad (23)$$

Os tubos de aço inoxidável foram utilizados nesta obra e podem ser considerados tubos lisos, com rugosidade desprezível $\varepsilon = 0$, porém de acordo com Çengel (2009) eles apresentam rugosidade de $\varepsilon = 0,002$ mm.

No estudo da transferência de calor por convecção é prática adimensionalizar as equações e combinar as variáveis, a fim de se reduzir o número total de variáveis. Utilizando-se dessa prática pode-se adimensionalizar também o coeficiente de transferência de calor (h) usando o número de Nusselt - Nu (Eq. 24), que é visto como o coeficiente adimensional de transferência de calor por convecção.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (24)$$

O Nu representa o aumento da transferência de calor através de uma camada de fluido como resultado da convecção em relação à condução do mesmo fluido em toda a camada. Quanto maior for o número de Nusselt, mais eficaz será a convecção (ÇENGEL, 2009).

As correlações empíricas propostas por Dittus-Boelter, Gnielinski (1975) e Petukhov (1970) para o número de Nusselt com fluidos internos monofásicos com escoamento turbulentos completamente desenvolvidos em tubos lisos, Equações 25, 26 e 27 respectivamente, e são descritas abaixo. A equação de Dittus-Boelter é uma das mais utilizadas equações da literatura, mas com erros implícitos de até 25%. No entanto, as duas últimas equações são mais complexas, mas com melhor precisão e erros consideravelmente reduzidos, em torno de 10%.

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad \begin{array}{l} Re > 1000 \\ 0,6 \leq Re < 160 \\ \frac{L}{D} > 10 \end{array} \quad (25)$$

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad \begin{array}{l} 2300 < Re < 5 \times 10^6 \\ 0,5 < Pr < 2000 \end{array} \quad (26)$$

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} Re Pr}{1,07 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad \begin{array}{l} 10^4 < Re < 5 \times 10^6 \\ 0,5 < Pr < 2000 \end{array} \quad (27)$$

As correlações apresentadas fornecem resultados suficientemente precisos para a maior parte do propósito em engenharia (Çengel, 2009). Elas também podem ser utilizadas para obter estimativas grosseiras do fator de atrito e do coeficiente de transferência de calor na região de transição (KREITH et al., 2011).

A equação 23 é utilizada para encontrar as perdas de cargas (ΔP) associadas à altura adicional que o fluido deve ser elevado por uma bomba utilizada. Uma vez que a perda de carga é conhecida, a potência requerida na bomba (Potência de Bombeamento - $\dot{W}$) para

superar a resistência ao escoamento associada a essa queda de pressão pode ser determinada a partir da Equação 28.

$$\dot{W} = \frac{\dot{m} * \Delta P}{\rho} \quad (28)$$

A efetividade da transferência de calor (ε) (Eq. 29) encontrado nos trocadores de calor é definido através da Equação 9 e a taxa de transferência de calor máxima possível ($q_{\max}$), onde a taxa de transferência máxima possível pode ser determinada através da Equação 20, onde o $C_{\min}$ é o menor valor encontrado entre as equações 8a e 8b.

$$\varepsilon = \frac{Q_{ave}}{q_{max}} \quad (29)$$

$$q_{max} = C_{min}(T_{h1} - T_{c1}) \quad (30)$$

Para determinar em qual trocador de calor se obteve a melhor índice de desempenho (η) em relação às trocas térmicas com o uso dos nanofluidos a base de Grafeno em comparação com a água utiliza-se a Equação 31, através da taxa média de transferência de calor e da perda de carga, equações 9 e 23 (MOHAMMED e NARREIN, 2012).

$$\eta = \frac{Q_{ave}}{\Delta P} \quad (31)$$

Com todos os dados de processamento apresentado podem-se verificar todos os resultados desta obra. As validações das simulações juntamente com todos os resultados foram apresentadas no Capítulo 6.

6 RESULTADOS E DISCURSÕES

Neste capítulo é apresentado e comentado a validação dos experimentos e resultados nos trocadores de calor, como os obtidos a partir da simulação computacional no trocador de calor duplo tubo via CFD. Estes resultados foram obtidos através da aplicação da metodologia descrita no capítulo 4, para análise experimental e capítulo 5 para simulação computacional e no processamento de dados.

A exposição dos resultados é realizada em duas etapas: na primeira etapa valida-se a análise experimental e numérica dos trocadores de calor utilizando água e comparando com outros modelos em estudos, através das análises do número de Nusselt, do coeficiente de atrito, da perda de carga e sua potência de bombeamento.

Na segunda etapa são apresentadas as análises dos resultados para os trocadores de calor nos parâmetros do comportamento energético em relação ao coeficiente de global de transferência de calor, a efetividade de transferência de calor e do índice de desempenho (eficácia).

6.1 VALIDAÇÃO DA ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DOS TROCADORES

Depois da verificação que realmente o nanofluido a base de Grafeno utilizado apresentava todas as características morfológica de Grafeno, apresentado no Apêndice B, deu-se o início da validação nos resultados experimentais e das simulações computacionais, através de testes realizados com apenas água, comparando com as correlações existentes demonstradas no capítulo 5, para o coeficiente de transferência de calor convectivo (h) e do número de Nusselt (Nu) em função do número de Reynolds (Re), do comportamento do fator de atrito (f) e das perdas de carga (ΔP) nos trocadores de calor. A fim de verificar a precisão da configuração experimental e da modelagem computacional utilizada nos experimentos e o comportamento do coeficiente de transferência de calor, em seguida, o erro do sistema foi medido para garantir a sua precisão.

6.1.1 Comportamento do Número de Nusselt - Nu

O Gráfico 1 apresenta os resultados do número de Nusselt no trocador de calor tubo duplo – DTHE experimental e da simulação para água em relação as correlações empíricas de Dittus-Boelter (Eq. 25) Gnielinski (Eq. 26) e Petukhov (Eq. 27) para as temperaturas de 40°C em (a), 50°C em (b) e 60° em (c). Pode-se perceber claramente que quanto maior a temperatura e o número de Reynolds, maior são o número de Nusselt e o seu coeficiente de transferência de calor, tanto para os resultados experimentais como para os simulados.

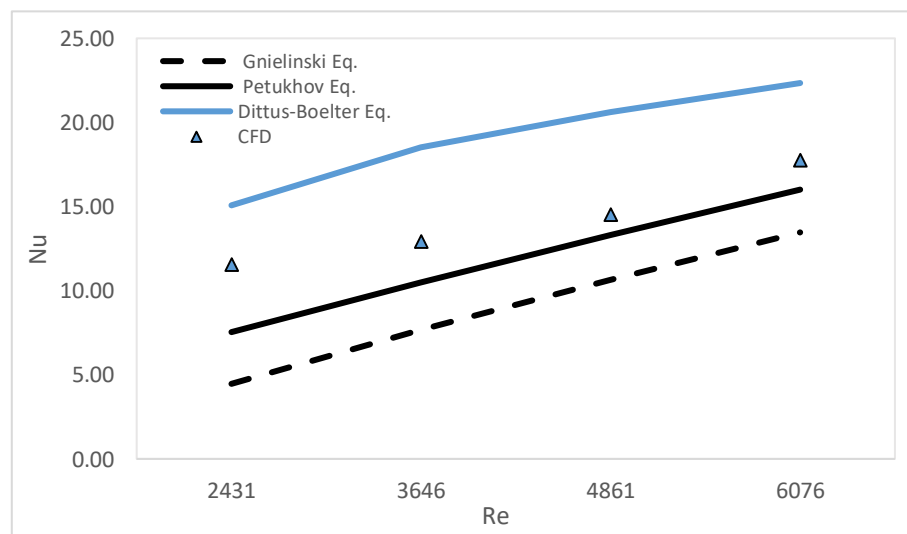
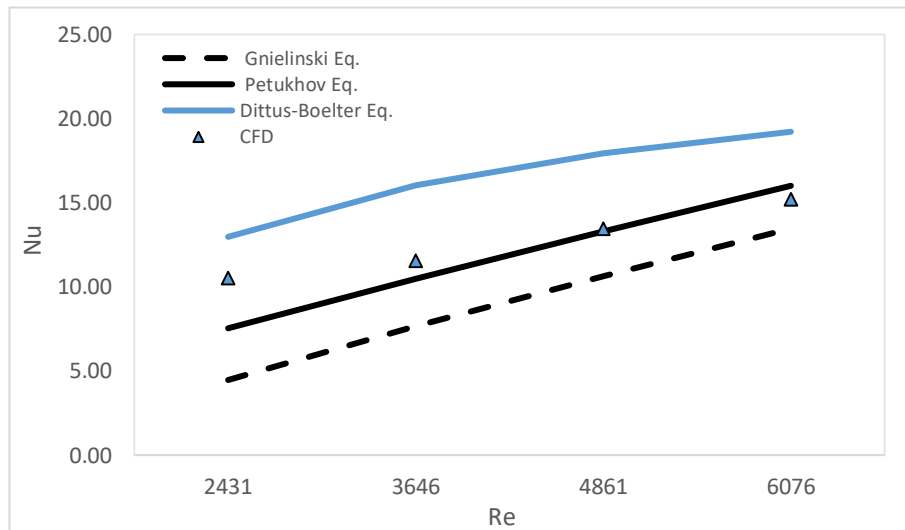
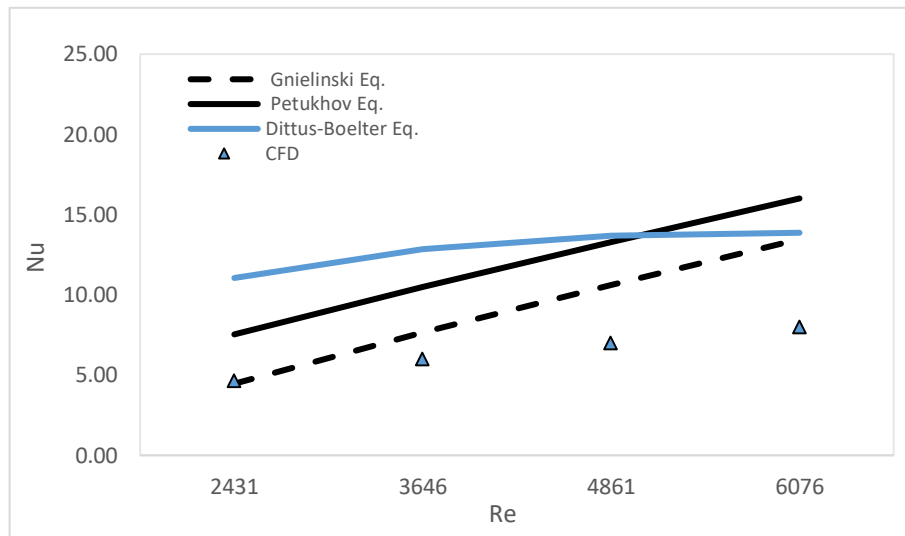
Os valores de Nu determinados a partir dos experimentos mostraram boa concordância com os calculados pelas correlações empíricas e o modelo CFD, podendo simular as características de transferência de calor dos nanofluidos a base de Grafeno.

O maior erro relativo encontrados entre as correlações e os valores do modelo numérico foram 31%, 36% e 9%, e os menores erros relativos foram 21%, 13% e 1% para o Dittus-Boelter, correlações de Gnielinski e Petukhov, respectivamente. Além da propagação dos erros dos valores experimentais, aproximadamente 5%, ressaltando que mesmo com essas divergências os valores obtidos encontram-se dentro dos intervalos considerados pelos valores numéricos e experimentais.

Além disso, pode-se perceber que a divergência entre valores numéricos e experimentais foram encontrados com o uso da equação de Petukhov, que representa com mais precisão os valores numéricos de Nusselt, confirmando assim que o modelo pode reproduzir com precisão os resultados encontrados na operação real do trocador de calor de tubo duplo, com valores de erro relativo máximo e mínimo de 9% e 1%.

Portanto, pode-se afirmar que o modelo desenvolvido via CFD foi capaz de representar adequadamente o comportamento dos coeficientes de transferência de calor por convecção para o trocador de calor de tubo duplo. Estes resultados corroboram com as pesquisas de Han et al.(2017); Sadri et al. (2018) e Sadri et al. (2017).

Gráfico 1- Comparativo entre o Nu Exp. x CFD e as correlações padrão para água no DTHE em: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.

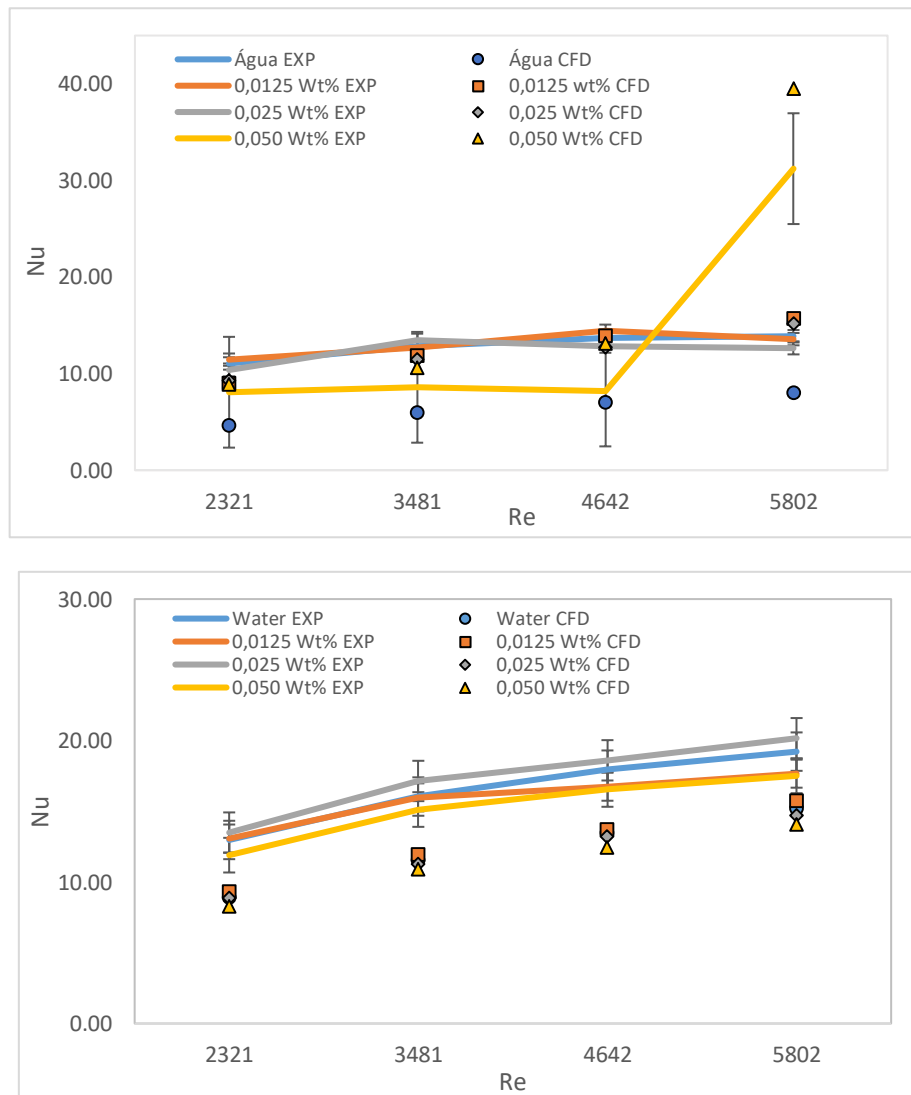


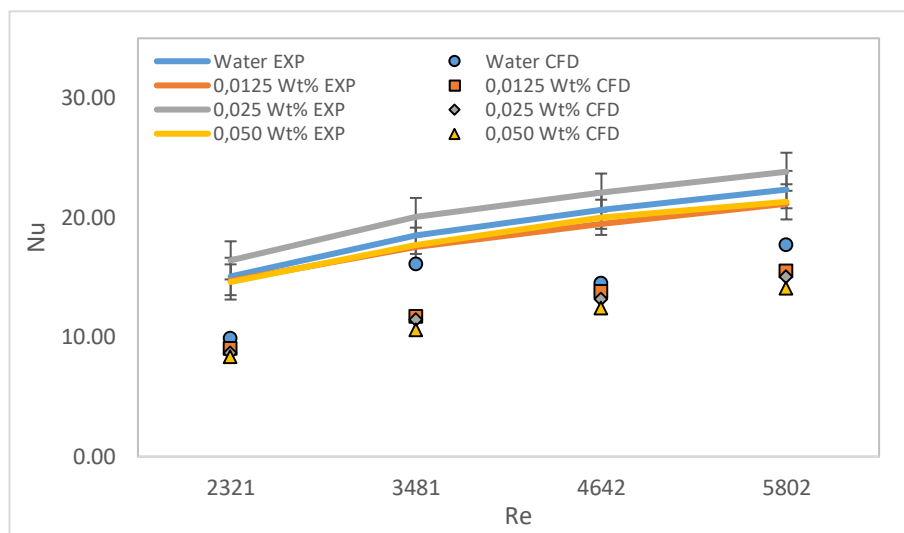
Fonte: O autor, 2020.

O Gráfico 2 apresenta os resultados dos nanofluidos em relação a Nu para o DTHE, no qual o nanofluido com concentração de 0,025wt% Exp apresentou o maior Nu em comparação com a água de 6,66% em (c) e 4,89% em (b). Já para os resultados simulados o maior Nu foi encontrado para 0,0125wt% CFD em (b) em comparação com a água de 3,44%.

O menor erro padrão encontrado foi para a concentração de nanofluidos 0,025wt% Exp e CFD de 0,64% em (a) e 1,36% em (b), respectivamente. Estes resultados corroboram com as pesquisas de Palanisamy et al.(2017); Arzani et al.(2015); Sadeghinezhad et al. (2015); Sadeghinezhad et al. (2014) e Abbsian e Amani (2012).

Gráfico 2 - Comparativo entre o Nu Exp. e CFD para os nanofluidos no DTHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.





Fonte: O autor, 2020.

Podemos perceber que para a temperatura de 40°C em (a) na concentração de 0,050wt% Exp e CFD ocorreu um erro de *outlier* (dados discrepantes, pontos fora da curva) talvez por causa da diferença de temperaturas (ΔT) na análise dos testes (entrada e saída) entre o nanofluido (fluido quente) e a água (fluido frio) que obteve um resultado de apenas 1,16°C e 0,27°C, respectivamente na faixa de $4000 \geq Re \geq 6000$. O que não ocorre com as outras concentrações, pois essa diferença no (ΔT) geralmente é de pelo menos 2°C.

Com a análise dos dados verificados percebemos um erro de leitura para os dados de temperatura de entrada e saída no circuito de fluido frio, no qual, as temperaturas (T_{c1}, T_{c2}) obtiveram as mesmas leituras, como pode ser visto na Tabela 10. Este erro na leitura ocasionado pelo equipamento ou pelo software utilizado levou a essa discrepância no processamento dos dados, e assim sucessivamente, alterou todos os resultados para o nanofluido 0,050wt% Exp e CFD, desde o seu coeficiente de transferência de calor até seu índice de desempenho.

Tabela 10 - Erro de Leitura nas temperaturas do circuito fluido frio.

Vazões (kg.s)		Temperaturas (°C)			
$\dot{m}_q$	$\dot{m}_c$	Th_1	Th_2	Tc_1	Tc_2
0,034	0,04	38,19	37,92	34,08	34,33
0,043	0,04	37,76	36,60	34,08	34,33

Fonte: O autor, 2020.

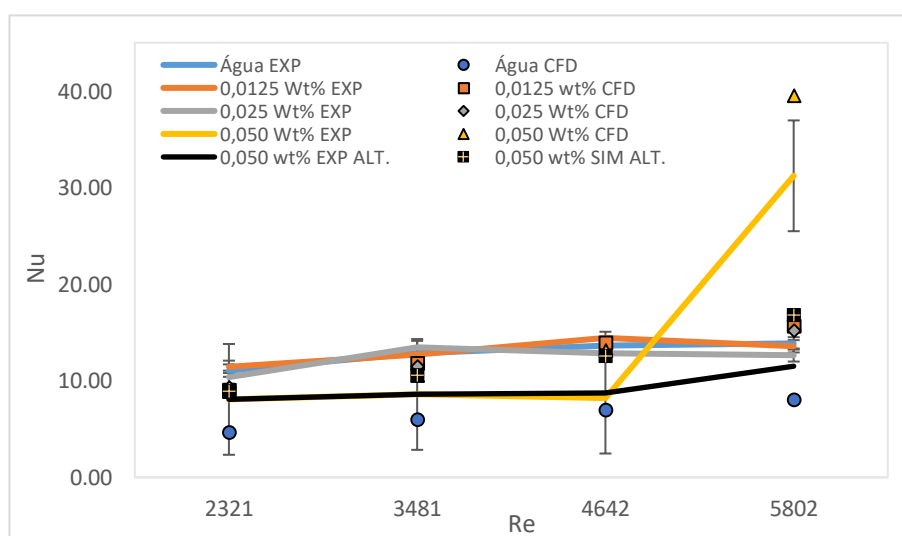
Quando se aumenta a variação de vazão do circuito de fluido quente de 0,034kg.s para 0,0425kg.s ocorre a troca térmica, um aumento de (ΔT) no circuito de fluido frio e uma diminuição para o circuito de fluido quente, o que no caso apresentado abaixo não ocorreu, pois com o aumento da vazão o resultado de T_{c1} deve ser diferente de T_{c2} .

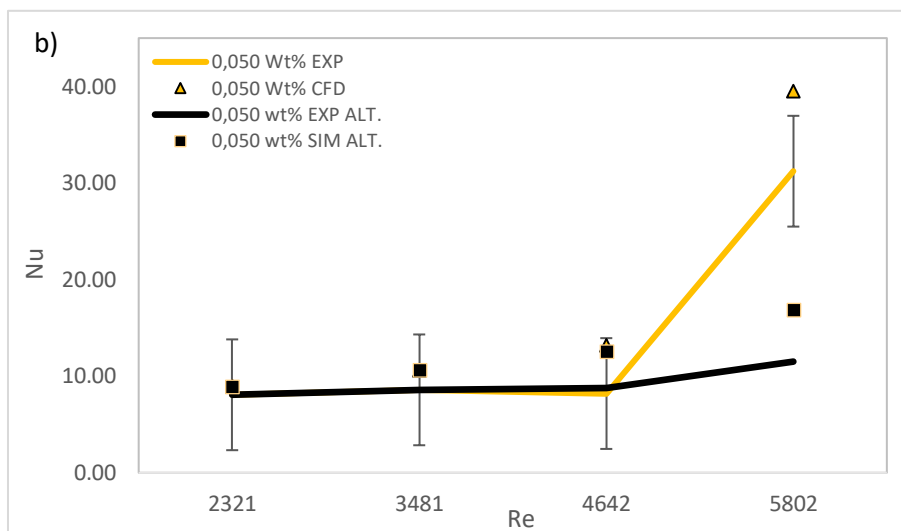
Para confirmar se a discrepância foi ocasionada pelo erro de medição de temperatura e analisar um resultado de acordo com os outros já apresentados, foi realizado uma simulação alterando os dados de entrada e saída (ΔT) dos dados experimentais e os simulados.

O Gráfico 3 (a) apresenta uma investigação e simulação dos dados apresentados no Gráfico 2 (a), afim de verificar se com uma maior diferença no (ΔT) para o nanofluido com a concentração de 0,005wt% Exp e CFD pode haver uma diminuição do erro apresentado. Portanto, como pode ser visto após simular os dados alterando seu ΔT , percebemos que ocorreu uma diminuição na curva dos resultados, assim diminuído o coeficiente de transferência de calor como o Nu, diminuindo a discrepância, demonstrando que o resultado para o nanofluido 0,050wt% Exp e CFD estão em conformidade com os outros resultados apresentados.

O Gráfico 3 (b) demonstra apenas os resultados apresentados para o nanofluido 0,050wt% Exp e CFD, nele fica mais perceptivo que com a alteração de no ΔT ocorre uma melhor concordância entre os resultados experimentais e os simulados.

Gráfico 3 - Estimativa de variação no ΔT para a concentração de 0,05wt% Exp e CFD.





Fonte: O autor, 2020.

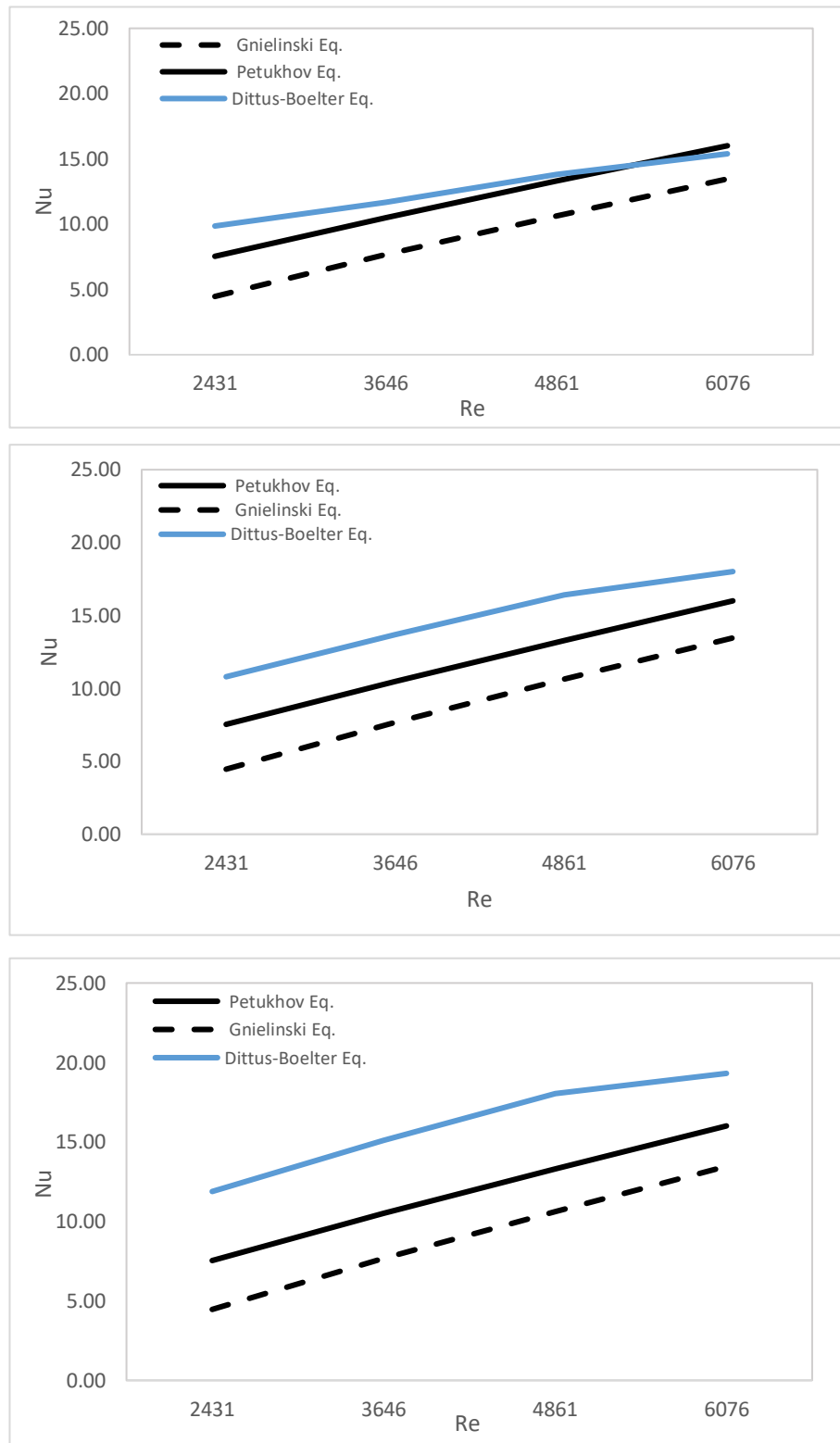
Já no Gráfico 4 são apresentados os resultados experimentais do Nu para o trocador de calor casco e tubo – STHE em relações as correlações padrão, para as temperaturas de 40°C em (a), 50°C em (b) e 60°C em (c). Assim como ocorreu no trocador de tubo duplo pode-se perceber no de casco e tubo, que quanto maior a temperatura e o número de Reynolds, maior são o número de Nusselt e o seu coeficiente de transferência de calor.

Portanto, pode ser deduzido que os resultados experimentais estão em conformidade com os das correlações empíricas para a faixa de Re investigada neste estudo, indicando a confiabilidade de nossa configuração experimental para transferência de calor medida. Assim, nossa configuração experimental pode ser empregada para avaliar a transferência de calor dos nanofluidos a base de Grafeno.

O maior Nu e a máxima diferença entre os valores e as correlações foram encontradas na temperatura de 60°C em (c), com uma melhora de 25,47% em relação à temperatura de 40°C em (a) e diferença máxima de 43,35% e 20,61% para Gnielinski e Petukhov, respectivamente.

O desvio máximo entre os resultados experimentais e os previstos nas correlações são inferiores a $\pm 1,7\%$. O menor erro padrão encontrado nos resultados em relação às temperaturas utilizadas foi de 1,21% em (a). Esta análise dos resultados também pode ser vista na pesquisa de Küçük et al. (2019).

Gráfico 4 - Comparativo entre o Nu Exp. e as correlações padrão para a água no STHE em: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.

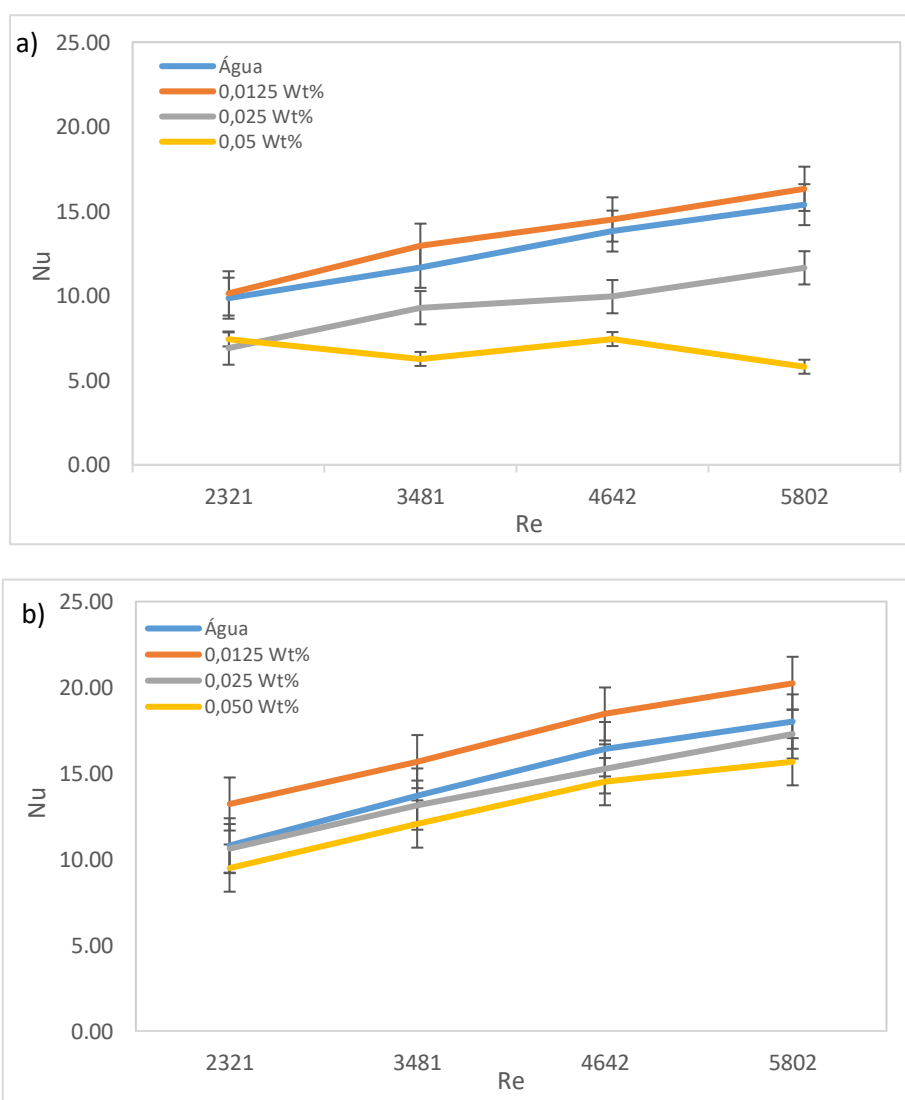


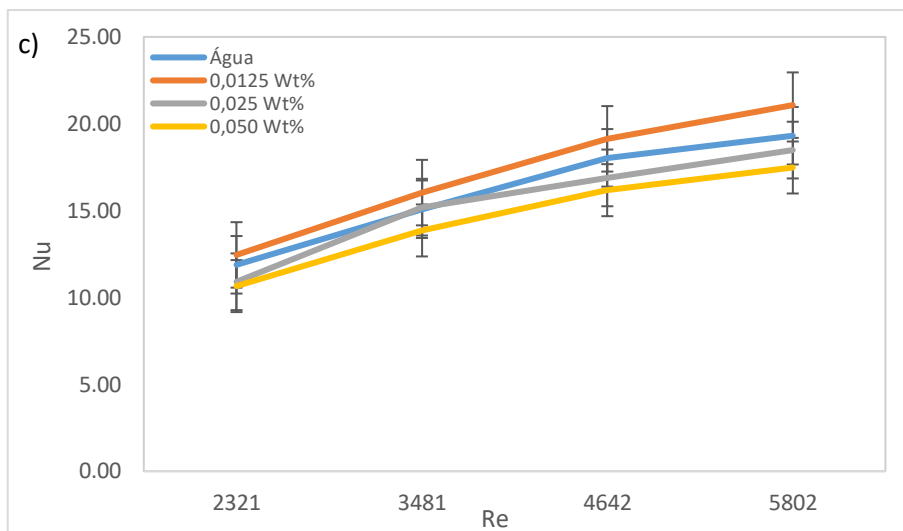
Fonte: O autor, 2020.

O Gráfico 5 apresenta os resultados dos nanofluidos em relação a Nu para o STHE, no qual o nanofluido com concentração de 0,0125wt% apresentou o maior Nu em comparação com o fluido base de 12,31% em 50°C, 9,11% em 60°C, e 6,10% em 40°C.

O menor erro padrão encontrado nos resultados em relação às temperaturas utilizadas foi de 0,98% em (a) para a concentração de 0,025wt%. Na temperatura de 40°C em (a) a concentração de nanofluido 0,050wt% percebe-se que ocorreu uma variação talvez ocasionada pelo erro de *outlier*, como ocorreu no trocador de calor tubo duplo para este nanofluido, com diferença de troca térmica entre o fluido quente e frio de 0,25°C e 0,24°C, respectivamente na faixa de $4000 \geq Re \geq 6000$ (SHAHRUL et al., 2016; GAO et al., 2015 e FARAJOLLI et al., 2010).

Gráfico 5 - Comparativo entre o Nu Exp. para os nanofluidos no STHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.



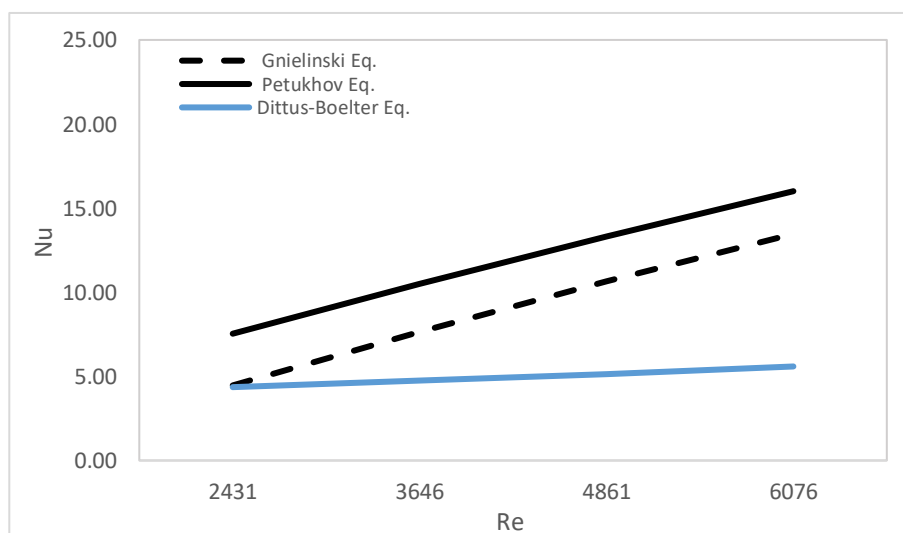


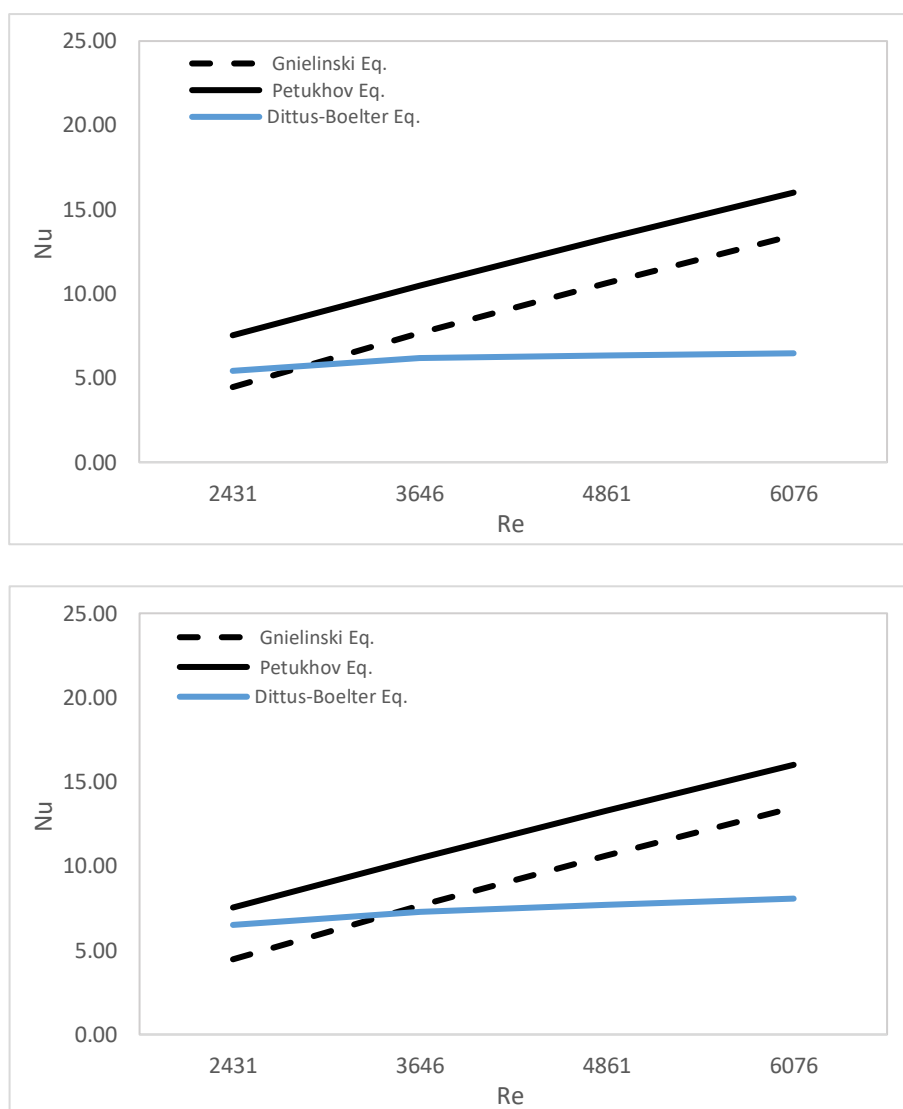
Fonte: O autor, 2020.

O Gráfico 6 apresenta os resultados experimentais do Nu para o trocador de calor placas planas – PHE em relações as correlações padrão, para as temperaturas de 40°C em (a), 50°C em (b) e 60°C em (c). Podemos perceber que com o aumento da temperatura ocorre também o aumento do NU, porém este aumento foi muito pequeno, quase constante. Isso ocorra porque o trocador calor de placas em comparação com os outros trocadores, apesar de apresentar a mesma área de transferência de calor, apresenta uma menor troca térmica entre o fluido (água), conseqüentemente seu coeficiente de transferência de calor apresentará menores valores em comparação com os outros trocadores.

Os resultados experimentais não apresentaram uma boa conformidade com os das correlações empíricas para a faixa de Re investigada. O menor desvio e erro padrão encontrado nos resultados em relação às temperaturas utilizadas foi de 0,47% e 0,23%, para Petukhov e Gnielinski em comparação com a correlação de Dittus-Boelter, respectivamente em (b) (PANTZALI et al., 2009b).

Gráfico 6 - Comparativo entre o Nu Exp. e as correlações padrão para a água no PHE em: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.





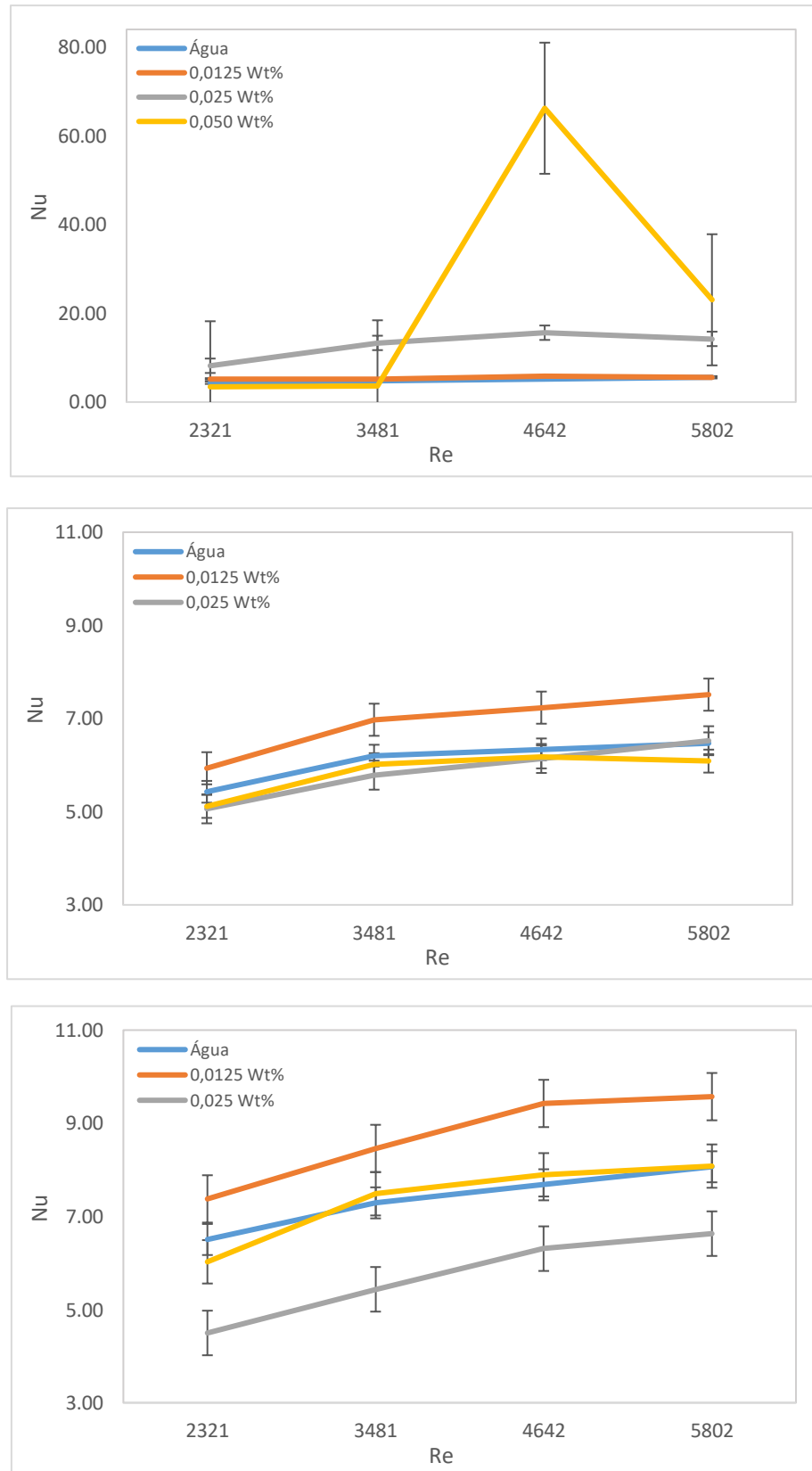
Fonte: O autor, 2020.

Já no Gráfico 7 é apresentado os resultados dos nanofluidos em relação a Nu para PHE, no qual o nanofluido com concentração de 0,0125wt% apresentou o maior Nu em comparação com o fluido base de 18,58% em (c) 16,07% em (b).

O menor erro padrão encontrado foi para a concentração de nanofluidos 0,05wt% de 0,25% em (b) e 0,47% em (c). Wang et al.(2018a); Khairul et al. (2014) e Pandey e Nema (2012) também observaram nas suas pesquisas a mesma análise.

O mesmo erro de *outlier* que apresentou os DTHE e STHE aconteceu com o trocador de placas planas para a mesma concentração de 0,05wt% em (a). Essa discrepância de valores em comparação com as outras concentrações ocorreu por causa da diferença de temperatura entre os fluidos e erros de medição através dos termopares nas análises.

Gráfico 7 – Comparativo entre o Nu Exp. para os nanofluidos no PHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.



Fonte: O autor, 2020.

6.1.2 Comportamento do Fator de atrito - f

As correlações para os coeficientes de atrito em fluxos turbulentos foram baseadas em estudos experimentais, devido à dificuldade de lidar teoricamente com escoamentos turbulentos. Este procedimento de comparação de resultados tem sido utilizado em vários estudos de fluxo e correlações, como pode ser visto na literatura de Hosseini et al. (2018).

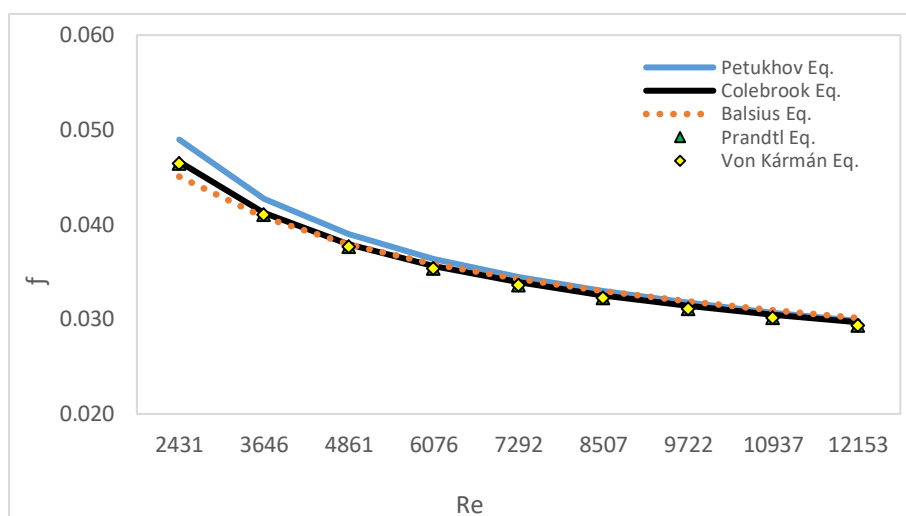
Um parâmetro importante a ser verificado em trocadores de calor é o fator de atrito como uma função da queda de pressão ao longo do equipamento. Portanto, as seguintes correlações foram consideradas para avaliar este parâmetro, como Petukhov (Eq.18), Blasius (Eq. 19), Von Kármán (Eq. 20), Prandtl (Eq. 21), Colebrook (Eq. 22) apresentadas no processamento de dados no capítulo 5. Os resultados experimentais do fator de atrito são superiores aos resultados encontrados nas correlações apresentados no Gráfico 8.

Os resultados obtidos usando água como fluido de trabalho nos trocadores de calor através das correlações empíricas citadas na literatura mostraram um comportamento coerente em relação ao fator de atrito e sua relação com a queda de pressão no sistema, com boa concordância, dentro de um intervalo de erro relativo máximo de 8% e um mínimo de 0,04%, quando comparado com a equação de Blasius.

Podemos perceber que com $Re > 8000$ a curva passa a ficar linear com valores das correlações em comparação com a água quase idênticos, sobrepostos uns sobre os outros, isso indica uma boa precisão entre os valores encontrados, uma vez que é pertinente notar que essas correlações empíricas apresentam erros de incerteza nos cálculos. O desvio observado no presente estudo (água) é de aproximadamente $\pm 5\%$, o que indica que nossa configuração experimental é confiável para medir a perda de carga na faixa de Re investigada nesta pesquisa.

Tomando os valores determinados pela correlação de Petukhov como referência, sendo aquele utilizado para tubos lisos com fluxo turbulento totalmente desenvolvido, os erros máximo relativos foram de 4,78%, 7,9%, 9,51%, 5,13% e os mínimos foram 0,71%, 0,04%, 1,73%, 1,75%, entre as outras correlações de Colebrook, Blasius, Prandtl e Von Kármán, respectivamente (KUMAR et al., 2016; ARZANI et al., 2015; HOSSEINI et al., 2018 e Akhavan-zanjani et al., 2014).

Gráfico 8 - Comparativo do Fator de atrito em relação as correlações padrão para água.

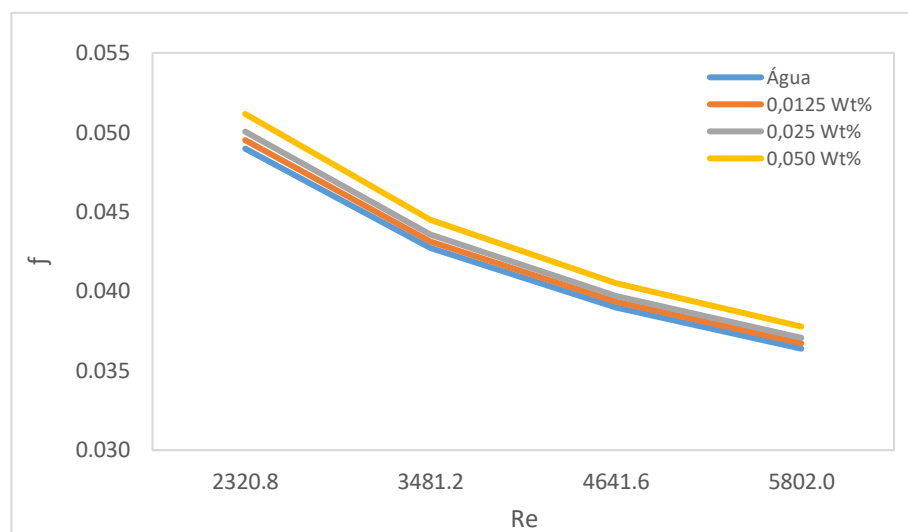


Fonte: O autor, 2020.

No Gráfico 9, podemos ver o fator de atrito para as diferentes concentrações de nanofluido GNP/água, onde ocorreu o aumento do fator de atrito à medida que a concentração em peso de GNP/água aumenta, ocorrendo à diminuição do mesmo, quando há o aumento no número de Reynolds, que é um fenômeno comum.

Os nanofluidos de Grafeno apresentaram fatores de atrito maiores que o indicado para o fluido base (água) com erros relativos máximos de 1,10%, 2,18% e 4,47% para a concentração de em peso de 0,0125wt%, 0,025wt% e 0,050wt%, respectivamente. Os fatores de atrito dos nanofluidos GNP/água neste estudo são semelhantes aos resultados relatados nas pesquisas de Wang et al. (2018b); Sajjad et al. (2018); Sadri et al. (2018); Ranjabarzadeh et al. (2017); Selvam et al. (2017b); Arzani et al. (2016) e Sadeghenezhad et al. (2014) que utilizaram nanofluidos de Grafeno.

Gráfico 9 - Comparativo do Fator de atrito dos nanofluidos GNP/Água em relação ao Re.

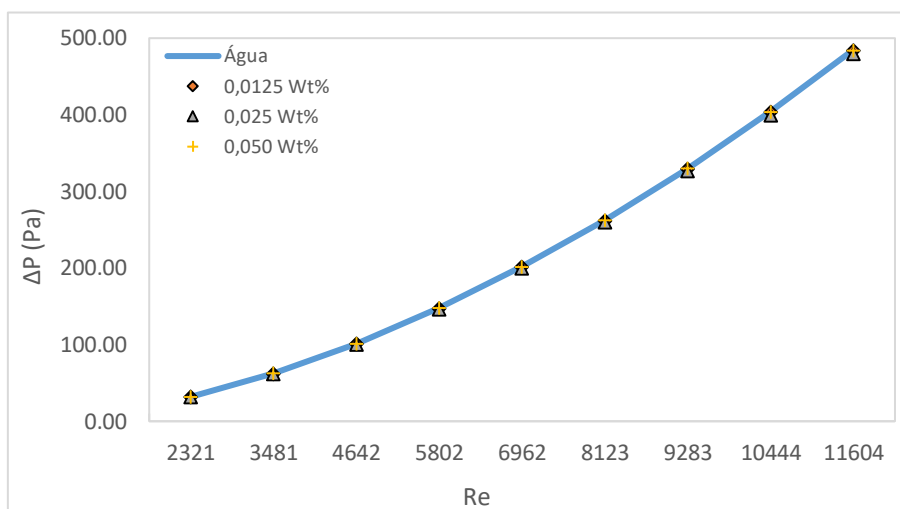


Fonte: O autor, 2020.

6.1.3 Comportamento da queda de pressão - ΔP

O Gráfico 10 apresenta os resultados da perda de carga em relação ao Re, nele pode ser visto claramente que a perda de carga aumenta enquanto o fator de atrito no Gráfico 9 diminui à medida que o número de Reynolds aumenta. O fator de atrito e as perdas de cargas foram calculadas através das equações 18 e 23, respectivamente apresentadas nos capítulo 5 no processamento de dados. Os resultados mostraram que para a perda de carga quanto maior for à concentração em peso do nanofluido maior é sua perda de carga em comparação com a água, e com o incremento do Re. Os nanofluidos 0,0125wt%; 0,025wt% e 0,050wt% apresentaram uma menor perda de carga em relação ao fluido base de 0,17%; 1,10%; 2,23%, respectivamente. Portanto, o consumo de energia necessário para bombear nanofluidos é igual ou, em alguns casos, menor quando comparado com a água.

Gráfico 10 - Comparativo da Perda de Carga dos nanofluido GNP/Água em relação ao Re.



Fonte: O autor, 2020.

Os resultados experimentais mostram que a perda de carga e fator de atrito depende da concentração em peso do GNP/água e do número de Reynolds, e que com o aumento da concentração das partículas nos nanofluidos maior é a queda de pressão.

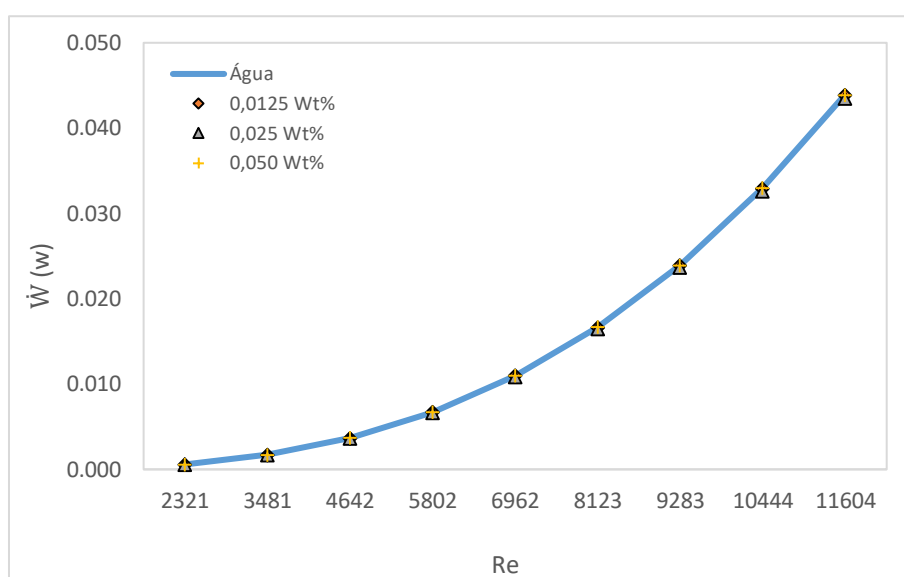
Como parâmetro de identificação no comportamento hidrodinâmico da adição de nanofluidos Grafeno na água, o cálculo das quedas de pressões e o valor da potência de energia (bombeamento) do foram introduzidos no sistema de bombeamento ao longo do trocador de calor. O resultado da Potência de bombeamento que é função da velocidade do fluxo, da geometria do trocador de calor e da queda de pressão pode ser visto no Gráfico 11, e seu calculo foi realizado através da equação 28, apresentada no capítulo 5 no processamento de dados, onde a água apresentou a maior potência de bombeamento em relação aos nanofluidos 0,0125wt%; 0,025wt% e 0,050wt% de 0,16%; 1,10% e 2,23%, respectivamente.

Observa-se que quanto maior o número de Reynolds maior a potência de bombeamento, com um aumento quase exponencial. Porém, com o aumento da concentração de nanopartícula de Grafeno no fluido, ocorreu também o aumento na viscosidade e da velocidade, mas sua potência de bombeamento diminuiu em comparação com o fluido base, isso é devido as propriedades lubrificantes das partículas de GNP, reduzindo assim o atrito entre o as partículas do fluido e as superfícies (paredes) do trocador, pois o fluido se comporta como um fluido lubrificante.

Isto ocorre porque a água apresenta uma viscosidade dinâmica mais baixa que os nanofluidos, necessitando de menos energia para transportar o fluido do reservatório aos

trocadores de calor. Portanto, o consumo de energia necessário no bombeamento do nanofluidos é igual ou, em alguns casos, menor quando comparado à água. Este fenômeno pode ser visto nas pesquisas apresentadas por Sadri et al.(2017); Esfahanie Languri (2017); Goodarzi et al. (2016); Sadeghenezhad et al. (2015); Bahiraei et al. (2019b) que informam quanto maior a concentração do nanofluido GNP/água maior será sua potência de bombeamento em relação ao fluido puro (água). O poder de bombeamento dos nanofluidos GNP é próximo ao da água.

Gráfico 11- Comparativo da Potência de Bombeamento dos nanofluido de GNP/Água em relação ao Re.



Fonte: O autor, 2020.

6.2 ANÁLISES PARAMÉTRICAS DO COMPORTAMENTO ENERGÉTICO

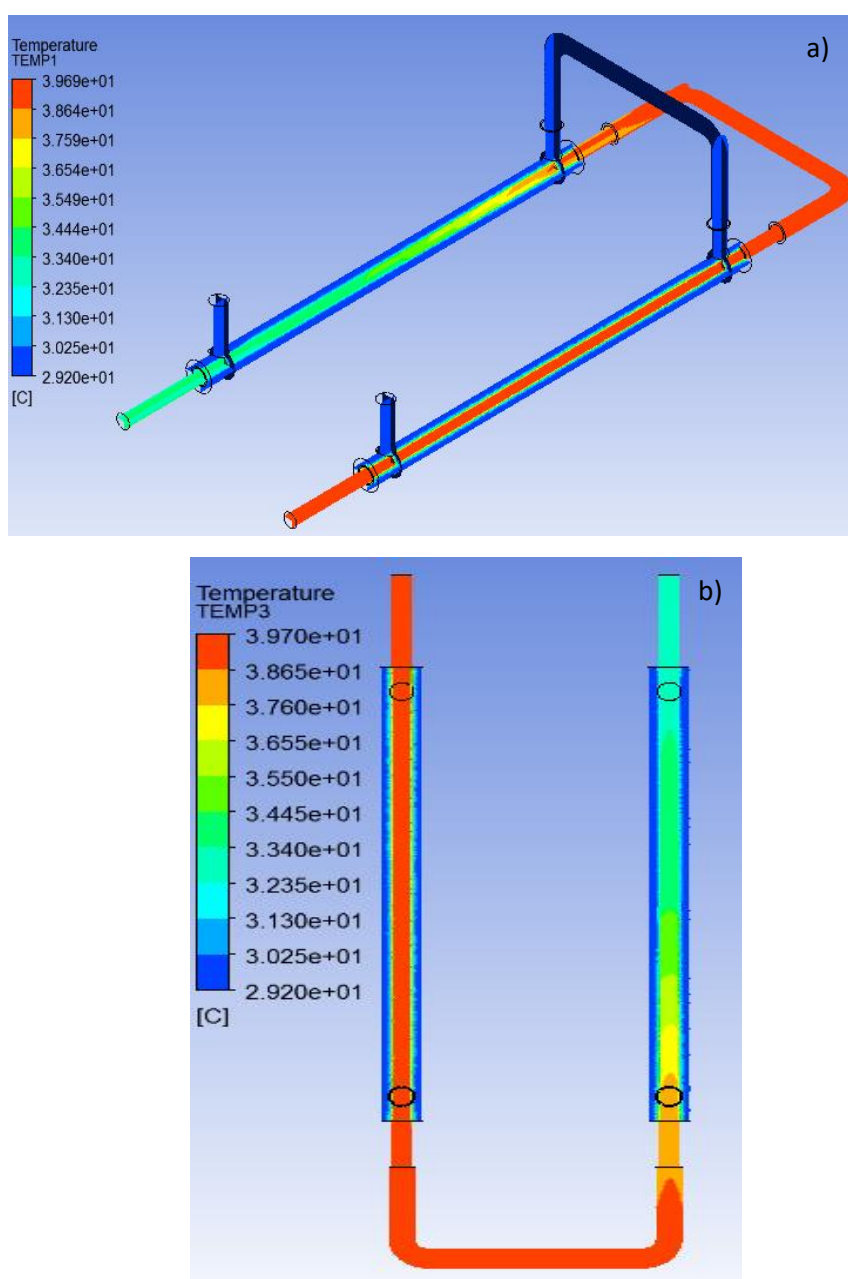
Os resultados dos comportamentos energéticos dos nanofluidos a base de Grafeno nos trocadores de calor em relação ao coeficiente de global de transferência de calor, a efetividade de transferência de calor e do índice de desempenho (eficácia) são apresentados abaixo.

6.2.1 Comportamento de fluxo no modelo via CFD simulação

A Figura 43 apresenta o resultado do comportamento da temperatura interna dentro do trocador de calor tubo duplo no modelo CFD, em (a) para o comportamento em 3D, mostrando toda a variação de troca térmica existente entre os fluidos e em (b) para sua vista

superior. A barra de cores mostra uma variedade de cores, de azul a vermelho indicando a faixa de temperatura do mínimo ao máximo no tubo. Nela podemos perceber que na entrada no nanofluido e saída da água a transferência de calor por convecção é muito pequena em toda a extensão do primeiro tubo, porém, quando o nanofluido entra no segundo tubo no qual é à saída do nanofluido e entrada da água, ocorre nas partes finais do trocador de calor a maior transferência de calor presente nos fluidos, com uma temperatura de redução de $8,39^{\circ}\text{C}$, ou seja, 28,03% em relação ao nanofluido de GNP para água (MOHAMMED e NARREIN, 2012; BAHIRAEI et al., 2019a).

Figura 44- Troca térmica interna no DTHE: a)Modelo 3D e b)Vista superior.

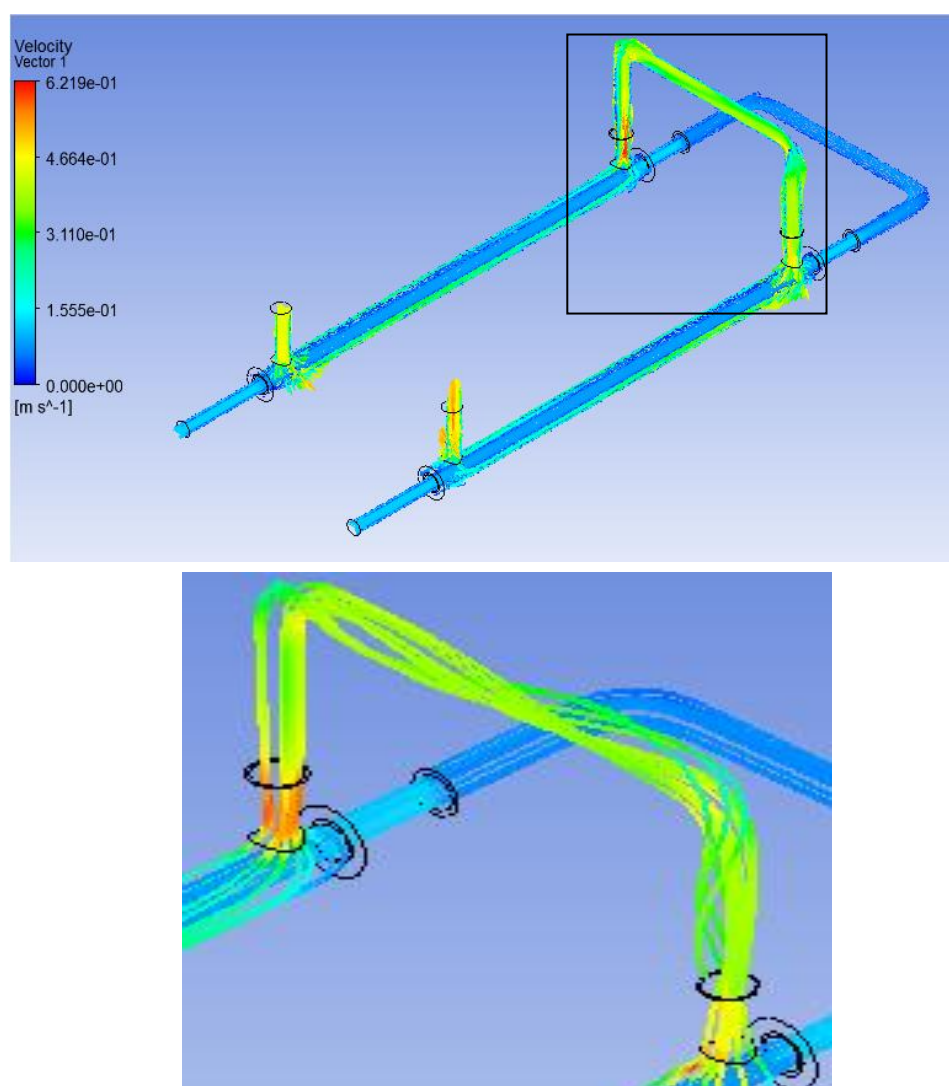


Fonte: O autor, 2020.

O comportamento do vetor velocidade de fluxo interno no DTHE é apresentado na Figura 44, nela podemos perceber que os vetores de velocidade foram aplicados nas entradas e saídas no sentido contra fluxo, conforme o modelo experimental, o fluxo torna-se totalmente desenvolvido dentro de uma curta distância da entrada devido ao pequeno diâmetro. Além disso, a velocidade máxima é maior para o nanofluido GNP em comparação com o da água, embora que o número Reynolds seja constante.

As cores dos vetores são baseadas no aumento ou diminuição de sua velocidade. Nas entradas tanto para o nanofluido como para a água percebe-se uma velocidade maior em relação a todo o caminho percorrido pelos fluidos (BAHIRAEI et al., 2019b; SADRI et al., 2018).

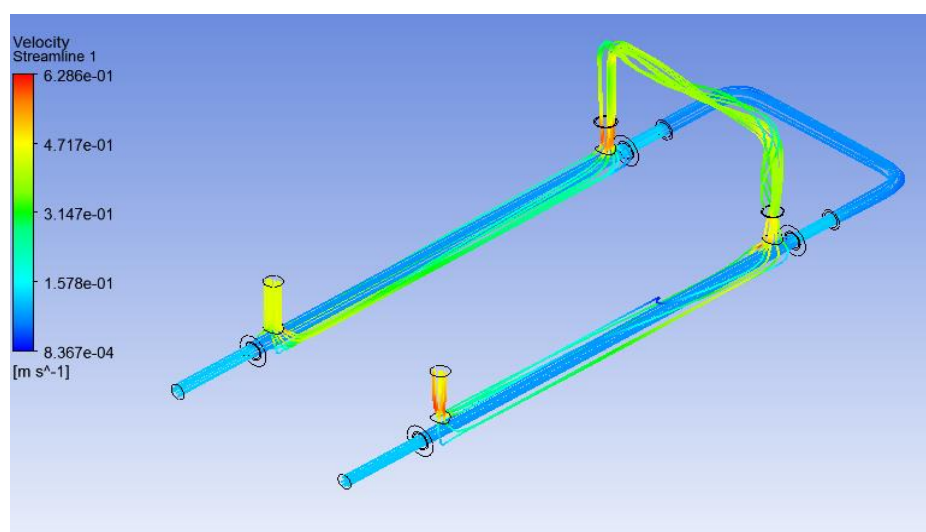
Figura 45 - Vetor Velocidade interna no DTHE.



Fonte: O autor, 2020.

A Figura 45 apresenta as linhas de fluxo internas no DTHE, percebe-se que a água fria começa a mover-se no tubo após entrar no trocador de calor com uma temperatura menor e ao passar por toda estrutura do trocador em sua saída, apresenta uma temperatura maior que a da entrada. Já o nanofluido tem uma alta temperatura na entrada, enquanto sua temperatura reduz com o movimento no trocador de calor devido à transferência de calor para a água fria (HOSSEINI et al., 2018; SOMASEKHAR et al., 2018).

Figura 46 - Linhas de fluxo no DTHE



Fonte: O autor, 2020.

6.2.2 Comportamento do Coeficiente Global de transferência de calor - U

O Gráfico 9 apresenta os resultados do Coeficiente Global de transferência de calor para o DTHE experimental e CFD em relação ao Re , variando as concentrações dos nanofluidos a base de Grafeno para temperatura de 40°C em (a), 50°C em (b) e 60°C em (c), calculados através da equação 15 no capítulo 5 no processamento de dados.

Para as simulações a diferença relativa máxima foi apresentada pelo nanofluido de 0,0125% CFD com temperaturas de 50°C em 9(b) e 60°C em 9(c), mantendo a tendência, com um valor de $U = 19\%$, e a diferença relativa menor foi para o nanofluido de 0,050% CFD com um valor de $U = 2\%$ aproximadamente, para ambas as temperaturas de 50°C e 60°C.

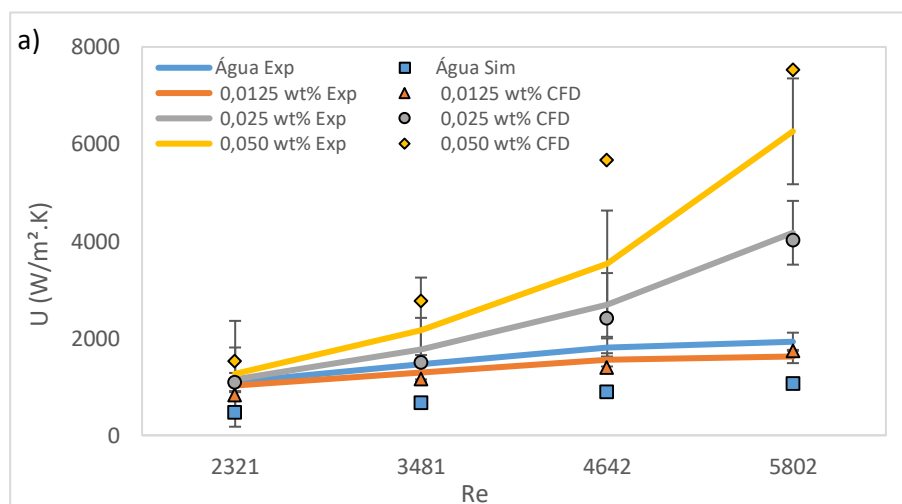
Já no gráfico 9(a) percebemos que quanto maior a concentração de nanopartícula no fluido e seu Re , maior é o seu coeficiente global de transferência de calor, tanto para o experimental quanto no resultado simulado. Este aumento também foi descrito nas pesquisas de Bahiraei et al. (2019a); Sadri et al. (2018); Shahrul et al. (2016). O nanofluido com a

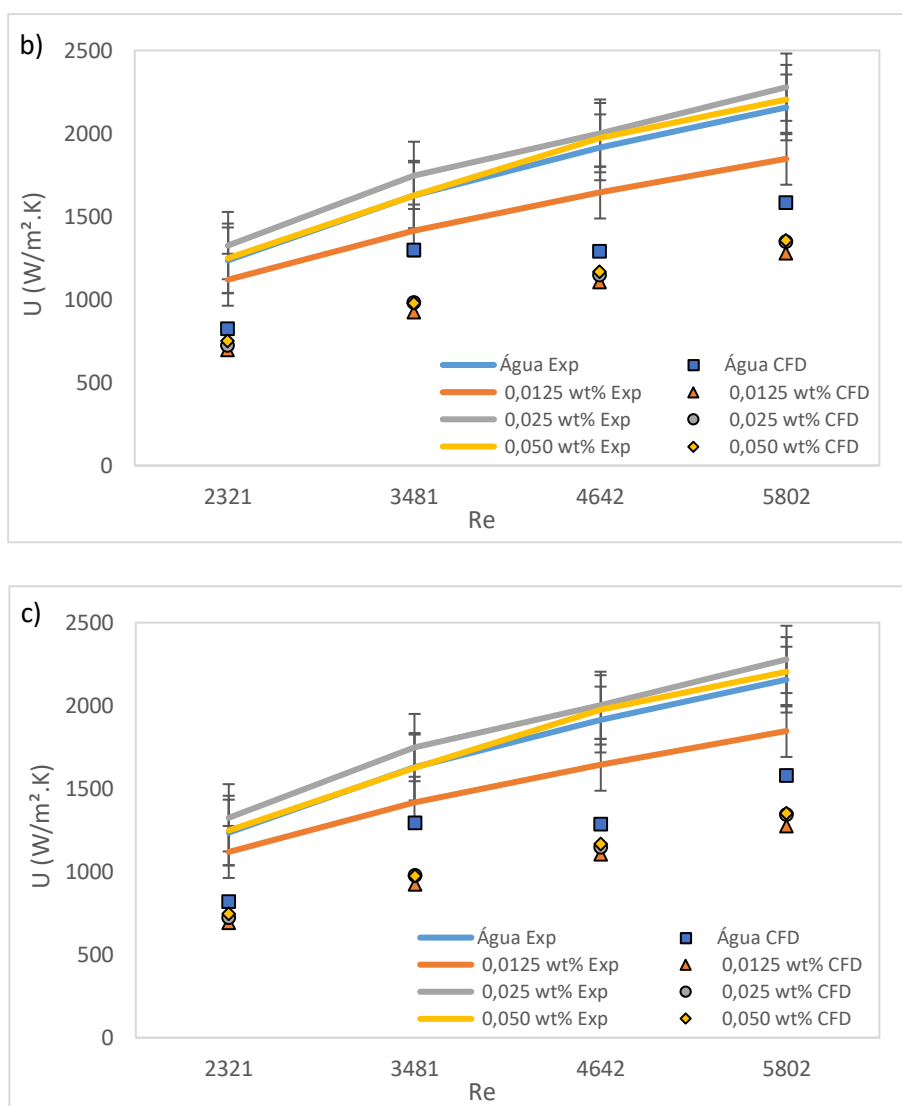
concentração de 0,050wt% Exp e CFD obteve o maior U, com uma melhora de 82%, 80% e 60,66%, para 0,050wt% Exp, 0,050wt% CFD e 0,025wt% Exp respectivamente em comparação ao fluido base. O menor erro padrão encontrado nos resultados foi no nanofluido 0,0125wt% Exp. e CFD de 1,36% e 1,92%, respectivamente.

No gráfico 9(b) o nanofluido com a concentração de 0,025wt% Exp. apresentou o maior aumento no U em relação a água, de 4,91%. Já para os simulados a água obteve o melhor desempenho em comparação com os nanofluidos. O nanofluido 0,0125wt% Exp. apresentou o menor erro entre os fluidos de 1,34% e a concentração de 0,025wt% CFD com erro de 1,32% para os resultados simulados (BANHIRAEI et al., 2019b; RANJBARZADEH et al., 2017; KIM et al., 2018; KUMAR et al., 2016).

Assim como ocorreu com a temperatura de 50°C em 9(b) ocorreu no 9(c) com temperatura de 60°C, o nanofluido 0,025wt% Exp. apresentou o maior número de U em relação ao fluido base, de 5,64%. E o menor erro entre os fluidos foi de 1,56% e 1,25% para a concentração de nanofluido de 0,0125wt% Exp. e CFD, respectivamente (AKYÜREK et al., 2018; PALANISAMY e KUMAR, 2017; KHEDKAR et al., 2014).

Gráfico 12 - Comparativo entre o U Exp. X CFD para os nanofluidos GNP/Água no DTHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.





Fonte: O autor, 2020.

Os resultados experimentais de U no STHE são apresentados no Gráfico 13, nele podemos perceber que quando ocorre o aumento do Re , da concentração de Grafeno e da temperatura ocorre também o aumento de U , ou seja, isto ocorre porque quanto maior a concentração de nanopartículas de Grafeno maior será a condutividade térmica presente no fluido, proporcionando maior troca térmica e maior o coeficiente de transferência de calor por convecção. Essa percepção também foi apresentada nas pesquisas de Wang et al. (2019) e Farajollahi et al. (2010).

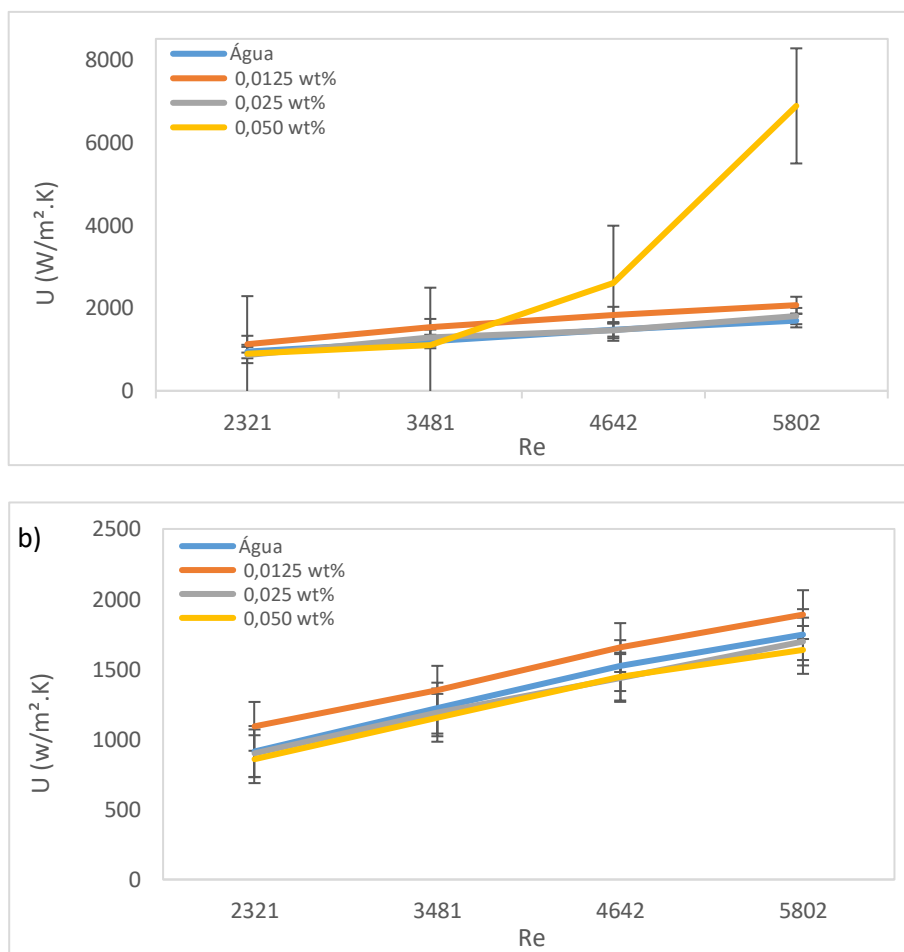
Em 13(a) com temperatura de 40°C, encontramos o mesmo erro de *outlier* que foi analisado no Número de Nusselt e o coeficiente de transferência de calor para o nanofluido 0,050wt% na faixa de $Re > 4000$ com erros de medições nos termopares apresentados na Tabela 10. A concentração de nanofluido de 0,0125wt% apresentou o maior U em relação aos

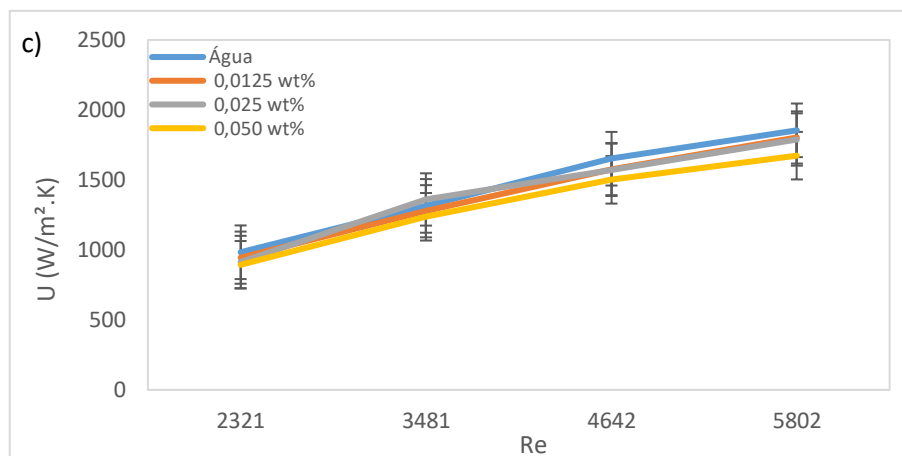
outros fluidos, com um aumento 22,07% em relação a água. O menor erro encontrado foi para o nanofluido de 0,025wt% de 1,95%.

Para temperatura de 50°C em 13(b) também a concentração de 0,0125wt% apresentou o maior U em relação aos fluidos utilizados de 8,15% em relação a água. O menor erro foi apresentado na concentração de 0,025wt% de 1,70% (SOMASEKHAR et al., 2018; LOTFI et al., 2012).

No gráfico 13(c) água obteve o maior U em relação à concentração de nanofluido de 0,050wt% de 10,81% e 2,23% para a concentração de 0,0125wt%. O aumento foi pequeno, ocorreu porque a temperatura do fluido frio ao iniciarmos os experimentos estava na temperatura de 30°C ao invés de 25°C, temperatura padrão para as análises, diferentemente das temperaturas dos nanofluidos em seus testes. O menor erro padrão foi encontrado no nanofluido de 0,050wt% de 1,69% (ANOOP et al., 2013; SHAHRUL et al., 2016).

Gráfico 13 - Comparativo entre o U Exp. para os nanofluidos GNP/Água no STHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.





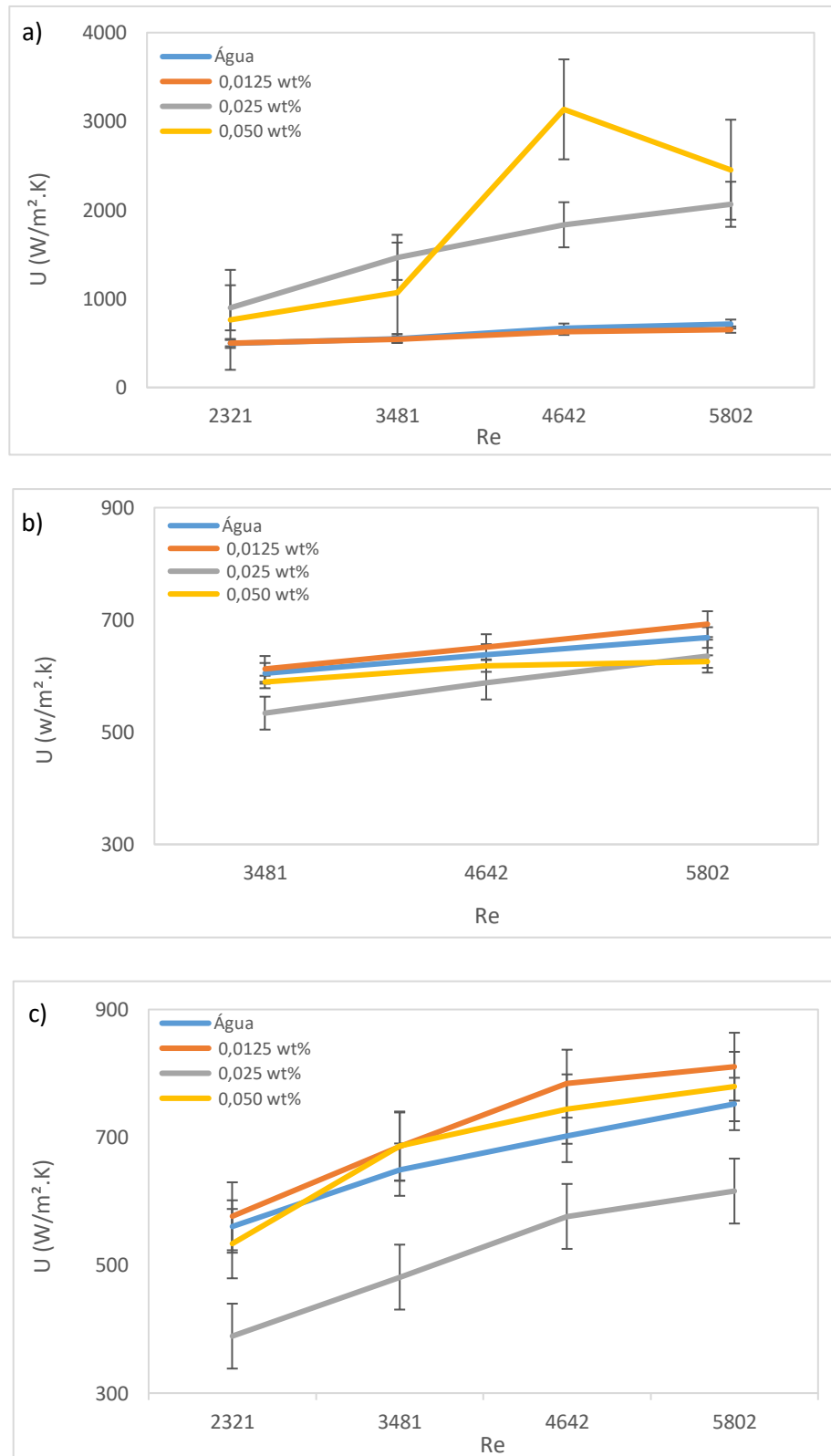
Fonte: O autor, 2020.

No gráfico 14 são apresentados os resultados do U experimental para o PHE em 14(a) para a temperatura de 40°C, pode-se perceber que o mesmo erro de *outlier* apresentado no Nu para a concentração de nanofluido 0,050wt% também pode ser visto no coeficiente global de transferência de calor para o trocador de placas, erro este que se propagou para todos os resultados apresentados para esta concentração. O menor erro padrão encontrado para essa temperatura foi na concentração de 0,0125wt% de 0,35%.

Em 14(b) podemos analisar os resultados para a temperatura de 50°C, no qual o nanofluido 0,0125wt% apresentou um aumento em $U = 3,57\%$ em comparação com o fluido base. O menor erro foi encontrado no nanofluido 0,050wt% de 0,33%. Estes resultados corroboram com as pesquisas de Nguyen et al.(2020); Ahn et al. (2019); Kumar et al. (2016) e Fard et al. (2011).

Já em 14(c) são apresentados os valores para a temperatura de 60°C, onde a concentração do nanofluido de 0,0125wt% apresentou o maior U em relação a água de 7,74% e o menor erro foi encontrado para a concentração de 0,025wt% de 0,5% com desvio padrão de 1% (POURHOSEINI et al., 2018; TIWARI et al., 2013; KWON et al., 2010 e PANTZALI et al., 2009a).

Gráfico 14 - Comparativo entre o U Exp. para os nanofluidos GNP/Água no PHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.



Fonte: O autor, 2020.

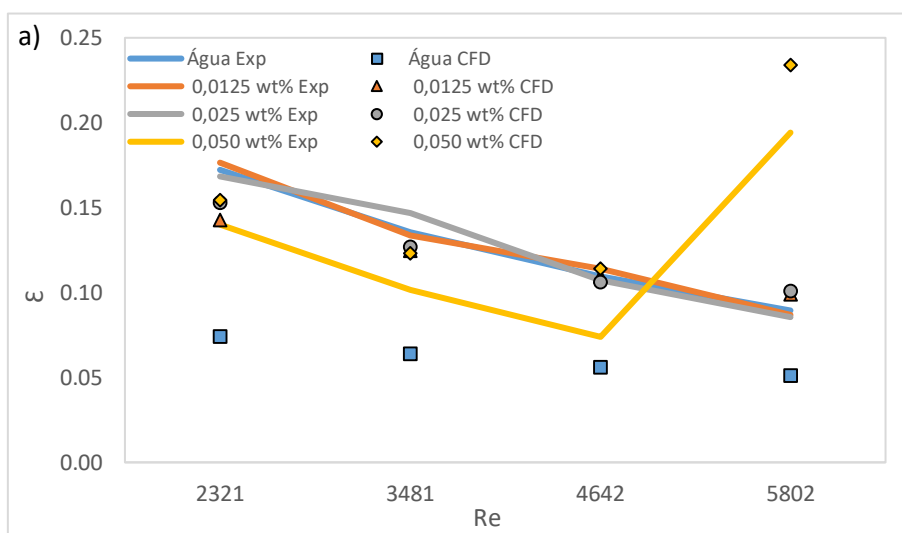
6.2.3 Comportamento da Efetividade de transferência de calor - ϵ

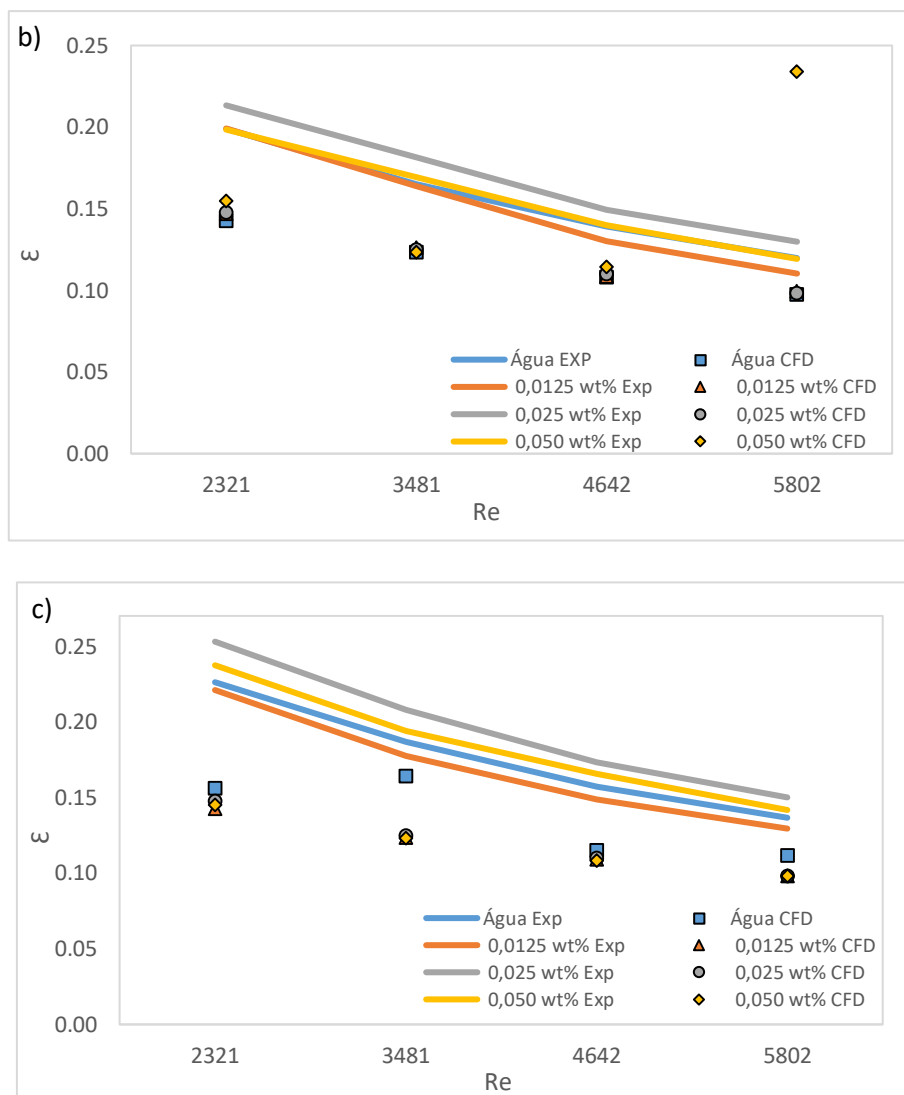
O desempenho econômico de um fluido de trabalho em sistema de transferência de calor é avaliado pela sua efetividade de transferência de calor demonstrado no Gráfico 15, e seus cálculos foram realizados através da equação 29 e 30, que apresentaram os resultados experimentais e CFD em relação ao Re, para a temperatura de 40°C em (a), 50°C em (b) e 60°C em (c) no DTHE. Para as três temperaturas o nanofluido 0,025wt% Exp apresentou melhor efetividade de transferência de calor em comparação ao fluido base, de 8,34% e 7,14% para 15(b) e 15(c), respectivamente, com erro padrão abaixo de 1% em todas as temperaturas.

Percebe-se que Re e a Temperatura são grandezas inversamente proporcionais, pois quanto maior o Re, menor será a sua efetividade de transferência de calor, porém em relação à Efetividade e a Temperatura são grandezas diretamente proporcional, pois quanto maior a temperatura maior sua efetividade. Isso significa que efetividade diminuindo com a variação do Re deve-se realizar a troca dos trocadores por trocadores com maior área de transferência de calor, essa diminuição ocorre porque a queda de pressão foi muito grande devido ao aumento da concentração do GE no fluido.

Em 15(a) a concentração de 0,025wt% CFD apresentou melhor efetividade com aumento de 100% em comparação com as outras simulações e a água. Da mesma forma como ocorreu para Nu, h e U, podemos ver que a concentração de 0,050wt% Exp. e CFD apresentou o mesmo erro de *outlier*, erro este, analisado e simulado no Gráfico 3(b) (SADRI et al., 2017; KUMAR et al., 2017; ARZANI et al., 2016; RANJARZADEH et al., 2017).

Gráfico 15 - Comparativo da Efetividade de transferência de calor dos nanofluidos GNP/Água no DTHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.



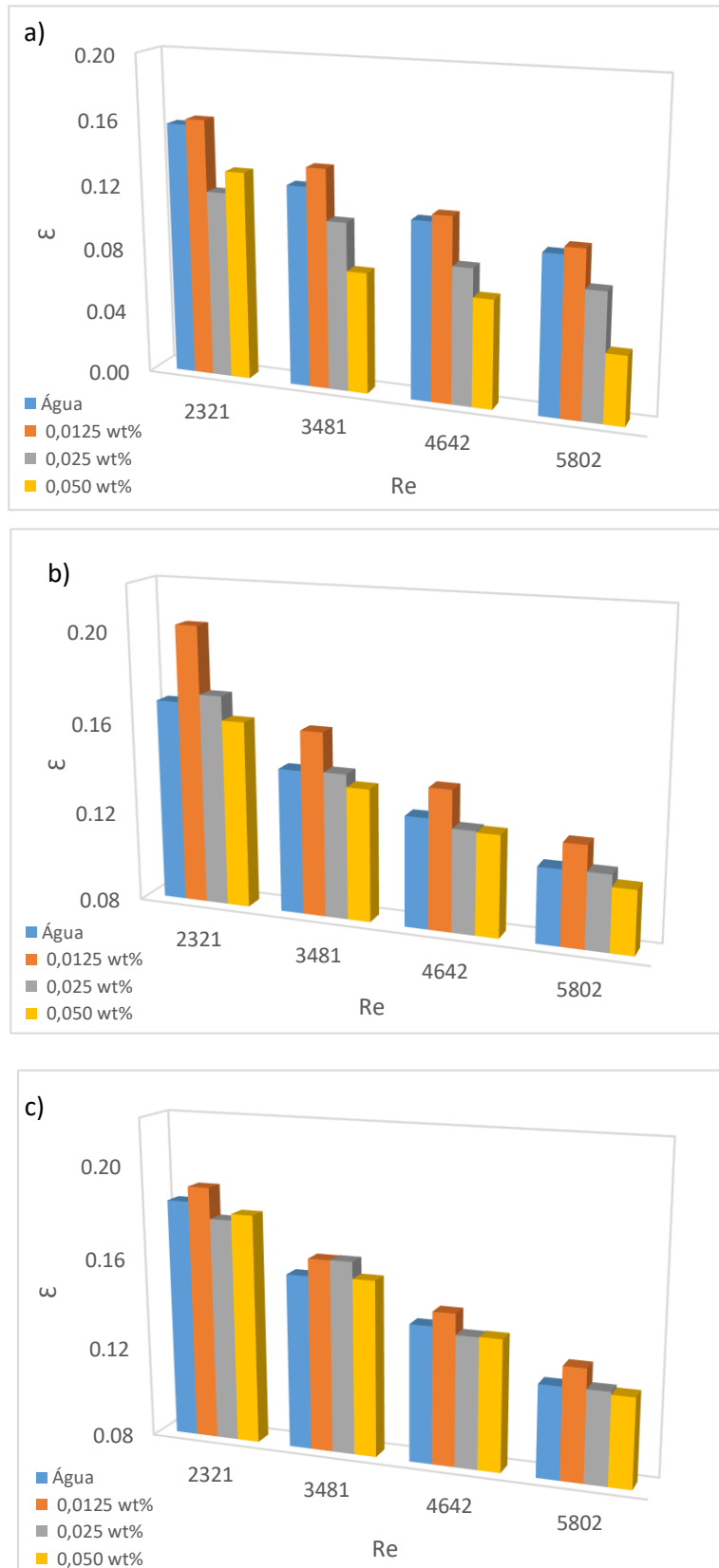


Fonte: O autor, 2020.

O Gráfico 16 apresenta os resultados experimentais da Efetividade no STHE para as temperaturas de 40°C em (a) 50°C em (b) e 60°C em (c), nele pode ser visto que o nanofluido 0,0125wt% apresentou melhor desempenho em comparação com as outras concentrações e o fluido base para todas as temperaturas analisadas. Com um aumento de 4,6%; 10,0% e 7,2% em (a), (b) e (c) respectivamente, com maior desempenho encontrado para a temperatura de 50°C em (b).

Assim como ocorreu no trocador de calor tubo duplo, as grandezas $[Re; T]$ são inversamente proporcionais e $[\epsilon; T]$ são diretamente proporcionais. O erro padrão para todas as temperaturas ficaram abaixo de 1%. O nanofluido 0,025wt% em (a) apresentou o menor erro, no valor de 0,8% (BAHIRAEI et al., 2019a; BAHIRAEI et al., 2019b e ESFAHANI e LANGURI, 2017).

Gráfico 16 - Comparativo da Efetividade de transferência de calor dos nanofluidos GNP/Água no STHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.



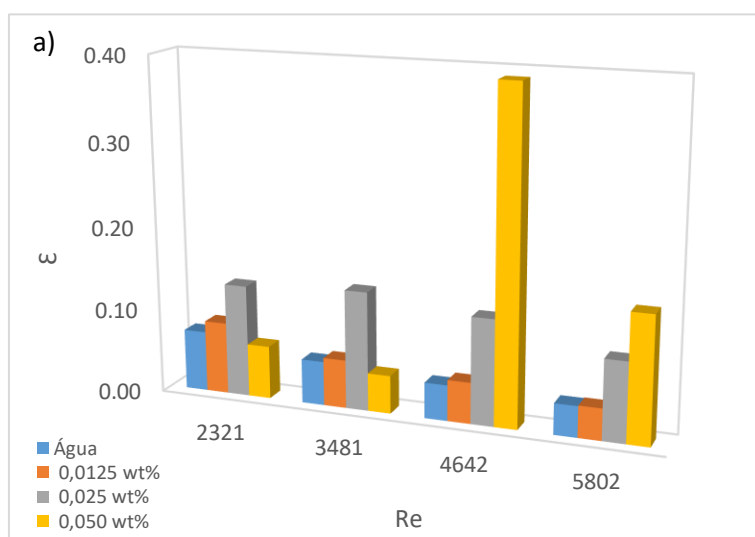
Fonte: O autor, 2020.

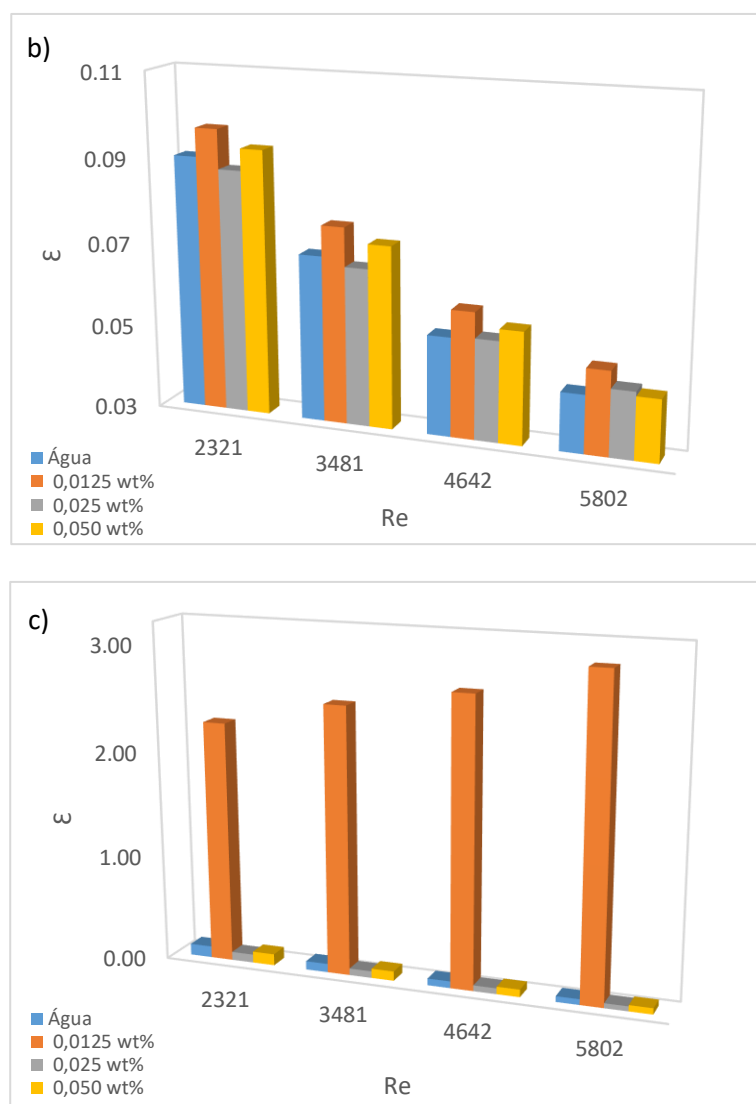
A efetividade experimental no PHE é apresentada no Gráfico 17, com temperatura em 40°C, 50°C e 60°C em (a), (b) e (c) respectivamente. Em 17(a) podemos perceber que o nanofluido 0,025wt% apresentou melhor desempenho em comparação com os outros nanofluido e a água, com aumento de 125% em relação ao fluido base, com erro padrão de 1,01%. Nesta temperatura também apresentou o erro de *outlier*.

O melhor desempenho de efetividade foi para a temperatura de 50°C em 17(b), sem nenhum comportamento inesperado dos nanofluidos. O nanofluido 0,0125wt% apresentou um desempenho de 25% melhor em comparação com o desempenho da água. O menor erro padrão encontrado foi para o nanofluido de 0,025wt% de 0,91%.

Em 17(c) são apresentados os resultados para a temperatura de 60°C no trocador de calor de placas planas, onde percebe-se um comportamento inesperado no nanofluido de 0,0125% com efetividade acima de 1, resultado fora do padrão, já que as efetividades nos trocadores devem apresentar valores entre $[0 < \epsilon < 1]$. A concentração de 0,050wt% apresentou um aumento no desempenho de 20% em comparação a água e o menor erro foi visto em 0,025wt% com valores de 0,06% (NGUYVEN et al., 2020; KUMAR et al., 2016; TIWARI et al., 2013; MARÉ et al., 2011).

Gráfico 17 - Comparativo da Efetividade de transferência de calor dos nanofluidos GNP/Água no PHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.





Fonte: O autor, 2020.

6.2.4 Comportamento do Índice de desempenho nos trocadores de calor - η

A Eficiência do trocador de calor tubo duplo utilizando os nanofluidos a base de Grafeno é apresentada no Gráfico 18, e seus cálculos foram realizados através da equação 31, apresentada no capítulo 5. Nela podemos perceber que quanto maior a temperatura em (b) para 50°C e em (c) para 60°C maior o seu índice de desempenho, já o Re é inversamente proporcional ao índice, onde quanto maior seu Re menor sua eficácia. Este desempenho não está de acordo com os encontrados na literatura, pois como pode ser visto na pesquisa de Bahiraei et al. (2019b) onde ocorre o contrário, quanto maior a concentração em peso do nanofluido e Número de Reynolds maior a sua eficiência. No entanto, pode-se enfatizar que o

tamanho e a área do trocador de calor pode ter influenciado em uma maior queda de pressão, uma vez que a seção de fluxo é pequena e com a adição de nanofluidos, o atrito e a pressão para sustentar o fluxo do fluido foram maiores, causando essa diminuição no índice de desempenho.

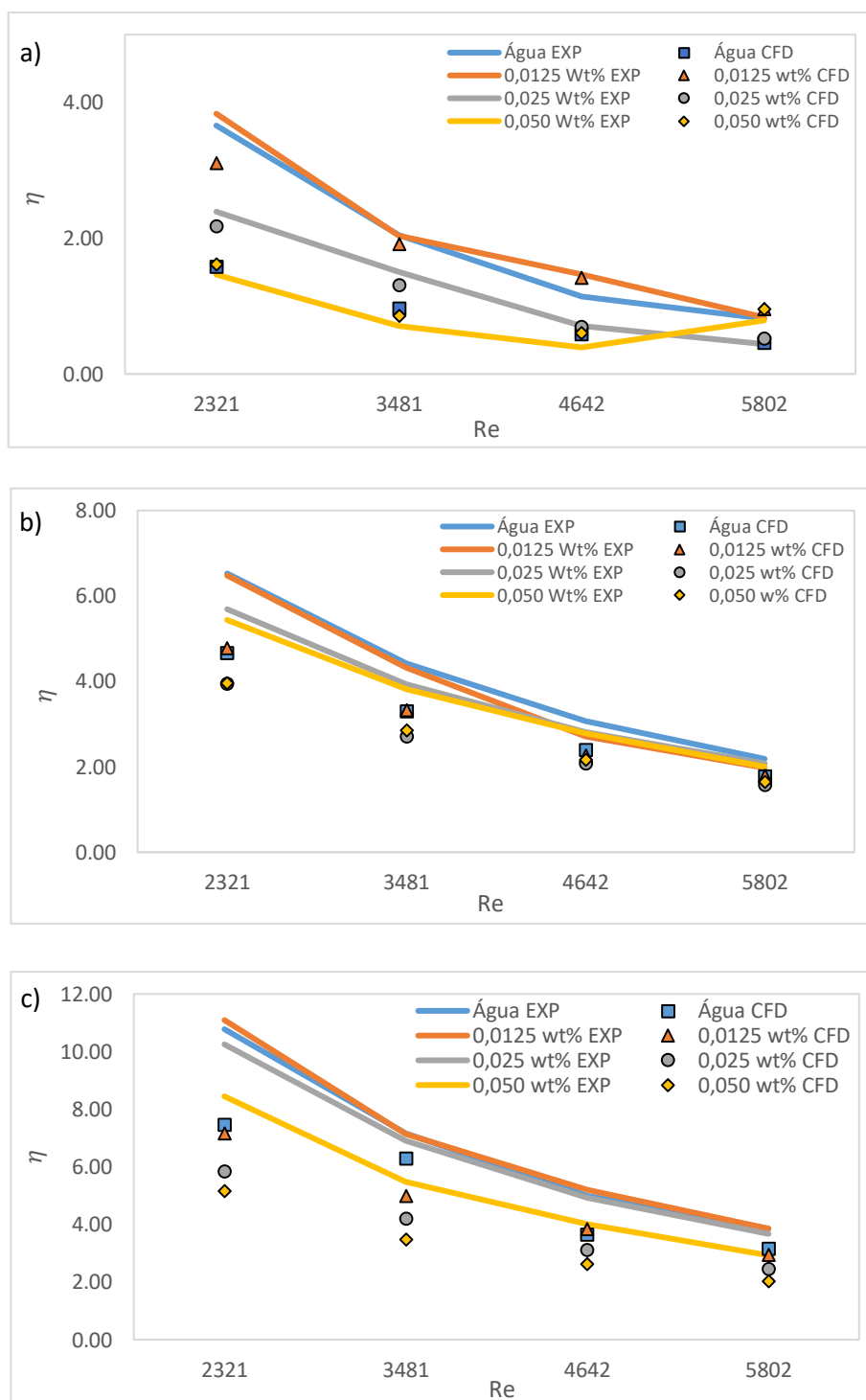
Para a temperatura de 40°C em 18(a) o nanofluido 0,025wt% Exp e CFD apresentou melhor eficiência em comparação com o fluido base, de 2,46% para o resultado experimental e de 106,5% para o CFD. A concentração de nanofluido 0,050wt% Exp e CFD apresentaram o menor erro relativo de 0,2%.

Em 50°C gráfico 18(b) para o resultado experimental a água pura obteve melhor desempenho em comparação aos nanofluidos de 10,60%; 5,28% e 9,5% para 0,0125wt% Exp; 0,025wt% Exp e 0,050wt% Exp, respectivamente. Este comportamento também pode ser visto nos resultados simulados, onde a água obteve melhor eficiência de 0,50%; 12,73% e 7,87% em relação aos fluidos 0,0125wt% CFD; 0,025wt% CFD e 0,050wt% CFD, respectivamente. O menor erro padrão encontrado foi para o nanofluido 0,050wt% CFD de 0,5%.

Já para 18(c) que apresenta os resultados para a temperatura de 60°C e nele podemos perceber que a concentração de 0,0125wt% Exp obteve a melhor eficiência, com aumento de 2,5% em relação ao fluido base. O menor erro padrão foi encontrado no nanofluido 0,050wt% Exp. e no CFD de 1,1% e 0,6%.

Deve-se notar que os maiores valores do índice de desempenho foram encontrados para números de Reynolds mais baixos. Isso se deve ao aumento na queda de pressão com o aumento do número de Reynolds, que está relacionado ao aumento na taxa de fluxo. No entanto, para as concentrações de 0,025wt% CFD e 0,05wt% CFD os valores foram inferior aos índices de desempenho obtidos para água, devido à maior taxa de queda de pressão, em comparação com o crescimento da taxa de troca de calor alcançada pela introdução dos nanofluidos.

Gráfico 18 - Comparativo da Eficiência dos nanofluidos GNP/Água no DTHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.



Fonte: O autor, 2020.

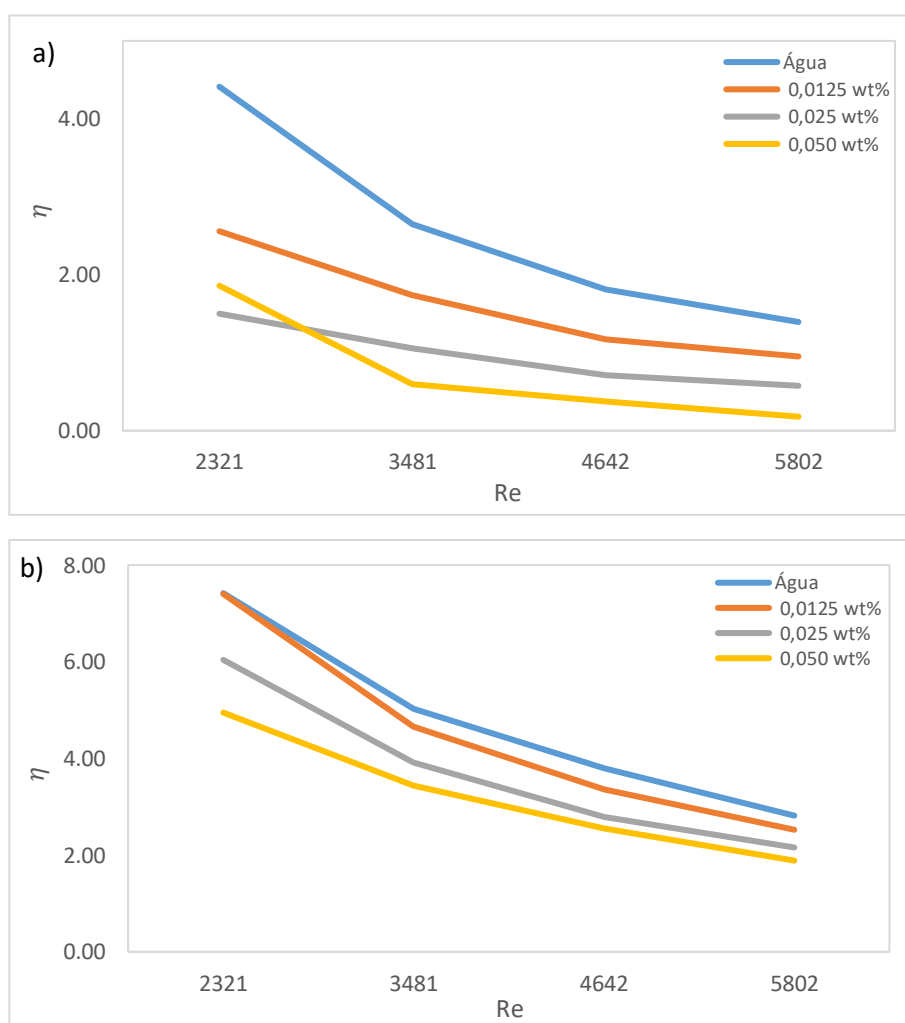
O gráfico 19 apresenta os resultados experimentais do índice de desempenho no trocador de calor casco e tubo e nele percebemos também que, quanto maior for a temperatura maior será a eficiência, porém, quando se aumentou o Re ocorreu diminuição da eficiência.

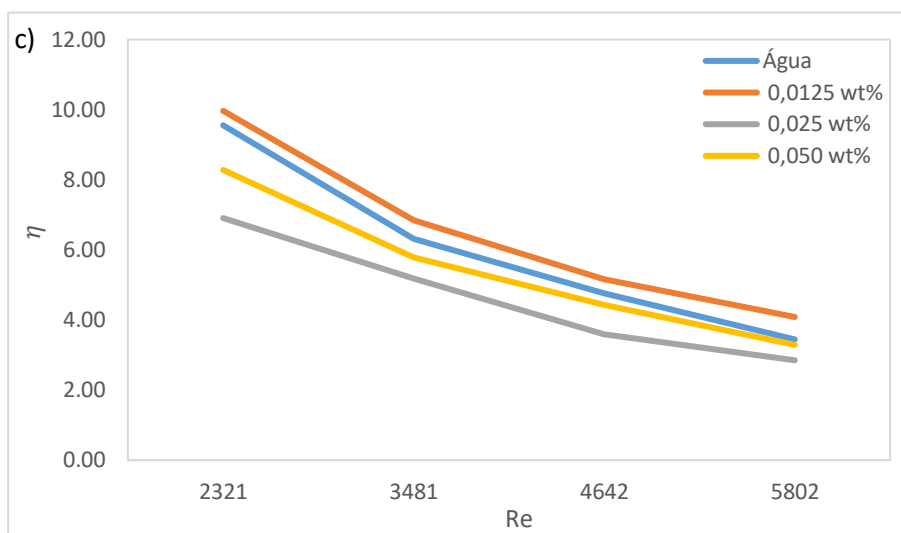
Este resultado contraria o comportamento na literatura, pois ao se usar nanofluido deveria ocorrer o aumento da eficiência ao se aumentar o Re, este fenômeno do aumento pode ser relatado nas pesquisas de Bahiraei et al. (2019b) e Abbasian e Amani (2012). Isso implica dizer que para este estudo o uso de nanofluido não foi viável em termos de economia de energia e variação de fluxo (números de Reynolds) em regime turbulento.

A água apresentou o melhor desempenho para a temperatura de 40°C em 19(a) e para 50°C em 19(b), com desempenho de 46,31%; 139,6%; 672,2% em (a), 12%; 30,5% e 49,2% em (b) para os nanofluidos 0,0125wt%; 0,025wt% e 0,050wt%, respectivamente.

O menor erro encontrado em 40°C foi para o nanofluido 0,025wt% de 0,2% e para a temperatura de 50°C foi para a concentração de 0,050wt% de 0,66%. Já para a temperatura de 60°C em (c) o nanofluido 0,0125wt% apresentou melhor eficiência em relação ao fluido base, com aumento de 18,60%. Nesta temperatura o erro relativo de todos os fluidos ficou abaixo de 1%.

Gráfico 19 - Comparativo da Eficiência dos nanofluidos GNP/Água no STHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.





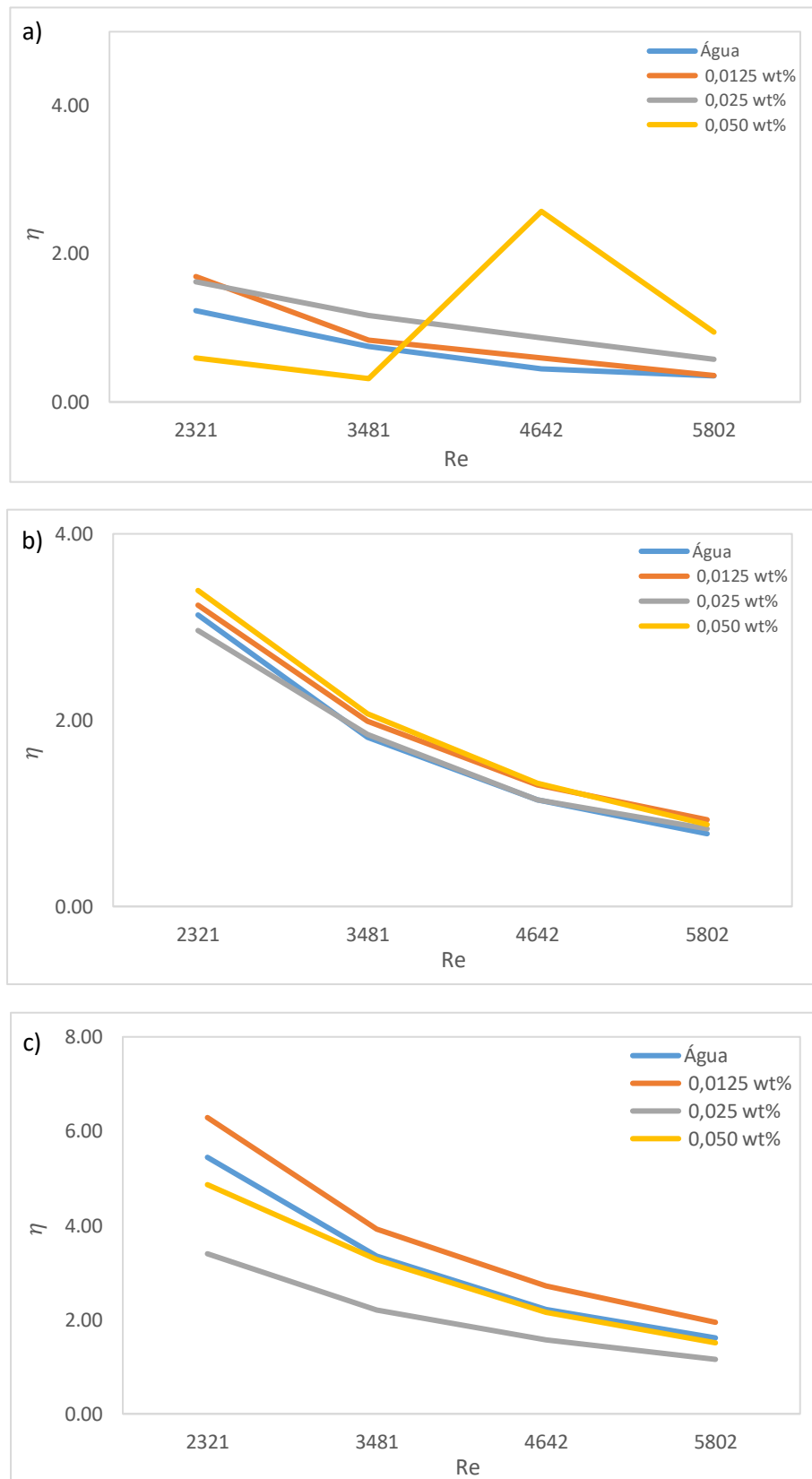
Fonte: O autor, 2020.

A eficiência dos resultados experimentais no trocador de placas planas é apresentada no gráfico 20, onde percebemos que ocorreu também o erro de *outlier* para o nanofluido 0,050wt%, na temperatura de 40°C em (a). Assim como foram analisados nos outros trocadores também ocorreu no trocador de placas, quanto maior a temperatura maior o seu índice de desempenho e quanto maior o Re menor a sua eficiência. O experimento, no entanto, conseguiu provar conclusivamente a eficiência dos nanofluidos, principalmente para a temperatura de 50°C, no qual apresentou melhor o comportamento dos fluidos, este fenômeno também foi relatado por Kumar et al. (2017), Kwon et al. (2011) e Pantzali et al. (2009a).

O nanofluido 0,025wt% apresentou melhor eficiência em relação a água de 65,71% e 61,11% em relação a concentração de 0,0125wt% para a temperatura de 40°C. O menor erro relativo também foi encontrado na concentração de 0,025wt% de 0,2%.

Em 20(b) o nanofluido 0,050wt% para a temperatura de 50°C apresentou melhor desempenho de 12,82% em relação ao fluido base, com erro 1,47%. E o menor erro padrão para esta temperatura foi encontrado para o nanofluido 0,025wt% de 0,97%. Os resultados para a temperatura em 60°C podem ser visto em 19(c), onde a melhor eficiência foi encontrada no nanofluido 0,0125wt% de 20,5% em relação a água, com erro padrão abaixo de 1% para todos os fluidos, e seu menor erro foi na concentração de 0,025wt% de 0,5%.

Gráfico 20 - Comparativo da Eficiência dos nanofluidos GNP/Água no PHE em diferentes concentrações: a) 40°C, b) 50°C e c) 60°C.



Fonte: O autor, 2020.

6.3 CONSIDERAÇÕES CRÍTICAS

Os nanofluidos a base de Grafeno obtiveram um bom desempenho em comparação com a água, ocorrendo um aumento da troca térmica como foi visto no coeficiente Global de transferência de calor – U . Em resumo, as nanopartículas presente nos fluidos contribuíram para uma maior condutividade térmica, mesmo que em média geral essa melhora tenha sido de apenas 15% em comparação com a água para todos os trocadores de calor.

O coeficiente global de transferência de calor subindo significa uma área de troca de calor menor, podendo ser usado outro tipo de trocador de calor, visando uma eficácia maior. Os fluidos convencionais como ar e água, apresentam valores relativamente baixos de condutividade térmica que limita as taxas de transferência de calor e com a utilização e adição do Grafeno, que apresenta uma condutividade térmica alta, foi possível verificar a melhoria na taxa de transferência de calor (MAGHRABIE et al., 2020).

Com isso, percebemos que o numero de Nusselt e o coeficiente de transferência de calor aumentou devido á maior condutividade térmica dos nanofluidos em comparação com o fluido base a água, contribuindo para a melhoria da transferência de calor. Isso se deve porque a condutividade térmica da água é mais baixa que a dos nanofluidos e quanto maior a concentração de partícula sólida presente nos fluidos, maior é seu Nu .

O erro *outleir* apresentado na temperatura 40°C para o nanofluido 0,050wt% em todos os trocadores de calor, ocorreu por causa de um erro de medição através dos termopares na coleta de dados na bancada de testes, no qual, a temperatura de entrada e saída do fluido frio não apresentou mudança no ΔT quando ocorreu o aumento da vazão. Através da simulação de aumento de ΔT tanto para os dados experimentais quanto os via CFD apresentados no gráfico 3(b) percebemos o comportamento coerente do coeficiente de transferência de calor para o nanofluido 0,050wt%. Diante dos problemas ocasionados pela pandemia causada pelo Covid-19, não é possível repetir os padrões no processo de fabricação e teste do nanofluido, não garantindo as mesmas propriedades termofísicas e seu princípio de isonomia. Os menores erros padrão encontrados foi no trocador de calor placas planas com valores abaixo de 1%.

Se há um aumento na quantidade de nanopartículas no fluido, maior será o ser fator de atrito e a viscosidade dos nanofluidos, causando uma maior queda de pressão, consequentemente uma maior potência de bombeamento. Com o aumento na taxa de transferência de calor ocorreu o aumento na eficácia no trocador.

O Nanofluido com concentração de 0,0125wt% apresentou em resumo para todas as análises os melhores desempenhos, sendo indicado para utilização em trocadores substituindo a água utilizadas pelas indústrias. Percebemos que quanto maior o valor em peso de nanopartículas ocorria uma diminuição na eficácia do fluido, isso ocorre porque o nanofluido 0,0125wt% apresenta menor viscosidade do que as concentrações 0,025wt% e 0,050wt%, consequentemente menor queda de pressão, e menor potência de bombeamento.

O trocador de calor de placas planas apresentou melhor desempenho em comparação que os outros trocadores, pois apesar de todos os trocadores de calor apresentar o mesmo tamanho de área média de transferência de calor de 0,02m², o de placa tem uma combinação dos ângulos, com placa corrugada do tipo espinha de peixe, que proporciona uma melhor transferência de calor com baixa perda de carga, com redução de espaço físico ideal para uso em diferentes indústrias.

A Tabela 11 apresenta os resultados de todas as análises realizadas com relação com as temperaturas, demonstrando o quanto em valor percentual (%) os nanofluidos obtiveram resultados melhores que a água.

Tabela 11- Resultados de todas as análises em relação às temperaturas.

Análises	Temperatura (°C)	Percentual (%)	Concentração (wt%)	Erro Padrão (%)	Trocadores de calor
Nu	40	0,025 Exp e			
		2,00	CFD	0,64	DTHE
		6,10	0,0125	2,91	STHE
		154,47	0,025	1,63	PHE
	50	6,66	0,025 Exp	1,43	DTHE
		3,44	0,0125 CFD	1,36	DTHE
		9,11	0,0125	1,54	STHE
		1607	0,0125	0,34	PHE
	60	4,89	0,025 Exp	1,59	DTHE
		6,1	0,0125	1,88	STHE
		18,58	0,0125	0,51	PHE
U	40	80,82	0,05 EXP	109	DTHE
		60,66	0,05 CFD	136	DTHE
		22,07	0,0125	2,00	STHE
		88,00	0,025	2,54	PHE

	50	4,91	0,025 EXP	1,95	DTHE
		8,15	0,0125	1,74	STHE
		3,57	0,0125	0,4	PHE
	60	5,64	0,025 EXP	2,2	DTHE
		2,23	Água	1,91	STHE
		7,14	0,0125,	0,5	PHE
ε	40	1,00	0,025 EXP	1,8	DTHE
		100,00	0,025 CFD	1,1	DTHE
		4,60	0,0125	1,2	STHE
		125,00	0,025	1,0	PHE
	50	8,340	0,025 EXP	1,8	DTHE
		10,00	0,0125	1,6	STHE
		25,00	0,0125	1,0	PHE
	60	7,14	0,025 EXP	2,2	DTHE
		7,2	0,0125	1,3	STHE
		20	0,05	1,0	PHE
η	40	2,46	0,025 Exp	0,65	DTHE
		106,50	0,025 CFD	0,50	DTHE
		46,31	Água	0,66	STHE
		65,71	0,025		PHE
	50	10,6	Água	0,9	DTHE
		12,73	0,025 CFD	1,5	DTHE
		49,02	Água	1	STHE
		12,82	0,05	1,47	PHE
	60	2,5	0,0125 EXP	1,5	DTHE
		18,6	0,0125	1,3	STHE
		20,5	0,0125	1	PHE

Fonte: O autor, 2020.

7 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as considerações finais dos resultados mais relevantes desta dissertação, incluindo sugestões para trabalhos futuros relacionados aos trocadores de calor no uso de nanofluido com nanopartículas de Grafeno como fluido de trabalho.

A partir do estudo no processo de aplicação de nanofluido a base de Grafeno em trocadores de calor é possível concluir que os parâmetros do Número de Nusselt, do Coeficiente Global de Transferência de Calor, do Fator de Atrito, da Perda de Carga e da Potência de Bombeamento influenciam nas características finais da Eficácia e Índice de desempenho dos trocadores de calor, por isso, é de extrema importância o estudo e entendimento dessas variáveis para produção de nanofluido. Diante dos resultados obtidos é possível concluir que:

- A simulação computacional em via CFD apresentou bons resultados com boa concordância com os dados experimentais que mostram qualidade no modelo.
- A introdução do nanofluido no trocador de calor tubo duplo CFD melhorou o ganho de temperatura em 8°C, ou seja, aproximadamente 28% em comparação com o nanofluido GNP para o fluido de base, a água;
- Foi observado conforme as análises dos resultados que quanto maior o Re e a concentração de nanopartícula de Grafeno no nanofluido, maior será o Nu, isto ocorre devido o aumento na condutividade térmica do fluido com a adição das nanopartículas. O trocador de calor placas planas apresentou o maior Nu experimental e o menor erro em relação aos outros trocadores de 18,58%, para a concentração de 0,0125wt% na temperatura de 60°C e 0,25% para o nanofluido 0,050wt% na temperatura de 50°C, respectivamente, em comparação ao fluido base.
- Assim como ocorreu em Nu também pode ser visto no U, quanto maior o [$> \text{Re; T; wt\%}$] maior será o U. O Trocador de calor Casco e Tubo obteve o maior U em relação aos outros trocadores com 22,07% e erros padrão de 2% no nanofluido de 0,0125wt% para a temperatura de 40°C, em comparação com a água. O menor erro padrão foi encontrado no trocador de calor de placas planas para a concentração de 0,050wt% de 0,33%.
- O fator de atrito calculado através da correlação segundo Baisius (1907) apresentou o menor desvio padrão médio de 3,88%, indicando que a

configuração experimental utilizada nesta pesquisa é confiável. O maior fator de atrito foi encontrado para o nanofluido 0,050wt% de 4,47% em relação ao fluido base. Quanto maior a concentração de Grafeno no fluido maior é o seu fator de atrito, causando uma maior queda de pressão.

- A perda de carga aumenta enquanto o fator de atrito diminui à medida que a vazão (número de Reynolds) aumenta, quanto maior a concentração em peso do nanofluido maior é sua perda em comparação com a água. O nanofluido 0,050wt% apresentou a menor perda de carga em relação ao fluido base de 2,23%. O nanofluido se comportou mais como um fluido lubrificante, do que com uma mistura de líquido-sólido, portanto, o consumo de energia necessário no bombeamento de nanofluidos é igual ou, em alguns casos, inferior quando comparado com a água.
- A água apresentou a maior potência de bombeamento em relação ao nanofluido 0,050wt% de 2,23% a mais. Observou-se que ocorreu um aumento exponencial na curva de potência, devido ao aumento do Re que levou ao aumento na potência de bombeamento.
- O melhor desempenho econômico medido através da efetividade de transferência de calor foi apresentado no PHE em comparação aos outros trocadores de calor. O nanofluido 0,0125wt% para a temperatura de 50°C apresentou 25% a mais na efetividade em relação a água para dados experimentais. Para 40°C a concentração de 0,025% CFD no DTHE apresentou melhor efetividade com aumento de 100% em comparação com as outras simulações e a água. O índice de desempenho de todas as amostras para todos os números de Reynolds é menor 1, indicando a eficácia do nanofluido GNP/Água.
- O trocador de Placas planas apresentou o melhor índice de desempenho na utilização dos nanofluidos em relação aos outros trocadores de calor, com 65,71% melhor desempenho para o nanofluido 0,025wt% em 40°C em relação ao fluido base. Contudo o uso dos nanofluido GNP/Água nos trocadores de calor em um contexto geral, demonstrou ser mais útil em aumentar a trocar térmica entre os fluidos, do que com relação do uso apenas da água.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuro sugere-se:

- Utilizar outros nanofluidos a base de Grafeno, como o Óxido de Grafeno ou o Grafeno Reduzido e comparar com este estudo.
- Padronizar o método de fabricação dos nanofluidos, pois assim teria como realizar uma boa análise e comparar os resultados com o aumento das concentrações.
- Aumentar as concentrações de Grafeno utilizada nos nanofluidos de GNP/Água, pois com concentrações maiores levaria a obter um maior coeficiente global de transferência de calor, e assim uma maior eficiência em comparação com a água.
- Verificar a deposição do Grafeno nos trocadores de calor e seus custos, relacionando aos impactos ambientais causados pelo seu descarta.
- Utilizar um circuito de fluido frio fechado (em série) com um controlador de temperatura, assim poderia obter resultados mais satisfatórios.
- Realizar simulação via CFD do Trocador de Casco e Tubo e Placas planas e comparar com os resultados experimentais desta pesquisa.
- Aumentar a variação de temperatura, realizando estudo com temperatura acima de 60°C e comparar seus resultados.
- E realizar uma análise do consumo de energia na bomba, utilizada na análise experimental.

REFERÊNCIAS

- ABBASIAN, A. A.A.; AMANI, J. Experimental study on the effect of TiO_2 -water nanofluid on heat transfer and pressure drop. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 42, p. 107–115, 2012.
- AGROMAYOR, R.; CABALEIRO, D.; PARDINAS, A. A.; VALLEJO, J. P.; SEARA, J. F.; LUGO, L. Heat transfer performance of functionalized grapheme nanoplatelet aqueous nanofluids. **Materials**, v. 9, p. 455- 473, 2016.
- AHN, H. S.; KIM, K. M.; LIM, S. T.; LEE, C. H.; HAN, S. W.; CHOI, H.; KOO, S.; KIM, N.; JERNG, D.; WONGWISES, S. Anti-fouling performance of chevron plate exchanger by the surface modification. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v. 144, p. 118634, 2019.
- AKHAVAN-ZANJANI, H.; SAFFAR-AVVAL, M.; MANSOURKIAEI, M.; AHADI, M.; SHARIF, F. Turbulent convective heat transfer and pressure drop of graphene-water nanofluido flowing inside a horizontal circular tube. **Journal of Dispersion Science and Technology**, p. 37-41, 2014.
- AKYÜREK, E. F.; GELİŞ, K.; ŞAHİN, B.; MANAY, E. Experimental Analysis for Heat Transfer of nanofluid with Wire Coil Turbulators in a Concentric Tube Heat Exchanger. **Results in Physics**, v. 9, p. 376-389, 2018.
- ALAM, S. N.; SHARMA, N.; KUMAR, L. Synthesis of graphene oxide (GO) by modified hummers method and its thermal reduction to obtain reduced graphene oxide (RGO). **Graphene journal**, v. 6, p. 1-18, 2017.
- ALYMOV, G.; VYURKOV, V.; RYZHII, V.; SVINTSOV, D. Abrupt current switching in grapheme bilayer tunnel transistors enableb by van hove singularities. **Scientific Reports**. v. 6, 2016.
- AMIRI, A.; SHANEDEDI, M.; CHEW, B.T.; KAZI, S. N.; SOLANGI, K. H. Toward improved engine performance with crumpled nitrogen-doped graphene based water-ethylene glycol coolant. **Chemical Engineering Journal**, v. 289; p. 583-595, 2016.
- ANDRADE, L.; CARVALHO, J. A. Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 3, p. 554-557, 2001.
- ANGAYARKANNI, S. A.; PHILIP, J. Review on Thermal Properties of Nanofluids: Recent Developments. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 225, p. 146- 176, 2015.

- ANOOP, K.; COX, J.; SADR, R. Thermal evaluation of nanofluids in heat exchangers. **International Communications and Mass Transfer**, v. 49, p. 5-9, 2013.
- ARAÚJO, E. C. C. **Trocadores de calor**. Série Apontamentos, EdUFSCAR: São Carlos, 2002.
- ARSHAD, A.; JABBAL, M.; YAN, Y.; REAY, D.; A Review on Graphene based Nanofluids: Preparation, Characterization and Applications. **Journal of Molecular Liquids**, v 279, p. 444-484, 2019a.
- ARSHAD, W.; ALI, H. M. Effect of channel angle of pin-fin heat transfer performance using water based grapheme nanoplatelets nanofluids. **International Journal of heat and Mass Transfer**, v. 106, p. 465-472, 2017b.
- ARSHAD, W.; ALI, H. M. Graphene nanoplatelets nanofluids and hydrodynamic performance on integral fin heat sink. **International Journal of heat and Mass Transfer**, v. 107, p. 995-1001, 2017a.
- ARSHAD, W.; ALI, M. Effect of channel angle of pin-fin heat sink on heat transfer performance using water based grapheme nanoplatelets nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 106, p. 465-472, 2016a.
- ARSHAD, W.; ALI, M. Graphene nanoplatelets nanofluids thermal and hydrodynamic performance on integral fin heat sink. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 107, p. 995-1001, 2016b.
- ARZANI, H. K.; AMIRI, A.; ARZANI, H. K.; ROZALI, S. B.; KAZI, S. N.; BADARUDIN, A. Toward improved heat transfer performance of annular heat exchangers with water/ethylene glycol-based nanofluids containing grapheme nanoplatelets. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 126, p. 1427-1436, 2016.
- ARZANI, H. K.; AMIRI, A.; KAZI, S. N.; CHEW, B. T.; BADARUDIN, A. Experimental and numerical investigation of thermophysical properties, heat transfer and pressure drop of covalent and noncovalent functionalized grapheme nanoplatelet-based water nanofluids in an annular heat exchanger. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 68, p. 267-275, 2015.
- ASKARI, S.; LOTFI, R.; SEIFKORDI, A.; RASHIDI, A. M.; KOOLIVAND, H. A novel approach for energy and water conservation in wet cooling towers by using MWNTs and nanoporous grapheme nanofluids. **Energy Conversion and Management**, v. 109, p. 10-18, 2016.

- AHMED, F.; RODRIGUES, D. F. Investigation of acute effects of graphene oxide on wastewater microbial community: A case study. **J. Hazard. Mater.** v. 33, p. 256–257, 2013.
- BAHIRAEI, M.; MONAVARI, A. Thermohydraulic characteristics of a micro plate heat exchanger operated with nanofluido considerin different nanoparticle shapes. **Applied Thermal Engineering**, v. 179, p. 115-152, 2020.
- BAHIRAEI, M.; MAZAHARI, N.; RIZEHVANDI, A.; Application of a hybrid nanofluid containing Graphene nanoplaetet-platinum composite power in a triple-tube heat exchanger equipped with inserted ribs. **Applied Thermal Engineering**, v. 149, p. 588-601, 2019b.
- BAHIRAEI, M.; SALMI, H. K.; SAFAEI, M. R. Effect of employing a new biological nanofluid containing functionalized grapheme nanoplatelets on thermal and hydraulic characteristics of a spiral heat exchanger. **Energy Conversionand Management**, v. 180, p. 72-82, 2019a.
- BARBOSA, C. R. F.; SOUSA, E. H. V.; FONTES, F. A. O.; ALMEIDA, I. M. G.; AZEVEDO, V. F. Caracterização de nanofluidos para utilização em compressores de refrigeração: determinação da viscosidade dinâmica, condutividade térmica e estabilidade. **Holos**, v. 08, p. 36-46, 2016.
- BENITO, Y. R. Aplicação de nanofluidos em sistemas secundários de refrigeração. 2012. 173f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC- RIO), Rio de Janeiro, 2012.
- BERGMAN, T. L. Effect of reduced specific heats of nanofluids on single phase, laminar forced convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, p. 1240-1244, 2009.
- BLASUIS, H. The boundary layers in fluids with little friction. **National Advisory committee for aeronautics: Technical memorandum 1256**, p.1-58, 1907.
- BEZERRA, L. A. C. Análise do desempenho térmico de sistema construtivo de concreto com EPS como agregado graúdo. 2003. 64f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, 2003.
- CAMPOS, E. R. V. Modelagem do uso de nanofluidos no sistema de arrefecimento de motores a combustão interna. 2010. 95f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (Puc-Rio), Rio de Janeiro, 2010.
- ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.

- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicações**. 4^a ed, McGraw Hill: Porto Alegre, 2012.
- CHEN, D.; TANG, L.; LI, J. Graphene-based materials in electrochemistry. **Chemical Society Reviews**, 2010.
- CHOI, S. U. S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticle. **ASME FED**, v. 231, p. 99, 1995.
- COLEBROOK, C.F. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition between the smooth and rough pipe laws. **Journal of the Institution of Civil Engineers**, v. 11, p. 133-161, 1939.
- COSTA, J. A. P. da; MICHALEWICZ, J. S.; MENEZES, F. D.; LIMA, M. V. F.; OCHOA, A. A. V.; SILVA, J. V. C.; Simulação computacional de trocadores de calor casco e tubo utilizando nanofluido como fluido de trabalho. **VI Congresso Argentino de Ingeniería Mecânica**, Tucumán, 2018.
- DUANGTHONGSUK, W.; WONGWISES, S. Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v 52, p. 2059-2067, 2009.
- DUCH, M. C.; BUDINGER, G. R. S.; LIANG, Y. T.; SOBERANES, S.; URICH, D.; CHIARELLA, S. E.; CAMPOCHIARO, L. A.; GONZALEZ, A.; CHANDEL, N. S.; HERSAM, M. C.; MUTLU, G. M. Minimizing oxidation and stable nanoscale dispersion improves the biocompatibility of graphene in the lung. **Nano Lett.** v 11, p. 5201, 2011.
- EDA, G.; FANCHINI, G.; CHHOWALLA, MANISH. Large-area ultrathin films of reduced grapheme oxide as a transparent and flexible electronic material. **Nature Nanotechnology**, v. 3, p. 270-274, 2008.
- EL-KADY, M. F.; KANER, R. B. Scalable fabrication of high-power grapheme micro-supercapacitors for flexible and on-chip energy storage, **Journal Nature Communications**, p.1475, 2013.
- ESFAHANI, M. R.; LANGURI, E. M. Exergy analysis of a shell-and-tube heat exchanger using graphene oxide nanofluids. **International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 83, p. 100-106, 2017.
- ETTEFAGHI, E.; GHOBADIAN, B.; RASHIDI, A.; NAJAFI, G.; KHOSHTAGHAZA, M. H.; POURHASHEM, S. Preparation and investigation of the heat transfer properties of a novel nanofluid based on grapheme quantum dots. **Energy Conversion and Management**, v. 153, p. 215-223, 2017.

- FARAJOLLAHI, B.; ETEMAD, S. GH.; HOJJAT, M. Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, p. 12-17, 2010.
- FARD, M. H.; TALAIE, M. R.; NASR, S. Numerical and experimental investigation of heat transfer of ZnO/water nanofluido in the concentric tube and plate heat exchangers. **Thermal Science**, v. 15, p. 183-194, 2011.
- GAO, B.; BI, Q.; NIE, Z.; WU, J. Experimental study of effects of baffle helix angle on shell-side performance of shell-and-tube heat exchangers with discontinuous helical baffles. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 68, p. 48-57, 2015.
- GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. **Nature Materials**, v.6, P. 183-191, 2007.
- GHOZATLOO, A.; NIASAR-SHARIATY, 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**, v. 42, p. 89-94, 2013.
- GHOZATLOO, A.; RASHIDI, A.; SHARIATY-NIASSAR, M. Convective heat transfer enhancement of grapheme nanofluids in shell and tube heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 53, p. 136-141, 2014.
- GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in the turbulent flow in pipes and channels. **NASA STI/recon technical report A**, v. 41, n. 1, p. 8-16, 1975.
- GOODARZI, M.; KHERBEET, A. SH.; AFRAND, M.; SADEGHINEZHAD, E.; MEHRALI, M.; ZAHEDI, P.; WONGWISES, S.; DAHARI, M. Investigation of heat transfer performance and friction factor of a counter-flow double-pipe heat exchanger using nitrogen-doped, graphene-based nanofluids. **International communications heat and mass transfer**, v. 76, p. 16-23, 2016.
- HAJJAR, Z.; RASHIDI, A. M.; GHUZATLOO, A. Enhanced thermal conductivities of grapheme oxide nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 57, p. 128-131, 2014.
- HAN, D.; HE, W. F.; ASIF, F. Z. Experimental study of heat transfer enhancement using nanofluid in double tube heat exchanger. **Energy Procedida**, v. 142, p. 2547-2553, 2017.
- HAQUE, A. K. M. M.; KIM, S.; KIM, J.; NOH, J.; HUH, S.; CHOI, B.; CHUNG, H.; JEONG, H. Surface modification of Graphene Nanoparticles by Acid Treatment and Grinding Process. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 18, p. 645-650, 2018.
- HERNANDEZ, Y.; NICOLASI, V.; LOTYA, M.; BLIGHE, F. M.; SUN, Z.; SUKANTA, D.; MCGOVERN, I. T.; HOLLAND, B.; BYRNE, M.; YURII, K.; GUN'KO; BOLAND, J. J.;

- NIRAJ, P.; DUESBERG, G.; KRISHNAMURTHY, S.; GOODHUE, R.; HUTCHISON, J.; SCARDACI, V.; FERRARI, A. C.; COLEMAN, J. N. High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite. **Nature Nanotechnology**, v. 3, p. 563-568, 2008.
- HOSSEINI, M.; ABDELRAZEK, A. H.; SADRI, R.; MALLAH, A. R.; KAZI, S. N.; CHEW, B. T.; ROZALI, S.; YUSOFF, N. Numerical study of turbulent heat transfer of nanofluids containing ecofriendly treated carbon nanotubes through a concentric annular heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 127, p. 403-412, 2018.
- HUANG, DAN; WU, ZAN; SUNDEN, BENGT. Pressure drop convective heat transfer of Al_2O_3 / water and MWCNT / water nanofluids in a chevron plate heat exchanger. **International journal of heat and mass transfer**, v. 80, p. 620-626, 2015.
- HUMINIC, G.; HUMINIC, A. Application of nanofluids in heat exchangers: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 5625-5638, 2012.
- HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, JR. R. E. Preparation of Graphitic Oxide. **National Lead Company**, p. 1339, 1957.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6ªed, LTC, 2008.
- IZADKHAH, M. S.; ERFRA-MIYA, H.; AREF, A. H.; ABDI, A.; CFD simulation of heat transfer in nanofluids containing Graphene. **I National Conference of New Technologies in Chemical and Petrochemical**, Tehran, 2014.
- KASAEIAN, A.; DANESHAZARIAN, R.; MAHIAN, O.; KOLSI, L.; CHAMKHA, A. J.; WONGWISES, S.; POP, IOAN. Nanofluid flow and heat transfer in porous media: A review of the latest developments. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 107, p. 778-791, 2017.
- KHAIRUL, M.A., ALIM, M.A.; MAHBUBUL, I.M.; SAIDUR, R.; HEPBASLI, A.; HOSSAIN, A. Heat transfer performance and exergy analyses of a corrugated plate heat exchanger using metal oxide nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 50, p. 8-14, 2014.
- KHAN, T. S.; KHAN, M. S.; CHYU, MING-C.; AYUB, Z.H. Experimental investigation of single phase convective heat transfer coefficient in a corrugated plate heat exchanger for multiple plate configurations. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, p. 1058-1065, 2010.
- KHANAFER, K.; VAFAI, KAMBIZ. A critical synthesis of thermophysical of nanofluids. **International Journal of Heat Mass Transfer**, v. 54, p. 4410-4428, 2011.

- KHEDKAR, R. S.; SONAWANE, S. S.; WASEWAR, K. L.; Heat transfer study on concentric tube heat exchanger using TiO_2 -water-based nanofluid. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 57, p. 163-169, 2014.
- KIM, S.; SONG, H.; YU, K.; TSERENGOMBO, B.; CHOI, SOON-HO; CHUNG, H.; KIM, J.; JEONG, H.; Comparison of CFD simulations to experiment for heat transfer characteristics with aqueous Al_2O_3 nanofluid in heat exchanger tube. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 95, p. 123-131, 2018.
- KOSYNKIN, D. V.; HIGGINBOTHAM, L. A.; SINITSKII, A.; LOMEDA, J. R.; DIMIEV, A.; PRICE, B. K.; TOUR, J. M. Longitudinal unzipping of carbon nanotubes to form graphene nanoribbons. **Nature**, v. 458, p. 872-876, 2009.
- KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. **Princípios de Transferência de calor**. 7ª ed, Cengage Learning: Rio de Janeiro, 2011.
- KÜCÜK, H.; ÜNVERDI, M.; YILMAZ, M. S. Experimental investigation of shell side heat transfer and pressure drop in a mini-channel shell and tube heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass transfer**, v. 143, p. 118493, 2019.
- KUMAR, R. N. T.; BHRAMARA, P.; SUNDAR, S. L.; SINGH, M. K.; SOUSA, A. C. M. Heat transfer, friction factor and effectiveness of Fe_3O_4 nanofluid flow in an inner tube of double pipe U-bend heat exchanger with and without longitudinal strip inserts. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 85, p. 331-343, 2017.
- KUMAR, V.; TIWARI, A. K.; GHOSH, S. K. Effect of variable spacing on performance of plate heat exchanger using nanofluids. **Energy**, v. 114, p. 1107-1119, 2016.
- KUMAR, VIKAS; TIWARI, ARUN KUMAR; GHOSH, SUBRATA KUMAR. Application of nanofluids in plate heat exchanger: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 150, p. 1017-1036, 2015.
- KWON, Y. H.; KIM, D.; LI, C. G.; LEE, J. K.; HONG, D. S.; LEE, J. G.; LEE, S. H.; CHO, Y. H.; KIM, S. H. Heat transfer and pressure drop characteristics of Nanofluids in a Plate Heat exchanger. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 11, p. 5769-5774, 2011.
- LANPHERE, D. J.; ROGERS, B.; LUTH, C.; BOLSTER, C. H.; WALKER, L. S. Stability and transport of Graphene Oxide Nanoparticles in Groundwater and surface water. **Environmental Nanomaterials**, v. 31, 2014.
- LIMA, ÁLVARO SOARES. Análise numérica de absorvedores de chiller de absorção do tipo placa utilizando amônia/água como fluido de trabalho via CFD. 2018. 103f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2018.

- LOTFI, R.; RASHIDI, A. M.; AMROLLAHI, A. Experimental study on the heat transfer enhancement of MWNT-Water nanofluid in a shell and tube heat exchanger. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 39, p. 108-111, 2012.
- LOULIJAT, H.; KOUMINA, A.; ZERRADI, H. The effect of the thermal vibration of graphene nanosheets on viscosity of nanofluid liquid argon containing graphene nanosheets. **Journal of Molecular Liquids**, v. 276, p. 936-946, 2019.
- MARÉ, T.; HALELFADL, S.; SOW, O.; ESTELLÉ, P.; DURET, S.; BAZANTAY, F. Comparison of the thermal performances of two nanofluids at low temperature in a plate heat exchanger. **Experimental Thermal and fluid science**, v. 35, p. 1535-1543, 2011.
- MAGHRABIE, M. H.; ATTALLA, M.; MOHSEN, A. A. A. Performance assessment of a shell and helically coiled tube heat exchanger with variable orientations utilizing different nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, v. 182, p. 116036-116076, 2020.
- MARTINS, M. E. G. Desvio padrão amostral. **Revista de Ciência Elementar**, v. 1, p. 01, 2013.
- MIAGA, S. EL B.; PALM, S. J.; NGUYEN, C. T.; ROY, G.; GALANIS, N. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 26, p. 530-546, 2005.
- MISHRA, P. C.; MUKHERJEE, S.; NAYAK, S. K.; PANDA, A. A brief review on viscosity of nanofluids. **Int Nano Lett**, v. 4, p. 109-120, 2014.
- MOHD, N. A. R. N.; DAHALAN, N. B.; NASIR, N. The evaluation of k- ϵ and k-w turbulence models in modeling flows and performance of s-shaped diffuser. **International Journal of Automotive and mechanical Engineering**, v. 15, p. 5161-5177, 2018.
- MORGAN JR, JOHN PIERPONT – **FRASES**. Disponível em: <https://www.pensador.com/frase/MTY0NzczNg/#:~:text=O%20primeiro%20passo%20para%20chegar%20a%20algum%20lugar%20%C3%A9%20decidir,n%C3%A3o%20vai%20ficar%20onde%20est%C3%A1>. Acesso em: maio de 2019.
- MOHAMMED, H.A; NARREIN, K. Thermal and hydraulic characteristics of nanofluid flow in a helically coiled tube heat exchanger. **International Communications in Heat Mass Transfer**, v. 39, p. 1375–1383, 2012.
- NGUYEN, D. H.; KIM, K. M.; SHIM, G. H.; KIM, J. H.; LEE, C. H.; LIM, S. T.; AHN, H. S. Experimental study on the thermal-hydraulic performance of modified chevron plate heat exchanger by electrochemical etching method. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 155, p. 119857, 2020.

- NOVOSELOV, K. S.; GEIM, A. K.; MOROZOV, S. V.; JIANG, D.; ZHANG, Y.; DUBONOS, S. V.; GRIGORIEVA, I. V.; FIRSOV, A. A. Electric field effect in atomic mlly thin carbon films. **Science**, v.306, P. 666-669, 2004.
- LIMA, A. A. S.; OCHOA, A. A. V.; COSTA, J. A. P. DA; HENRÍQUEZ, J. R.; CDF simulation of heat and mass transfer in an absorber that uses the pair ammonia/water as a working fluid. **International Journal of Refrigeration**, v. 98, p. 514-525, 2019.
- OLIVEIRA, G. A. Síntese e caracterização de nanofluidos de prata. 2012. 121f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia, 2012.
- OLIVEIRA, L. R. Síntese e caracterização de Nanofluidos para aplicação em Sistemas Térmicos. 2018. 250f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2018.
- PAK, B. C.; YOUNG, L. C. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. **International Journal Experimental Heat Transfer**, v. 11, p. 151-170, 1998.
- PALANISAMY K.; KUMAR, M. P.C.Heat Transfer Enhancement and Pressure Drop Analysis of a Cone Helical Coiled Tube Heat Exchanger using MWCNT/Water Nanofluid. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, V. 10, P. 7-13, 2017.
- PANDEY, S. D.; NEMA, V. K. Experimental analysis of heat transfer and friction fator of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 38, p. 248-256, 2012.
- PANTZALI, M. N.; KANARIS, A. G.; ANTONIADIS, K. D.; MOUZA, A. A.; PARAS, S.V. Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 30, p. 691-699, 2009a.
- PANTZALI, M. N.; MOUZA, A. A.; PARAS, S.V. Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE).**Chemical Engineering Science**, v. 64, p. 3290-3300, 2009b
- PETUKHOV, B. Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties. **Advances in heat transfer**, v. 6, p. 503-564, 1970.
- PINTO, D. A. V. Condutividade térmica do grafeno suspenso em diferentes substratos. 2016. 72f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Física), Departamento de Física da Universidade de Aveiro, Portugal, 2016.

- POURHOSEINI, S. H.; NAGHIZADEH, N.; HOSEINZADEH, H. Effect of silver-water nanofluido on heat transfer performance of a plate heat exchanger: An experimental and theoretical study. **Power Tecnology**, v. 332, p. 279-286, 2018.
- QIE, L.; LIN, Y.; CONNELL, J. W.; XU, J.; DAI, L. Highly rechargeable lithium-CO₂ batteries with a boron and nitrogen-codoped Holey-Graphene Cathode. **Journal Angewandte Chemie**. v. 56, p. 6970-6974, 2017.
- RAJI, A. O.; SALVATIERRA, R. V.; KIM, N. D.; FAN, X.; LI, Y.; SILVA, G. A. L.; TOUR, J. M. Lithium batteries with nearly maximum metal storage. **Acs Nano**. v. 11, p. 6362-6369, 2017.
- RANJBARZADEH, R.; ISFAHANI, A. H. M.; AFRAND, M.; KARIMIPOUR, A.; HOJAJI, M. An experimental study on heat transfer and pressure drop of water/graphene oxide nanofluid in a copper tube under air cross-flow: applicable as a heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, v. 125, p. 69-79, 2017.
- REDDY, M. C.S., RAO, V. V. Experimental investigation of heat transfer coefficient and friction factor of ethylene glycol-water based TiO₂ nanofluid in double pipe heat exchanger with and without helical coil inserts. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 50, p. 68–76, 2014.
- REN, S.; RONG, P.; YU, Q. Preparations, properties and applications of grafphene in functional devices: A concise review. **Ceramics International**, v. 44, p. 11940-11955 , 2018.
- RICARDO BORDIGNON. Desempenho tribológico de Grafeno funcionalizado como aditivo em óleo lubrificante de baixa viscosidade. 2018. 80f. **Dissertação** (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2018.
- SALDANHA, W. H.; ARRIETA, F. R. P.; EKEL, P. I.; COELHO, T. M. M.; SOARES, G. L. Multi-criteria decision-making under uncertainty conditions of a Shell-and-tube heat exchanger. **International Journal of heat and mass transfer**, v. 155, p. 119-716, 2020.
- SADEGHINEZHAD, E.; MEHRALI, M.; LATIBARI, S. T.; MEHRALI, M.; KAZI, S. N.; OON, C. S.; METSELAAR, H. S. C. Experimental investigation of convective heat transfer using Graphene nanoplatelet based nanofluids under turbulent flow conditions. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, p. 12455–12465, 2014.
- SADEGHINEZHAD, E.; MEHRALI, M.; SAIDUR, R.; MEHRALI, M.; LATIBARI, S. T.; AKHIANI, A. R.; METSELAAR, H. S. C. A comprehensive review on graphene nanfluids: Recent research, development and applications. **Energy Conversion and Management**, v. 111, p. 466-487, 2016.

- SADEGHINEZHAD, E.; TOGUN, H.; MEHRALI, M.; NEJAD, P. S.; LATIBARI, S. T.; ABDULRAZZAQ, T.; KAZI, S. N.; METSELAAR, H. S. C. An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement for graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 81, p. 41-51, 2015.
- SADRI, R.; HOSSEINI, M.; KAZI, S.N.; BAGHERI, S.; ABDELRAZEK, A. H.; AHMADI, G.; ZUBIR, N.; AHMAD, R.; ABIDIN, N. I. Z. A facile, bio-based, novel approach for synthesis of covalently functionalized grapheme nanoplatelet nano-coolants toward improved thermo-physical and heat transfer properties. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 509, p.140-152, 2017.
- SADRI, R.; MALLAH, A.R.; HOSSEINI, M.; AHMADI, G.; KAZI, S.N.; DABBAGH, A.; YEONG,C.H.; AHMAD, R.; YAAKUP, N.A. CFD molideling of turbulent convection heat transfer of nanofluids containing green functionalized graphene nanoplatelets flowing in a horizontal tube: comparison with experimental data. **Journal of molecular liquids**, v. 269, p. 152-159, 2018.
- SAID, Z.; RAHMAN, S. M. A.; EL HAJ ASSAD, M.; HAI ALAMI, A.; Heat transfer enhancement and life cycle analysis of a shell-and-tube heat exchanger using stable CuO/water nanofluid. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 31, p. 306-. 317, 2019
- SAJJAD, M.; KAMRAN, M. S.; SHUAKAT, R.; ZEIENELABDEEN, M. I. M.; Numerical investigation of laminar convective heat transfer of Graphene oxide/ ethylene glycol-water nanofluids in a horizontal tube. **Engineering science and technology, an International Journal**, v. 21, p. 727-735, 2018.
- SAKULSERMSUK, S.; SINGJAI, P.; CHAIWONG, C. Influence of plasma process on the nitrogen configuration in grapheme. **Diamond and Related Materials**, v. 70, p. 211-218, 2016.
- SARSAM, W. S.; AMIRI, A.; KAZI, S. N.; BADARUDIN, A. Stability and thermophysical properties of non-covalently functionalized graphene nanoplatelets nanofluids. **Energy Conversion and Management**, v. 116, p. 101-111, 2016.
- SAUNDERS, E. A. D; **Heat exchangers: selection, design and construction**. Longman Scientific e Technical: Harlow, 1988.
- SEDAGHAT, F.; YOUSEFI, F. Synthesizes, characterization, measurements and modeling thermal conductivity and viscosity of grapheme quantum dots nanofluids. **Journalof molecular liquids**, v. 278, p. 299-308, 2019.

- SEGUNDO, J. E. D. V.; VILAR, E. O. Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.11, n. 2, p. 54-57, 2016.
- SELVAM, C.; BALAJI, T.; LAL, M. D.; HARISH, S. Convective heat transfer coefficient and pressure drop of water-Ethylene glycol mixture with Graphene Nanoplatelets. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 80, p. 67-76, 2017b.
- SELVAM, C.; LAL, D. M.; HARISH, S.; Enhanced heat transfer performance of an automobile radiator with graphene based suspensions. **Applied Thermal Engineering**, v. 123, p. 50-60, 2017a.
- SIMMONS, JEMMA – **Agents of S.H.I.E.L.D. 5ª Temporada**. Disponível em: <https://www.pensador.com/frase/MjQ2Njc2Ng/>. Acesso em: maio de 2020.
- SHAHRUL, I. M.; MAHBUBUL, I. M.; SAIDUR, R.; SABRI, M. F. M. Experimental investigation on Al₂O₃-W, SiO₂-W and ZnO-W nanofluids and their application in a shell and tube heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 97, p. 547-558, 2016.
- SHIRVAN, K. M.; MAMOURIAN, M.; ESFAHANI, J. A.; Experimental investigation on thermal performance and economic analysis of cosine wave tube structure in shell and tube heat exchanger. **Energy Conversion and Management**, v. 175, p. 86-98, 2018.
- SILVA, CRISTIANO VITORINO. **Introdução ao Ansys CFX**. 2019. 45 f. Apostila.
- SINGH, S.; SINGH, G.; SINGLA, A. Experimental Studies on Heat Transfer Performance of Double Pipe Heat Exchanger with using Baffles and Nanofluids. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, p. 1-7, 2016.
- SOLANGI, K. H.; KAZI, S. N.; LUHUR, M. R.; BADARUDIN, A.; AMIRI, A.; SADRI, R.; ZUBIR, M. N. M.; GHARAHKHANI, S.; TENG, K. H. A comprehensive review of thermophysical properties and convective heat transfer to nanofluids. **Energy**, v. 89, p. 1065-1086, 2015.
- SOLEYMANIHA, M.; AMIRI, A.; SHANBEDI, M.; TENG, C. B.; WONGWISES, S. Water-based graphene quantum dots dispersion as a high-performance longterm stable nanofluid for two-phased closed thermosyphons. **International communications in heat and Mass Transfer**, v. 95, p. 147-154, 2018.
- SOMASEKHAR, K.; MALLESWARA R.; K. N. D.; SANKARARAO, V.; MOHAMMED, R.; VEERENDRA, M.; VENKATESWARARAO T.; A CFD Investigation of heat transfer enhancement of shell and tube heat exchanger using Al₂O₃-water nanofluid, **Materials Today: Proceedings**, v. 5, p. 1057-1062, 2018.

- STANKOVICH, S.; DIKIN, A. D.; PINER, D. R.; KOHALHAAS, K. A.; KLEINHAMMES, A.; Jia, Y.; Wu, Y.; NGUYEN, T. S.; RUOFF, S. R. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. **Carbon**, v. 45, p. 1558-1565, 2007.
- SUBRAHMANYAM, K. S.; VIVEKCHAND, S. R. C.; GOVINDARAJ, A.; RAO, C. N. R. A study of graphenes prepared by different methods: characterization, properties and solubilization. **Journal of Materials Chemistry**, v. 18, p. 1517-1523, 2008.
- SUBRAHMANYAM, K.S.; PANCHAKARLA, L. S.; GOVINDARAJ, A.; RAO, C. N. R. Simple method of preparing Graphene Flakes by an Arc-Discharge Method. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 113, p. 4257-4259, 2009.
- SUTTER, P. W.; FLEGE, J.; SUTTER, E. A. Epitaxial graphene on ruthenium. **Nature Materials**, v. 7, p. 406- 411, 2008.
- TIWARI, ARUN KUMAR; PRADYUMNA, GHOSH; JAHAR SARKAR. Heat transfer and pressure drop characteristics of CeO_2 /water nanofluid in plate heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, v. 57, p. 24-32, 2013.
- TQ TEC QUIMPMENTEL. **Bancada de Trocadores de calor** – Guia do usuário. 2009.
- VAKILI, M.; HOSSEINALIPOUR, S. M.; DELFANI, S.; KHOSROJERDI, S. Photothermal properties of graphene nanoplatelets nanofluid for low-temperature direct absorption solar collectors. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 152, p. 187-191, 2016.
- VELIGURA, A.; ZOMER, P. J.; VERA-MARUN, I. J.; JÓZSA, C.; GORDIICHUK, P. I. Relating hysteresis and electrochemistry in graphene field effect transistors. **Journal of Applied Physics**, v. 110, p. 190-196, 2011.
- WALLACE, P. R. The bang theory of graphite. **Physical Review Journals Archive**, v.71, p. 622-634, 1947.
- WANG, N.; XU G.; LI, S.; ZHANG, X. Thermal properties and solar collection characteristics of oil-based nanofluids with low graphene concentration. **Energy Procedia**. v.105, p. 194-199, 2017.
- WANG, S.; XIAO, J.; YE, S.; SONG, C.; WEN, J. Numerical investigation on pre-heating of coal water slurry in shell-and-tube heat exchangers with fold helical baffles. **International Journal of Heat and Mass transfer**, v. 126, p. 1347-1355, 2018b.
- WANG, X. Q.; MUJUMDAR, A. S. A Review on nanofluids – Part II: Experiments and applications. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, p. 631-648, 2008.
- WANG, X.; LIANG, Y.; SUN, Y.; LIU, Z.; LIU, W.; Experimental and numerical investigation on shell-side performance of a double shell-pass rod baffle heat exchanger. **International Journal of heat and mass transfer**. v. 132, p. 631-642, 2019.

- WANG, Z.; LI, Y. Layer pattern design and optimization for multistream plate-fin heat exchangers – A review. **Renewable and sustainable Energy reviews**, v. 53, p. 500-514, 2016.
- WANG, ZHE; ZAN WU; FENGHUI HAN; LARS WADSÖ; BENGT SUNDÉN. Experimental comparative evaluation of a graphene nanofluid coolant in miniature plate heat exchanger. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 130, p. 148-156, 2018a.
- WEN, T.; LU, L.; ZHANG, S.; ZHONG, H. Experimental study and CFD modeling on the thermal and flow behavior of EG/Water ZnO nanofluid in multiport mini channels. **Applied Thermal Engineering**, v. 182, p. 116074-116089, 2020.
- WU, Y.; LIN, Y.; BOL, A. A.; JENKINS, K. A.; XIA, F.; FARMER, D. B.; ZHU, Y.; AVOURIS, P. High-frequency, scaled graphene transistors on diamond-like carbon. **Nature**, v. 472, p. 74-78, 2011.
- XUAN, Y.; ROETZEL, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 43, p. 3701-3707, 2000.
- YANG, L.; YEE, W. A.; PHUA, S. L.; KONG, J.; DING, H.; CHEAH, J. W.; LU, X. A high throughput method for preparation of highly conductive functionalized graphene and conductive polymer nanocomposites. **RSC Advances**, v. 6, p. 2208-2210, 2012.
- YARMAND, H. GHAREHKHANI, S.; SHIRAZI, S. F. S.; GOODARZI, M.; AMARI, A.; SARSAM, S. W.; ALEHASHEM, M. S.; DAHARI, M.; KAZI, S. N. Study of synthesis and thermos-physical properties of graphene nanoplatelet/platinum hybrid nanofluid. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 77, p. 15-21, 2016.
- ZAMZAMIAN, A.; OSKOUIE, S. N.; DOOSTHOSEINI, A.; JONEIDI, A.; PAZOUKI, M. Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow. **Experimental thermal and fluid science**, v. 35, p. 495-502, 2011.
- ZANG, X.; LI, P.; CHEN, Q.; WANG, K.; WEI, J.; WU, D.; ZHU, H. Evaluation of layer-by-layer graphene structures as super capacitors. **Journal of Applied Physics**, v. 115, 2014.

APÊNDICE A – AFERIÇÃO DOS TERMOPARES

Para as medições de temperatura dos circuitos de fluido quente e frio da bancada de testes foram utilizados termopares tipo K, ou seja, termopares formados por fios de chromel como termoelemento positivo, e Alumel como termoelemento negativo e são adequados para medição contínua desde -200°C até 1260°C , com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ de referência de temperatura externa e interna.

Os termopares utilizados foram devidamente calibrados através da bancada de testes, instalada no laboratório, tomando como referência uma faixa de temperatura da ordem de funcionamento da bancada de $0 - 100^{\circ}\text{C}$. Para calibração foi utilizado o forno de calibração da marca Ecil (Figura 46), com faixa de temperatura do lado frio de -50 a 140°C , e do lado quente com faixa de 100 a 1200°C .

Figura 47- Forno calibrador



Fonte: O autor, 2019.

Para calibrar os termopares através da referência do forno (Figura 47) foi utilizado o método comparativo para seis diferentes temperaturas (0 , 20 , 40 , 60 , 80 e 100°C). O procedimento utilizado foi a aquisição de 35 pontos de medição depois de estabilizado a temperatura do forno calibrador e dos termopares em medição. Os dados foram salvos e armazenados em arquivos de planilhas Excel, para análise. Os pontos foram selecionados, determinando-se a média aritmética, e seu desvio padrão. Finalmente, os valores encontrados foram inseridos graficamente, para gerar as diferentes curvas de calibração dos termopares

utilizados neste processo. A Tabela 12 mostra os valores médios para cada medição dos diferentes termopares (T1, T2, T3, T4 e T5 em °C) medidos.

Figura 48- Forno calibrador



Fonte: O autor, 2019.

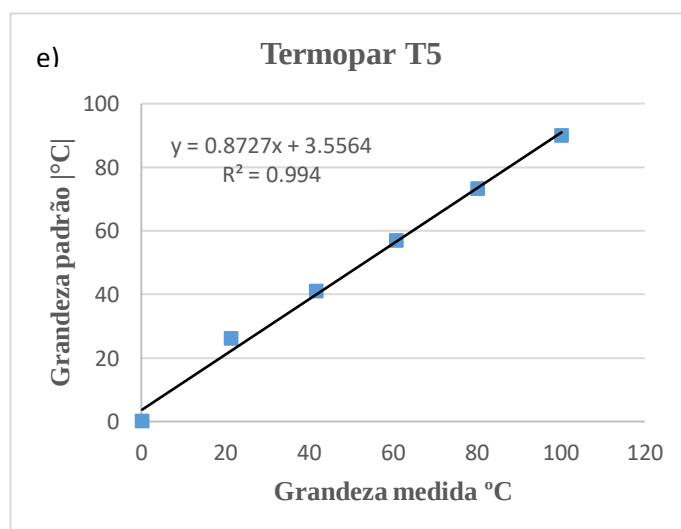
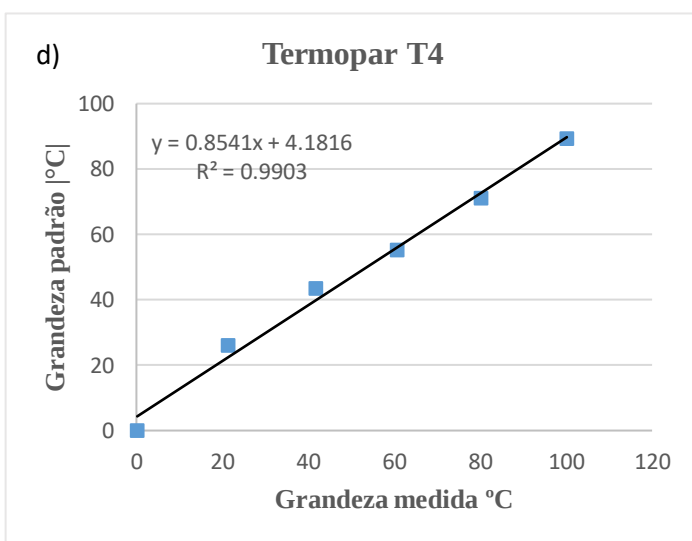
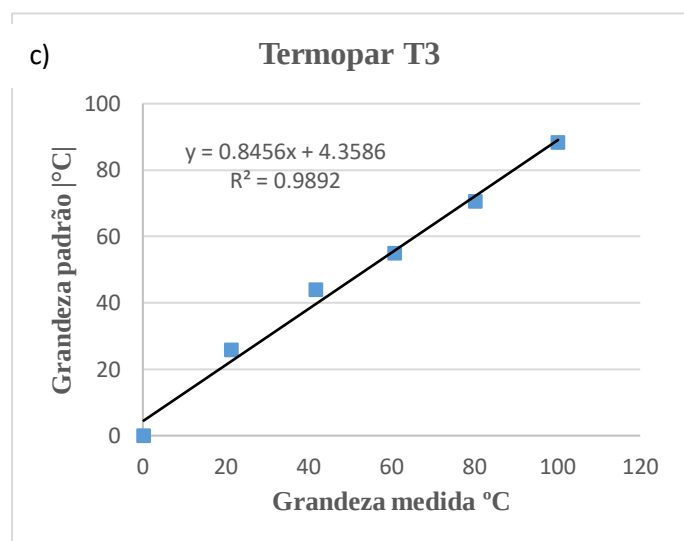
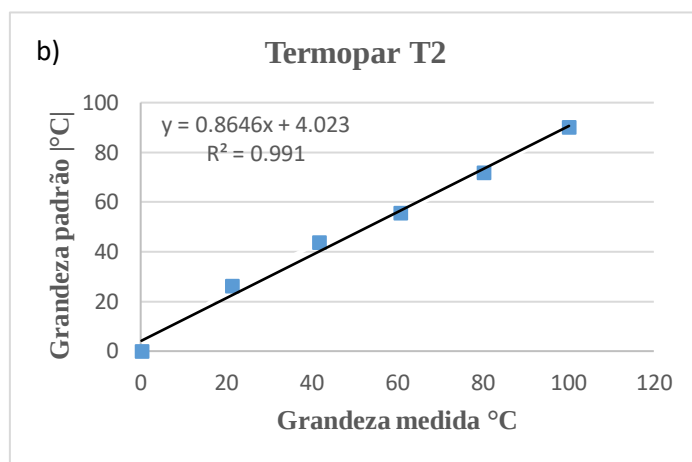
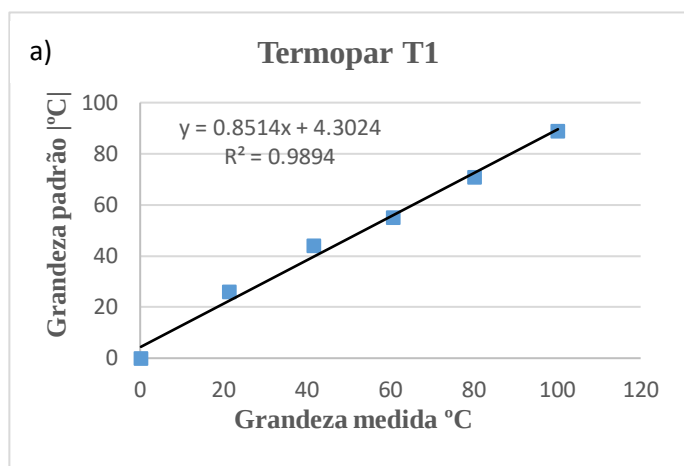
Tabela 12 - Valores medidos das temperaturas dos termopares para as diferentes temperaturas de referência.

Nº	Ref.	T1	T2	T3	T4	T5
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
1	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	20	25,96	26,1	25,88	26,12	26,16
3	40	44,08	43,72	43,92	43,5	41,0
4	60	55,06	55,44	54,88	55,2	56,9
5	80	70,94	71,92	70,56	71,04	73,12
6	100	88,96	90,16	88,34	89,24	89,82

Fonte: O autor, 2020.

Com os dados da Tabela 12, foram inseridos em gráficos de calibração de cada termopar para determinar a equação característica de calibração. O gráfico 21 apresenta as diferentes curvas dos termopares calibrados. As equações geradas foram utilizadas para corrigir os valores medidos pelos termopares para o fornecimento dos valores reais corrigidos que foram utilizados na análise deste trabalho.

Gráfico 21 - Gráfico de Calibração para os Termopares: a) Termopar T1, b) Termopar T2, c) Termopar T3, d) Termopar T4, e) Termopar T5.



Fonte: O autor, 2020.

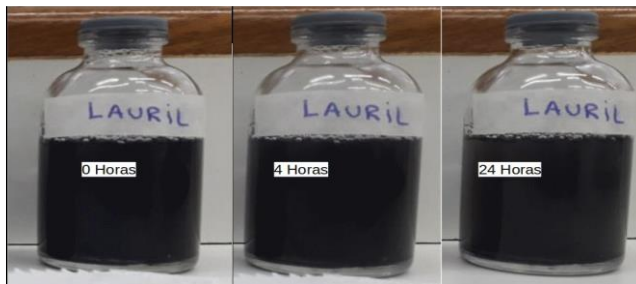
APENDICE B – NANOFLUIDO DE GRAFENO

B. 1 UTILIZAÇÃO DE SURFACTANTES

Para estabilização das nanopartículas no nanofluido de Grafeno foram feitos testes de decantação com sequência temporal de amostras em (0, 4 e 24h) do grafite esfoliado no LEMAN/IFPE - Recife, com dois surfactantes mais utilizados na literatura para o uso de nanofluidos em trocadores de calor. Na figura 48 e 49 são apresentados os resultados do uso dos surfactantes Lauril Éter Sulfato de Sódio (Lauril) e o Poliestireno Sulfonato de Sódio (PSS), respectivamente.

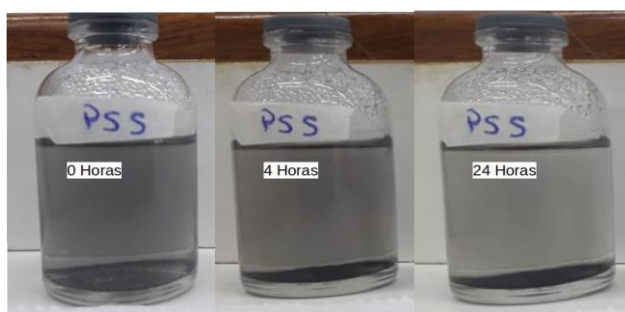
Nela podemos perceber que o Lauril apresentou uma maior estabilidade temporal do que o PSS, que após as 24h não há sedimentação ou aglomeração nos nanofluidos GNP/água com inspeção visual, indicando que o mesmo permite à formulação de nanofluidos que tem uma menor tendência a precipitação em uso, verificando a estabilidade dos nanofluidos GNP/água em processos de troca de calor. Estas análises também foram realizadas nas pesquisas de Kim et al. (2018); Akyürek et al. (2018); Wang et al. (2018a); Shahrul et al. (2016); Sadeghinezhad et al. (2015) e Hajjar et al. (2014).

Figura 49- Evolução temporal de amostras de Grafeno disperso com Lauril.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 50 - Evolução temporal de amostras de Grafeno disperso com PSS.



Fonte: O autor, 2019.

B.2 ANALISE MORFOLÓGICA DO GRAFENO

Para analisar o tamanho, a morfologia das partículas e a sua estabilidade e verificar se o nanofluido apresentava as nanofolhas em camadas de Grafeno e sua estrutura rugosa, características estas primordiais para se designar que realmente o nanofluido é Grafeno foram realizadas através da técnica de caracterização estrutural as imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, da marca Tescan MIRA3 (Figura 50) pertencente ao Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimentos de Materiais – INTM na UFPE/Recife. As imagens da superfície foram obtidas em aumentos variando de 5kx a 70kx.

Figura 51 - Microscópio Eletrônico de Varredura.



Fonte: O autor, 2019.

Para o reconhecimento dos picos de difração e da partícula, utilizou-se a técnica de Difração de raios X – DRX, da marca SHIMADZU, modelo XRD-7000 (Figura 51). Análise foi realizada no Laboratório de Materiais Compósitos e Integridade Estrutural –COMPOLAB, localizado no Departamento de Engenharia Mecânica na UFPE/Recife.

A difração de raios-X é um fenômeno no qual os átomos presentes em um cristal, devido ao seu espalhamento uniforme, causam um padrão de interferência das ondas presentes no feixe incidente de raios-X (Oliveira, 2018). Essa técnica é usada na determinação da estrutura atômica e molecular de compostos cristalinos, em que os átomos de carbono presentes no cristal difratam o feixe de raios-X incidente em direção horizontal e vertical demonstrando o pico e a intensidade comparando o grafite em pó e o grafite que será esfoliado.

Figura 52- Difratorômetro de Raio-X



Fonte: O autor, 2019.

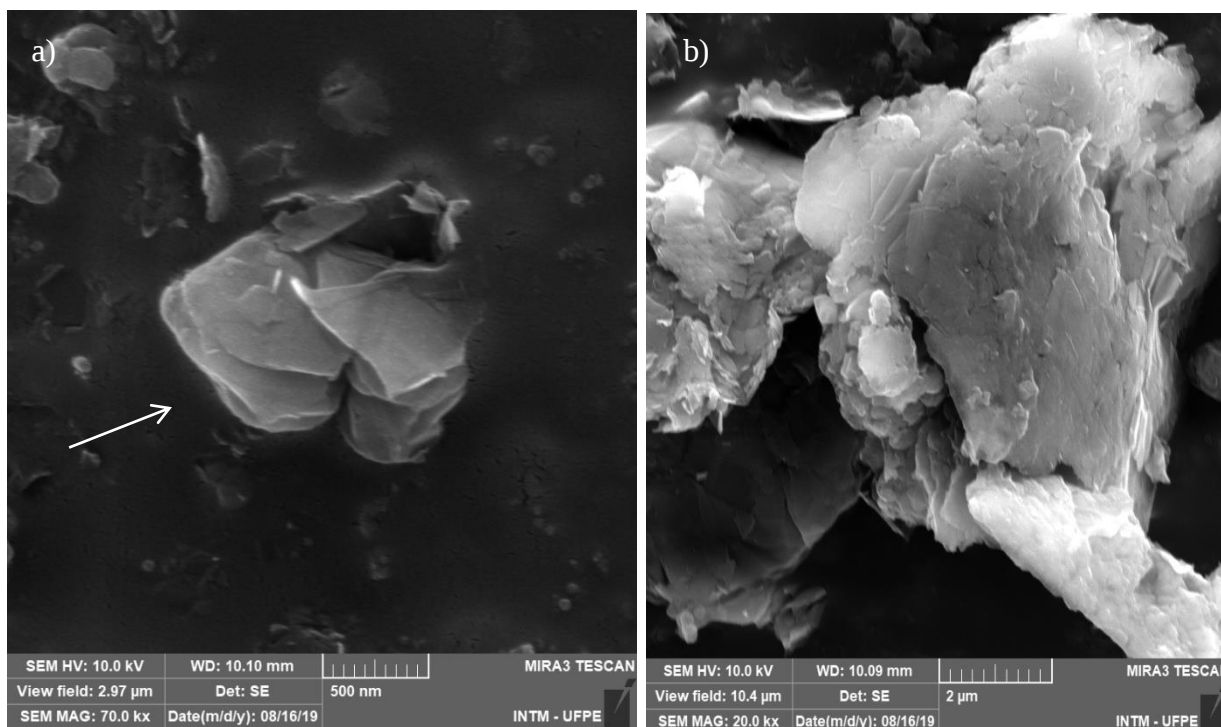
B.3 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO GRAFENO

B. 3.1 MEV

A Figura 52 em a) para 500 nm e b) 2 μ m apresentam as imagens dos resultados da morfologia e estrutura das nanopartículas do Grafeno fabricado a partir da barra de grafite, sua análise foi caracterizado através da Microscopia eletrônica de varredura (MEV), que indicam a formação de nanolâminas de Grafeno em forma de folhas, um material formado por placas que estão interligados e que apresentam rugosidade na sua superfície.

É possível observar na Figura 52 em (a) como indicado pela seta o empilhamento ordenado de pelo menos 04 camadas de Grafeno em uma nanoplaquetas, em estrutura bidimensional, confirmando a natureza de multicamadas de folhas de Grafeno analisado, e em (b) sua superfície áspera, podendo ser comparado com os resultados encontrados na literatura de Wang et al. (2018a); Haque et al. (2018); Bordignon, (2018); Alam et al. (2017); Agromayor et al. (2016); Ghoozati et al. (2014); Hernandez et al. (2008).

Figura 53 - Imagens da morfologia do Grafeno: a) para 500nm e b) 2µm.



Fonte: O autor, 2019.

B. 3.2 DRX

O resultado da Difração de raio-x (DRX) é apresentado na Figura 53, os difratogramas obtidos do grafite em pó comercial e da amostra obtida pelo processo eletroquímico de esfoliação. Nela pode-se perceber que a deflexão do ângulo do feixe de raios-X é apresentada horizontalmente e a intensidade verticalmente. A amostra do grafite esfoliado apresenta os mesmos picos de difração do grafite em pó, mas com uma intensidade reduzida, o que indica uma menor quantidade de material apresentando a mesma cristalinidade do grafite. A posição máxima do pico aparece em $2\theta=26,5$, que é anexado ao grafite esfoliado $2\theta=26,8$, demonstrando claramente que o material considerado possui uma estrutura de linha. Isso pode ser interpretado como um forte indicativo da eficiência da esfoliação realizada. A estrutura de DRX está de acordo com a estrutura das nanopartículas de Grafeno, propriedades relatadas por outros pesquisadores como Haque et al. (2018); Esfahani e Languri, (2017); Vikili et al. (2016); Goodarzi et al. (2016).

Figura 54 - Difrátogramas das amostras de grafite.

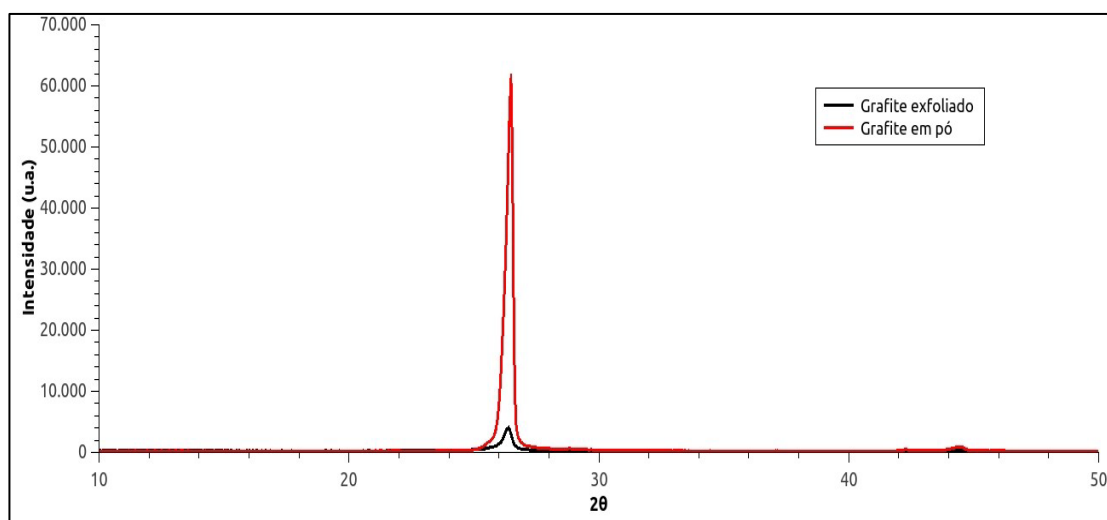


Foto: O autor, 2019.

APÊNDICE C – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS

C1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

As medições de condutividade térmica dos nanofluidos de Grafeno foram realizadas no Laboratório de Transferência de calor no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, utilizando um analisador de propriedades KD2 Prothermal da DecagonDevices, Inc, Pullman, WA, EUA (Figura 54).

Figura 55 - KD2 PRO

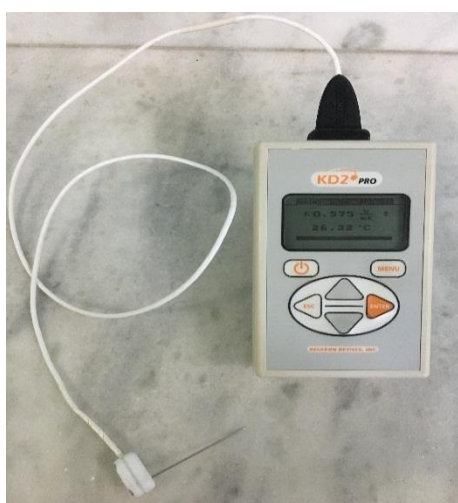


Foto: O autor, 2019.

O KD2 Pro é um medidor de propriedades térmicas portátil para campo e para laboratório, que utiliza o método de fio quente transiente para medir a condutividade térmica e resistividade em líquidos e difusividade, condutividade térmica, resistividade e calor específico volumétrico para sólidos.

O equipamento apresenta uma precisão $\pm 5\%$ para $\pm 10\%$ para condutividade térmica, opera em temperaturas de -50 até $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, sua precisão e faixa de medição variam com o tipo de agulha. As condutividades térmicas de todas as amostras foram medidas em $25 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, para teste inicial foi feito uma análise com Glicerina (Figura 55) de acordo como informa o manual para calibração da sonda de medição (agulha única KS-1), para posteriormente realizar as medições nos nanofluidos (Figura 56), as medições foram realizadas em um reservatório (caixa) fechado, para que os resultados não sofram com erros de temperatura externas.

Figura 56 - Calibração da sonda medição (KS-1)

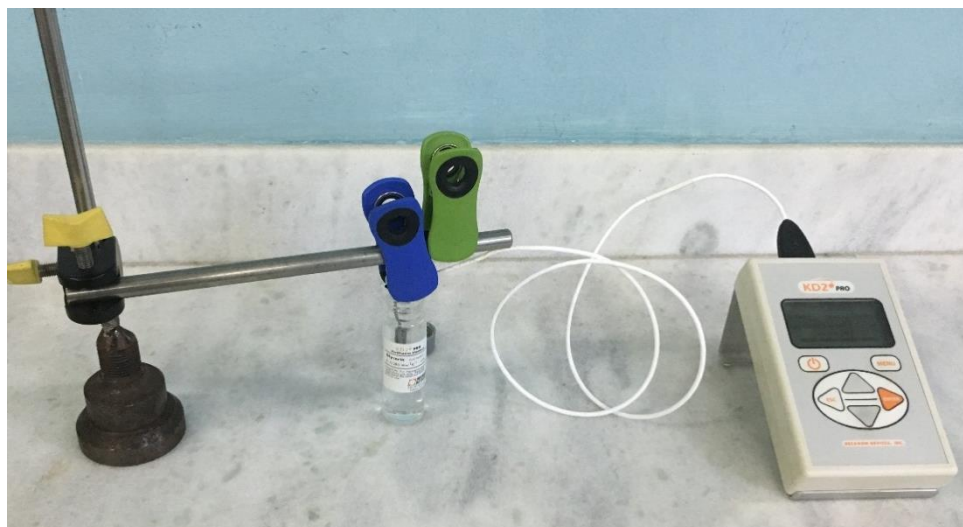


Foto: O autor, 2019.

Figura 57 - Teste com nanofluidos

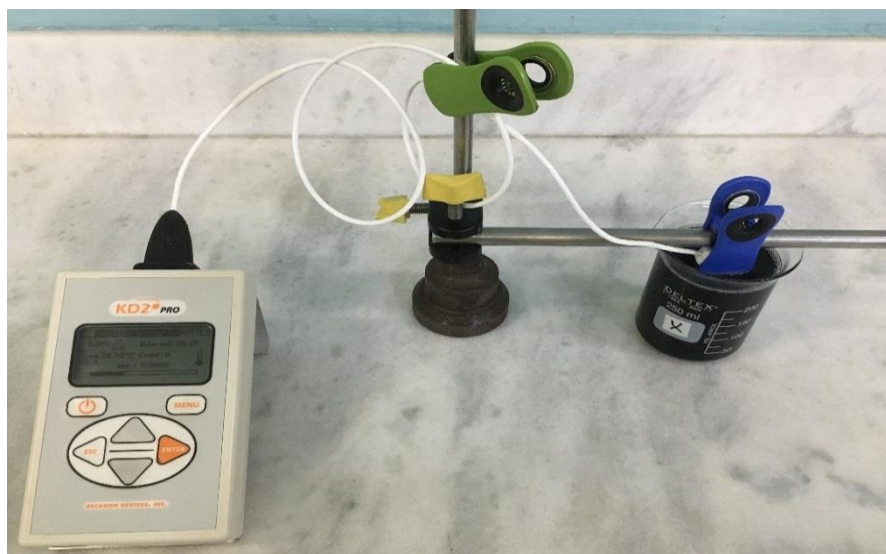


Foto: O autor, 2019.

Para cada amostra foram realizadas 5 medições e para cada medição foram verificados no equipamento a temperatura do líquido, erro e sua condutividade térmica. As medições foram realizadas de 15 em 15 minutos, como tempo mínimo estipulado pelo equipamento e em cada medição o KD 2 PRO levava 1 minuto para fazer a análise de valores, posteriormente a agulha de medição ficava em repouso no nanofluido, até finalizar os 15 minutos de ciclo e a nova medição fosse realizada.

Os dados foram salvos e armazenados em arquivos de planilha Excel para análise, determinando-se a média aritmética, e seu desvio padrão, os resultados encontra-se na Tabela 13 que demonstra os valores médios para cada medição de nanofluidos variando suas concentrações.

Tabela 13- Condutividade Térmica de Nanofluidos.

MÉDIA DE MEDIÇÕES						
FLUIDOS	COND. (W/m.K)	ERRO KD2 PRO	TEM. (°C)	COND. PADRÃO (W/m.K)	DESVIO PADRÃO	Erro (%)
Água	0,62	0,0081	26,74	0,61	0,08	0,04
Etilenoglicol	0,24	0,0025	25,60	0,26	0,00	0,00
Glicerina	0,31	0,0378	28,07	0,29	0,08	0,04
0,0125	0,56	0,0062	25,70	-	0,04	0,02
0,025	0,61	0,0094	25,17	-	0,05	0,02
0,050	0,64	0,0233	24,01	-	0,08	0,04

Foto: O autor, 2020.

C2. DENSIDADE

De acordo com Çengel e Cimbala (2012) a Densidade é a razão entre o peso específico de uma substância por um peso específico de referência (padrão) ou massa específica de uma substância por uma massa específica de referência (padrão).

A densidade do nanofluido aumenta pelo aumento da concentração, no entanto o aumento da densidade é insignificante (ASKARI et al., 2016). Este aumento também foi verificado por Singh et al. (2016) que percebeu que quanto maior a quantidade de nanopartículas maior seria a densidade, viscosidade e condutividade térmica.

As medições de densidade dos nanofluidos foram realizadas no Laboratório de Eletroquímica e Nanofluido do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE, Campus Recife, em pesagem eletrônica, utilizando um picnômetro (Figura 57) que é um recipiente de aferição utilizado nas medições das massas volumétricas de sólidos e líquidos.

Com o auxílio de uma balança de precisão foi pesado o picnômetro vazio, posteriormente, é verificado os valores para cada nanofluido, colocando dentro do picnômetro 25ml de nanofluido, para ser realizado sua densidade. Com os resultados das amostras calculam-se através da Equação (32) as densidades. Os valores das densidades são apresentados na Tabela 14.

Figura 58 - Pesagem dos nanofluidos



Foto: O autor, 2019.

$$\rho = \frac{M_{nf}(kg)}{V_{nf}(m^3)} \quad (32)$$

Tabela 14 - Densidade dos Nanofluidos.

FLUIDOS	DENSIDADES (Kg/m ³)	DENSIDADES PADRÃO (Kg/m ³)
Água	937,5	997,0
Etilenoglicol	1041,7	1110,0
Glicerina	1179,4	1260,0
0,0125	947,2	-
0,025	964,0	-
0,050	971, 5	-

Foto: O autor, 2020.

C.3 VISCOSIDADE

Segundo Çengel e Cimbala (2012) a Viscosidade de um fluido é à resistência que um fluido oferece à deformação por cisalhamento, tipo de tensão gerado por forças aplicadas em sentidos opostos, porém, em direções semelhantes no material analisado. Quanto maior for as forças intermoleculares, maior é a viscosidade.

A viscosidade da suspensão de nanofluidos depende de diferentes parâmetros como fluido base, fração de volume de partícula, tamanho da partícula, forma de partícula, temperatura, taxa de cisalhamento, surfactante, técnica de dispersão, distribuição granulométrica e agregação de partículas (LOULIJAT et al., 2018; ASKARI et al., 2016; MISHRA et al., 2014).

As medições de viscosidade dos nanofluidos foram realizadas no Laboratório de Refino e Tecnologia Limpas – LATECLIM na Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Campus Recife, utilizando um viscosímetro da Haake Viscotester 6L plus (Figura 58).

As viscosidades foram medidas para a rotação de 200 rpm, onde em um Becker foram colocados 500ml de nanofluidos e para as medições foi utilizado a haste de torque L1, e para verificação das temperaturas foi utilizado um termômetro digital tipo K, no qual os valores estão descritos na Tabela 15.

Figura 59 - Viscosímetro

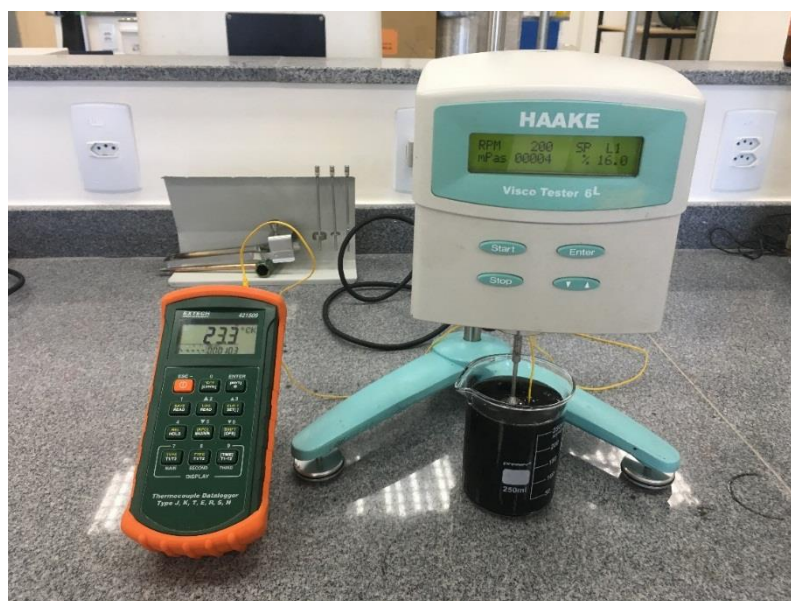


Foto: O autor, 2019.

Tabela 15 - Viscosidades dos Nanofluidos.

FLUIDOS	VISCOSIDADE μ (kg/ms)	Temperatura °C	VISCOSIDADE
			PADRÃO μ (kg/ms)
Água	0,0005	25,6	0,000895
Etilenoglicol	0,014	25,3	0,01733
Glicerina	0,0012	25,1	0,00149
0,0125	0,000919	25,2	-
0,025	0,000948	25,8	-
0,050	0,001008	25,3	-

Foto: O autor, 2020.

C.4 CALOR ESPECÍFICO

As medições de Calor Específico (C_p) para cálculos de cada nanofluidos foram realizadas através de correlações disponíveis na literatura. O calor específico segundo Khairul et al. (2014) é definido como o calor necessário para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância por uma unidade de temperatura.

Vários pesquisadores como Sajjad et al. (2018), Oliveira (2018), Izadkhah et al. (2014), Ghoozati et al. (2014), Duangthongsuk e Wongwises (2009), Pantzali et al. (2009), Miaga et al. (2005), utilizaram o modelo baseado na regra da mistura, que considera o equilíbrio térmico entre as duas fases de uma mistura homogênea, sendo este, o primeiro modelo a ser utilizado para essa finalidade por Pak e Cho em 1998. A Equação 33 apresenta o modelo de Pak e Cho (1998) para cálculo de calor específico de nanofluidos.

$$C_{p_{nf}} = (1 - \phi_v)C_{p_w} + \phi_v C_{p_p} \quad (33)$$

Na investigação da reologia de suspensões, a concentração volumétrica ϕ_v que é definida como a fração de espaço da suspensão total ocupada pela suspensão material, é freqüentemente usada em vez de concentração em massa. A Equação 34 apresenta o modelo de Pak e Cho (1998) para cálculo de concentração volumétrica.

$$\phi_v = \frac{1}{\left(\frac{100}{\phi_m}\right)\left(\frac{\rho_p}{\rho_w}\right)+1} \times 100(\%) \quad (34)$$

O modelo adotado por Pak e Cho (1998) apresentou considerações para nanofluidos em que sua aplicação tem grandes diferenças entre a massa específica da nanopartícula e a do fluido base, não sendo adequado.

Uma forma mais adequada de se obter o calor específico de nanofluidos é a partir da expressão de média ponderada que satisfaz a primeira Lei da Termodinâmica, como mostrado por Bergman (2009).

Xuan e Roetzel em (2000) modificaram o modelo de Pak e Cho (1998) passando a considerar a diferença entre as massas específicas da nanopartículas e do fluido base (Equação 35), propondo um novo modelo mostrado na Equação 36. Vários pesquisadores como Khanafer e Vafai (2011), Farajollahi et al. (2010), Maré et al. (2011), Ghazatloo et al. (2014), Akyürek et al. (2018), Singh et al. (2016), Palanisamy e Kumar (2017), Kim et al. (2018), Ali e Arshad (2016a) e (2016b) utilizaram este modelo em suas pesquisas.

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (35)$$

$$C_{nf} = \frac{(1-\phi_v)\rho_{fb}C_{p,fb} + \phi_v\rho_{np}C_{p,np}}{(1-\phi_v)\rho_{fb} + \phi_v\rho_{np}} \quad (36)$$

De acordo com a equação 36 foi calculado todos os calores específicos (C_p) dos nanofluidos, apresentados na Tabela 16. A Tabela 17 apresenta um comparativo de propriedades Termofísicas de Nanofluidos a base de Grafeno presente na literatura.

Tabela 16 - Calor Específicos dos Nanofluidos.

FLUIDOS	C_p (j/kg.k)	C_p PADRÃO (j/kg.k)
Água	4120,0	4180,0
0,0125	3842,0	-
0,025	3846,1	-
0,050	3854,5	-

Fonte: O autor, 2020.

Tabela 17 - Comparativos de Propriedades Termofísica de Nanofluidos de Grafeno.

Trocador de calor	NANOPARTÍCULAS DE GRAFENO - GNP						AUTOR
Experimental Tubo duplo, Placas planas e Casco e tubo. Simulação Tubo Duplo	Wt %	k (w/mK)	ρ (Kg/m³)	μ (Kg/ms)	Cp (J/kg.k)	T (°C)	Presente estudo
	0	0,62	937,5	0,000891	4120,0	25	
	0,0125	0,57	947,1	0,000919	3842,0		
	0,025	0,60	964,0	0,000948	3846,1		
	0,050	0,63	971,5	0,001008	3854,5		
Simulação Triplo tubo	NANOPARTÍCULAS DE GRAFENO - GNP						BAHIRAEI et al (2019b)
	Wt %	k (w/mK)	ρ (Kg/m³)	μ (Kg/ms)	Cp (J/kg.k)	T (°C)	
	0	0,60	996,5	0,000975	4101,6	25	
	0,02	0,61	997,2	0,001060	4044,8		
	0,06	0,63	997,4	0,001108	4016,4		
0,1	0,69	997,7	0,001172	3796,6			
Simulação Tubo Horizontal	ÓXIDO DE GRAFENO - GO						SAJJAD et al. (2018)
	Wt %	k (w/mK)	ρ (Kg/m³)	μ (Kg/ ms)	Cp (J/kg.k)	T (°C)	
	0	0,42	1057,8	0,002533	3504,32	25	
	0,01	0,43	1052,05	0,002647	3563,81		
	0,05	0,43	1051,6	0,002827	3632,88		
	0,07	0,44	1048,2	0,003189	3442,51		
	0,1	0,45	1046,1	0,003557	3179,22		
Simulação Tubo Horizontal	GNP TRATADOS COM CRAVO DA INDIA - CGNP						SADRI et al. (2018)
	Wt %	k (w/mK)	ρ (Kg/m³)	μ (mPa.s)	Cp (J/kg.k)	T (°C)	
	0	0,611	995,5	0,829	4142	35	
	0,025	0,636	995,6	0,844	4123		
	0,075	0,68	995,8	0,868	4096		
	0,1	0,708	995,9	0,885	4080		
Experimental Tubo circular Horizontal	GNP TRATADOS COM CRAVO DA INDIA - CGNP						SADRI et al. (2017)
	Wt %	k (w/mK)	ρ (Kg/m³)	μ (mPa.s)	Cp (J/kg.k)	T (°C)	
	0	0,59	998	1,03	4140	20	
	0,025	0,61	998,1	1,05	4120		
	0,075	0,65	998,3	1,08	4090		
	0,1	0,66	998,4	1,11	4078		
	0	0,6	996,8	0,93	4142	25	
	0,025	0,62	997	0,94	4122		
	0,075	0,66	997,2	0,95	4092		
	0,1	0,69	997,3	0,97	4079		
	0	0,61	995,5	0,83	4144	30	
	0,025	0,64	995,6	0,84	4124		

	0,075	0,67	995,8	0,86	4098	35		
	0,1	0,71	995,9	0,87	4080			
	0	0,62	993,9	0,75	4145			
	0,025	0,65	994	0,75	4126			
	0,075	0,69	994,15	0,77	4100	40		
	0,1	0,74	994,2	0,8	4082			
	0	0,63	992	0,67	4147			
	0,025	0,66	992,05	0,69	4128			
	0,075	0,73	992,15	0,72	4102	45		
	0,1	0,76	992,25	0,74	4085			
	0	0,64	-	0,63	41450			
	0,025	0,67	-	0,64	4130			
	0,075	0,74	-	0,65	4105			
	0,1	0,78	-	0,66	4084			
	Experimental Casco e tubo	ÓXIDO DE GRAFENO - GO						ESFAHANI e LANGURI (2017)
		Wt %	k (w/mK)	ρ (Kg/m³)	μ (Kg/ ms)	Cp (J/kg.k)	T (°C)	
0,01		0,63	-	0,0012	-	25		
0,1		0,68	-	0,0013	-			
*taxa de cisalhamento			100 (1/s)					
Experimental Placas planas	NANOPLAQUETAS DE GRAFENO - GNP						KUMAR et al. (2016)	
	Wt %	k (w/mK)	ρ (Kg/m³)	μ (Kg/ ms)	Cp (J/kg.k)	T (°C)		
	0,5	1,07	1033,0	0,00105	4070	35		
	0,75	1,11	1039,0	0,00108	4050			
	1	1,13	1055,0	0,00110	3950			
	1,25	1,16	1063,0	0,00118	3920			
Experimental Duplo Tubo	GRAFENO DOPADO DE NITROGÊNIO - NDG						GOODARZI et al. (2016)	
	Wt %	k (w/mK)	ρ (Kg/m³)	μ (Kg/ ms)	Cp (kJ/kg.k)	T (°C)		
	0,01	0,73	977,2	0,001060	3,8983	20		
	0,02	0,74	949,3	0,001070	3,7726			
	0,04	0,76	907,4	0,001070	3,7101			
	0,06	0,77	858,5	0,001090	3,628			
	0,01	0,75	974,8	0,000848	3,9313	30		
	0,02	0,77	947,0	0,000854	3,8076			
	0,04	0,79	905,2	0,000864	3,7341			
	0,06	0,81	856,5	0,000880	3,6400			
	0,01	0,79	971,4	0,000708	3,9643	40		
	0,02	0,81	943,7	0,000705	3,8426			
	0,04	0,83	902,2	0,000713	3,7581			
	0,06	0,86	853,7	0,000725	3,6552			
	0,01	0,82	967,4	0,000592	-	50		

	0,02	0,84	939,9	0,000598	-		
	0,04	0,86	898,6	0,000604	-		
	0,06	0,90	850,4	0,000614	-		
	0,01	0,86	962,7	0,000514	4,0303	60	
	0,02	0,87	935,3	0,000517	3,9126		
	0,04	0,90	894,3	0,000518	3,8061		
	0,06	0,94	856,5	0,000532	3,6760		
Simulação Tubo anular	NANOPLAQUETAS DE GRAFENO CONVAVENTE - GNP-SDBS						
	Wt %	k (w/mK)	ρ (g/m³)	μ (Ns/ m²)	Cp (kJ/kg.k)	T (°C)	
	0,025	0,61	0,9988	0,00130	4,15242	20	
	0,05	0,63	0,9991	0,00145	4,10371		
	0,1	0,65	0,9999	0,00154	4,05532		
	0,025	0,63	0,9966	-	4,15287	30	
	0,05	0,66	0,9978	-	4,10416		
	0,1	0,68	0,9989	-	4,05603		
	0,025	0,66	0,9935	-	4,15245	40	
	0,05	0,69	0,9959	-	4,10399		
	0,1	0,71	0,9973	-	4,05587		
	0,025	0,68	0,9879	-	4,15277	50	
	0,05	0,70	0,9890	-	4,10409		
	0,1	0,73	0,9913	-	4,05599		
	NANOPLAQUETAS DE GRAFENO NÃO CONVAVENTE - GNP-COOH						
	0,025	0,63	0,9985	0,00109	4,16429	20	
	0,05	0,66	0,9989	0,00114	4,11031		
	0,1	0,69	0,9996	0,00121	4,0563		
		0,025	0,67	0,9966	-	4,16497	30
		0,05	0,69	0,9973	-	4,11127	
	0,1	0,73	0,9954	-	4,05693		
	0,025	0,70	0,9932	-	4,16405	40	
	0,05	0,73	0,9945	-	4,11095		
	0,1	0,77	0,9954	-	4,05644		
	0,025	0,73	0,9895	-	4,16477	50	
	0,05	0,76	0,9906	-	4,11051		
	0,1	0,81	0,9887	-	4,05667		
Experimental Casco e tubo	ÓXIDO DE GRAFENO - GO						
	Wt %	k (w/mK)	ρ (Kg/m³)	μ(cp)	Cp (J/kg.k)		
	0	0,60	995,8	0,891	4179,1	25	
	0,050	0,70	1023,8	0,9429	4009,4		
	0,075	0,79	1038,4	0,9698	3924,9		
0,1	0,68	1053,5	0,9677	3840,1			
	GHOZATLOO et al. (2014)						

ARZANI et al.
(2015)GHOZATLOO
et al. (2014)

1*	5000	2200	-	790,0	
*GRAFENO PURO					

Fonte: O autor, 2020.

APÊNDICE D – ANÁLISE DE ERROS

Para que seja realizada a análise de erro experimental que é de suma importância na validação de um experimento e pode demonstrar o quanto de incerteza se tem nas medidas efetuada, foi realizada no Apêndice A calibração dos termopares e apresentada às equações características de calibração para cada termopar.

Com as devidas equações, realizaram-se as correções das médias dos valores de temperaturas de entrada e saída do circuito quente e frio (Th_1, Th_2, Tc_1 e Tc_2) nos testes realizados nos trocadores de calor.

Sempre que se realizam uma série de medições podem ocorrer erros aleatórios, que apresentam valores de leituras para mais ou para menos do valor real da grandeza. Uma forma de se ter uma estimativa da grandeza medida é através das médias aritmética de N valores medidos (Equação 37).

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (37)$$

Pode-se quantificar o erro ou a incerteza da medição através do desvio padrão (σ) definida pela seguinte fórmula na equação 38. Segundo Martins (2013) o desvio padrão é uma medida de dispersão dos dados relativamente à média, que se obtém tomando a raiz quadrada da variância amostral, portanto, trata-se de um índice de dispersão da amostra em relação à média.

$$\sigma = \Delta X = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad (38)$$

Com os valores referentes dos desvios padrões das medições das temperaturas pode-se verificar a confiabilidade da média amostral calculada, através do erro padrão que é uma medida de variação de uma média amostral em relação à média da população. Para obter uma estimativa do erro padrão (Equação 39), basta dividir o desvio padrão pela raiz quadrada do tamanho amostral. E para saber o valor estimado de uma grandeza medida e sua incerteza ou erro experimental basta utilizar a Equação 40.

$$\Delta \bar{X} = \sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (39)$$

$$x = \bar{x} \pm \Delta\bar{x} \quad (40)$$

As Tabelas 18, 19 e 20 apresentam os valores de todas as medições das médias de temperaturas de entrada e saída do circuito quente e frio corrigidas pelas equações de características de calibrações, os desvios padrão e dos erros estimados para cada temperatura dos fluidos nos trocadores de calor tubo duplos, placas planas e casco e tudo, respectivamente.

Com estes valores estimados pode-se realizar os cálculos no processamento de dados apresentados no capítulo 5 e verificar o comportamento do coeficiente global de transferência de calor através da análise dos nanofluido utilizados nesta obra.

Tabela 18 - Estimativa de erros de medições para o trocador de calor tubo duplo.

Trocador de calor Tubo Duplo												
Fluido: Água												
Temperaturas (°C)					Desvio padrão (σ)				Erro padrão (E)			
	Th1	Th2	Tc1	Tc2	σ Th1	σ Th2	σ Tc1	σ Tc2	Eh1	Eh2	Ec1	Ec2
40°	39,7	37,1	29,2	29,5	0,0492	0,0778	0,0289	0,0000	1%	2%	1%	0%
	39,0	37,3	29,3	30,0	0,0302	0,0405	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	38,9	37,8	29,9	30,7	0,0000	0,0000	0,0389	0,0000	0%	0%	1%	0%
	38,0	37,3	30,4	31,2	0,0522	0,0522	0,0000	0,0000	2%	2%	0%	0%
	38,4	37,9	30,8	31,6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0%	0%	0%	0%
50°	45,7	41,8	31,3	32,0	0,0000	0,0505	0,0467	0,0000	0%	2%	1%	0%
	45,6	42,9	30,7	32,0	0,0389	0,0522	0,0000	0,0452	1%	2%	0%	1%
	46,1	43,8	30,2	31,9	0,0701	0,0405	0,0000	0,0000	2%	1%	0%	0%
	46,4	44,6	30,4	32,5	0,0467	0,0405	0,0522	0,0000	1%	1%	2%	0%
	46,2	44,7	30,8	33,0	0,0000	0,0467	0,0505	0,0000	0%	1%	2%	0%
60°	51,1	45,0	30,9	31,9	0,0000	0,0603	0,0000	0,0302	0%	2%	0%	1%
	51,9	47,4	30,2	32,4	0,0302	0,0000	0,0000	0,0000	1%	0%	0%	0%
	53,5	49,8	30,7	33,6	0,0505	0,0000	0,0405	0,0000	2%	0%	1%	0%
	53,5	50,5	30,6	33,9	0,0874	0,0405	0,0000	0,0405	3%	1%	0%	1%
	54,0	51,4	30,2	34,1	0,0647	0,0701	0,0000	0,0505	2%	2%	0%	2%
Fluido: Grafeno 0,0125g												
40°	38,9	36,4	28,0	28,4	0,0302	0,0302	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	38,9	37,2	28,3	29,0	0,0289	0,0452	0,0000	0,0289	1%	1%	0%	1%
	38,3	37,2	28,5	29,4	0,0452	0,0515	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	39,0	38,1	29,0	30,1	0,0000	0,0515	0,0492	0,0000	0%	1%	1%	0%
	37,8	37,3	29,1	30,1	0,0492	0,0000	0,0000	0,0000	1%	0%	0%	0%
50°	45,5	42,0	30,5	31,3	0,0000	0,0505	0,0302	0,0000	0%	2%	1%	0%
	45,4	42,7	29,6	30,9	0,0000	0,0289	0,0000	0,0000	0%	1%	0%	0%
	46,3	44,1	29,5	31,3	0,0492	0,0000	0,0000	0,0000	1%	0%	0%	0%
	45,8	44,2	29,6	31,6	0,0522	0,0000	0,0000	0,0000	2%	0%	0%	0%
	45,9	44,7	29,7	31,9	0,0831	0,0647	0,0000	0,0505	3%	2%	0%	2%
60°	51,1	45,2	27,3	28,9	0,0505	0,1009	0,0000	0,0302	2%	3%	0%	1%
	51,6	47,1	27,1	29,5	0,0603	0,0522	0,0000	0,0302	2%	2%	0%	1%
	52,7	49,0	27,0	30,0	0,0000	0,0405	0,0000	0,0405	0%	1%	0%	1%
	53,9	50,9	26,8	30,6	0,0289	0,0389	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	53,8	51,2	26,8	30,9	0,0775	0,0522	0,0302	0,0982	2%	2%	1%	3%
Fluido: Grafeno 0,0250g												
40°	39,7	37,9	32,5	32,7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0%	0%	0%	0%
	38,6	37,5	31,8	32,2	0,0515	0,0452	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	39,3	38,4	32,8	33,4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0289	0%	0%	0%	1%
	38,2	37,7	33,1	33,6	0,0289	0,0289	0,0000	0,0452	1%	1%	0%	1%

	38,1	37,8	33,5	34,0	0,0389	0,0389	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
50°	46,2	42,9	33,5	34,0	0,0000	0,0505	0,0302	0,0302	0%	2%	1%	1%
	45,8	43,3	32,9	34,0	0,0302	0,0302	0,0467	0,0000	1%	1%	1%	0%
	46,2	44,2	32,5	34,2	0,0492	0,0389	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	46,5	44,8	32,0	34,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0302	0%	0%	0%	1%
	45,7	44,3	31,3	33,5	0,0492	0,0835	0,0000	0,0515	1%	2%	0%	1%
60°	51,1	46,0	32,9	34,0	0,0405	0,0302	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	51,8	47,6	32,2	34,3	0,0000	0,0302	0,0000	0,0000	0%	1%	0%	0%
	52,8	49,3	31,9	34,8	0,0000	0,0000	0,0405	0,0522	0%	0%	1%	2%
	53,3	50,2	31,4	34,8	0,0302	0,0405	0,0505	0,0302	1%	1%	2%	1%
	53,2	50,7	31,3	35,0	0,0674	0,0688	0,0000	0,0505	2%	2%	0%	2%
Fluido: Grafeno 0,050g												
40°	41,7	40,4	35,3	35,5	0,0505	0,0647	0,0405	0,0302	2%	2%	1%	1%
	39,8	39,0	34,7	34,9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0%	0%	0%	0%
	38,4	37,9	33,9	34,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0302	0%	0%	0%	1%
	38,2	37,9	34,1	34,3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0%	0%	0%	0%
	37,8	37,7	34,1	34,3	0,0000	0,0302	0,0000	0,0000	0%	1%	0%	0%
50°	45,9	42,6	32,3	33,0	0,0467	0,0701	0,0000	0,0000	1%	2%	0%	0%
	45,6	43,1	32,2	33,3	0,0505	0,0000	0,0000	0,0505	2%	0%	0%	2%
	46,3	44,1	31,9	33,4	0,0000	0,0405	0,0000	0,0000	0%	1%	0%	0%
	46,7	44,9	31,3	33,2	0,0505	0,0405	0,0000	0,0302	2%	1%	0%	1%
	46,2	44,7	31,0	33,0	0,0515	0,0452	0,0000	0,0289	1%	1%	0%	1%
60°	52,3	47,6	35,7	36,7	0,0405	0,0467	0,0000	0,0405	1%	1%	0%	1%
	52,6	48,9	35,2	36,9	0,0522	0,0000	0,0000	0,0000	2%	0%	0%	0%
	53,6	50,5	35,5	37,7	0,0505	0,0405	0,0000	0,0000	2%	1%	0%	0%
	54,2	51,7	35,4	38,3	0,0289	0,0000	0,0000	0,0000	1%	0%	0%	0%
	54,1	52,1	35,4	38,5	0,0405	0,0405	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%

Fonte: O autor, 2020

Tabela 19 - Estimativa de erros de medições para o trocador de calor placas planas.

Trocador de calor Placas Planas												
Fluido: Água												
Temperaturas (°C)					Desvio padrão (σ)				Erro padrão (E)			
	Th1	Th2	Tc1	Tc2	σ Th1	σ Th2	σ Tc1	σ Tc2	Erh1	Erh2	Erc1	Erc2
40°	40,7	39,2	31,9	32,0	0,0467	0,0405	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	39,1	38,4	31,3	31,5	0,0000	0,0000	0,0302	0,0000	0%	0%	1%	0%
	39,2	38,8	30,7	31,0	0,0467	0,0405	0,0505	0,0000	1%	1%	2%	0%
	38,0	37,7	30,4	30,8	0,0467	0,0000	0,0000	0,0302	1%	0%	0%	1%
	38,4	38,3	30,4	30,8	0,0000	0,0000	0,0302	0,0000	0%	0%	1%	0%
50°	46,9	44,7	32,5	32,8	0,0000	0,0000	0,0405	0,0000	0%	0%	1%	0%
	46,7	45,3	30,9	31,5	0,0302	0,0302	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	46,4	45,5	30,8	31,5	0,0302	0,0467	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	46,6	46,0	31,2	32,0	0,0000	0,0302	0,0000	0,0302	0%	1%	0%	1%
	46,1	45,7	31,1	32,0	0,0522	0,0522	0,0000	0,0405	2%	2%	0%	1%
60°	52,8	49,0	30,2	30,7	0,0000	0,0674	0,0000	0,0000	0%	2%	0%	0%
	53,3	51,0	30,2	31,2	0,0000	0,0965	0,0000	0,0452	0%	3%	0%	1%
	54,4	52,7	29,7	31,1	0,0522	0,0603	0,0467	0,0467	2%	2%	1%	1%
	54,5	53,2	29,6	31,1	0,0934	0,0647	0,0000	0,0505	3%	2%	0%	2%
	54,5	53,6	29,3	31,1	0,0522	0,0577	0,0000	0,0289	2%	2%	0%	1%
Fluido: Grafeno 0,0125g												
40°	40,1	38,2	29,9	30,1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0%	0%	0%	0%
	39,5	38,5	29,8	30,1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0389	0%	0%	0%	1%
	39,1	38,6	29,8	30,1	0,0405	0,0405	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	38,4	38,1	29,0	29,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0%	0%	0%	0%
	38,6	38,4	30,1	30,5	0,0000	0,0405	0,0000	0,0000	0%	1%	0%	0%
50°	47,1	44,7	31,0	31,3	0,0000	0,0389	0,0000	0,0000	0%	1%	0%	0%
	46,6	45,1	30,3	31,0	0,0000	0,0515	0,0000	0,0515	0%	1%	0%	1%
	46,7	45,7	30,2	31,0	0,0522	0,0577	0,0000	0,0452	2%	2%	0%	1%
	46,8	46,1	30,0	30,9	0,0515	0,0622	0,0000	0,0289	1%	2%	0%	1%
	46,6	46,0	29,7	30,8	0,0492	0,0669	0,0000	0,0515	1%	2%	0%	1%
60°	52,5	48,8	27,8	28,7	0,0522	0,0809	0,0000	0,0405	2%	2%	0%	1%
	53,1	50,4	27,3	28,6	0,0522	0,0467	0,0505	0,0467	2%	1%	2%	1%
	54,1	52,1	26,9	28,6	0,0405	0,0820	0,0000	0,0405	1%	2%	0%	1%
	54,1	52,6	26,7	28,7	0,0751	0,0688	0,0000	0,0467	2%	2%	0%	1%
	54,6	53,4	26,6	28,8	0,1009	0,0831	0,0302	0,0467	3%	3%	1%	1%
Fluido: Grafeno 0,0250g												
40°	42,6	41,6	35,4	35,4	0,0000	0,0389	0,0000	0,0000	0%	1%	0%	0%
	41,8	41,5	35,9	35,8	0,0000	0,0000	0,0289	0,0000	0%	0%	1%	0%
	41,4	41,4	36,2	36,2	0,0000	0,0389	0,0000	0,0000	0%	1%	0%	0%
	41,2	41,3	35,9	35,9	0,0000	0,0389	0,0000	0,0389	0%	1%	0%	1%

	40,8	40,9	35,4	35,5	0,0000	0,0000	0,0452	0,0000	0%	0%	1%	0%
50°	47,3	44,7	31,0	31,4	0,0505	0,0647	0,0505	0,0505	2%	2%	2%	2%
	47,0	45,7	30,7	31,2	0,0302	0,0302	0,0000	0,0467	1%	1%	0%	1%
	48,1	47,2	30,8	31,6	0,0000	0,0522	0,0000	0,0405	0%	2%	0%	1%
	46,8	46,1	30,5	31,3	0,0405	0,0302	0,0000	0,0467	1%	1%	0%	1%
	46,6	46,1	30,3	31,3	0,0302	0,0000	0,0000	0,0000	1%	0%	0%	0%
60°	54,1	51,4	33,9	34,4	0,0522	0,0302	0,0000	0,0522	2%	1%	0%	2%
	54,4	52,9	33,4	34,1	0,0000	0,0603	0,0000	0,0000	0%	2%	0%	0%
	55,3	54,2	33,3	34,2	0,0522	0,0751	0,0302	0,0000	2%	2%	1%	0%
	54,9	54,1	33,1	34,3	0,0539	0,0603	0,0000	0,0522	2%	2%	0%	2%
	54,4	53,8	32,1	33,6	0,0000	0,0302	0,0405	0,0000	0%	1%	1%	0%
Fluido: Grafeno 0,050g												
40°	40,7	39,9	35,3	35,2	0,0000	0,0405	0,0000	0,0000	0%	1%	0%	0%
	40,3	40,0	35,7	35,6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0302	0%	0%	0%	1%
	40,3	40,2	35,9	35,8	0,0000	0,0000	0,0405	0,0000	0%	0%	1%	0%
	40,2	36,3	35,1	35,2	0,0302	0,4384	0,0000	0,0000	1%	13%	0%	0%
	39,7	38,2	34,1	34,2	0,0000	0,4070	0,0405	0,0405	0%	12%	1%	1%
50°	46,4	43,8	28,8	29,3	0,0302	0,0405	0,0467	0,0000	1%	1%	1%	0%
	46,7	45,4	28,8	29,5	0,0000	0,0452	0,0000	0,0515	0%	1%	0%	1%
	46,8	46,0	28,7	29,7	0,0467	0,0505	0,0000	0,0302	1%	2%	0%	1%
	46,6	46,0	28,5	29,6	0,0405	0,0302	0,0000	0,0522	1%	1%	0%	2%
	46,3	46,0	28,5	29,7	0,0505	0,0522	0,0000	0,0000	2%	2%	0%	0%
60°	53,0	49,2	32,0	32,6	0,0000	0,0674	0,0467	0,0505	0%	2%	1%	2%
	53,6	51,5	31,5	32,5	0,0522	0,0775	0,0000	0,0522	2%	2%	0%	2%
	54,3	52,6	31,0	32,4	0,0505	0,0467	0,0000	0,0522	2%	1%	0%	2%
	54,2	53,0	30,9	32,5	0,0809	0,0701	0,0467	0,0000	2%	2%	1%	0%
	54,7	53,8	31,4	33,2	0,0522	0,0688	0,0000	0,0505	2%	2%	0%	2%

Fonte: O autor, 2020.

Tabela 20 - Estimativa de erros de medições para o trocador de calor casco e tubo.

Trocador de calor Casco e Tubo												
Fluido: Água												
Temperaturas (°C)					Desvio padrão (σ)				Erro padrão (E)			
	Th1	Th2	Tc1	Tc2	σ Th1	σ Th2	σ Tc1	σ Tc2	Erh1	Erh2	Erc1	Erc2
40°	39,0	37,0	27,7	28,2	0,0000	0,0452	0,0000	0,0492	0%	1%	0%	1%
	38,5	36,8	25,7	26,6	0,0389	0,0522	0,0000	0,0000	1%	2%	0%	0%
	38,7	37,4	26,1	27,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0289	0%	0%	0%	1%
	38,0	36,9	26,1	27,3	0,0751	0,0751	0,0000	0,0000	2%	2%	0%	0%
	38,0	37,0	26,1	27,4	0,0452	0,0289	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
50°	45,3	40,2	25,7	26,7	0,0302	0,0786	0,0522	0,0000	1%	2%	2%	0%
	45,8	42,5	25,8	27,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0505	0%	0%	0%	2%
	46,6	43,9	25,8	27,7	0,0389	0,0000	0,0000	0,0289	1%	0%	0%	1%
	46,7	44,3	25,4	27,9	0,0622	0,0452	0,0000	0,0389	2%	1%	0%	1%
	46,5	44,5	25,5	28,2	0,0669	0,0622	0,0000	0,0492	2%	2%	0%	1%
60°	43,8	39,6	28,5	29,1	0,1027	0,1401	0,0522	0,0405	3%	4%	2%	1%
	52,4	48,4	28,8	30,7	0,0505	0,0701	0,0000	0,0000	2%	2%	0%	0%
	53,3	49,9	29,3	31,8	0,0522	0,0405	0,0000	0,0000	2%	1%	0%	0%
	53,9	50,9	29,2	32,4	0,0000	0,0505	0,0000	0,0505	0%	2%	0%	2%
	53,5	51,2	29,4	32,9	0,0924	0,0982	0,0405	0,0302	3%	3%	1%	1%
Fluido: Grafeno 0,0125g												
40°	38,9	37,6	31,0	31,5	0,0452	0,0492	0,000	0,000	1%	1%	0%	0%
	38,5	37,7	30,7	31,3	0,0000	0,0000	0,000	0,039	0%	0%	0%	1%
	38,5	37,8	30,4	31,3	0,0000	0,0000	0,030	0,000	0%	0%	1%	0%
	38,1	37,5	30,2	31,1	0,0000	0,0522	0,039	0,045	0%	2%	1%	1%
	37,8	37,2	29,4	30,5	0,0467	0,0000	0,000	0,030	1%	0%	0%	1%
50°	45,4	41,5	28,1	29,3	0,0000	0,0405	0,0000	0,0000	0%	1%	0%	0%
	45,9	43,2	28,0	29,7	0,0302	0,0302	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	46,4	44,1	27,9	30,0	0,0632	0,0467	0,0000	0,0000	2%	1%	0%	0%
	46,1	44,1	27,8	30,1	0,1265	0,1214	0,0000	0,0000	4%	4%	0%	0%
	45,8	44,1	27,5	30,2	0,0405	0,0000	0,0405	0,0467	1%	0%	1%	1%
60°	51,1	44,9	27,2	28,6	0,0000	0,0389	0,0000	0,0289	0%	1%	0%	1%
	52,3	48,1	26,8	28,9	0,0000	0,0373	0,0000	0,0433	0%	1%	0%	1%
	53,3	49,6	26,7	29,5	0,0000	0,0718	0,0000	0,0452	0%	2%	0%	1%
	53,9	50,5	26,5	30,0	0,0603	0,0831	0,0000	0,0000	2%	3%	0%	0%
	54,9	52,0	26,2	30,4	0,0422	0,0000	0,0000	0,0483	1%	0%	0%	2%
Fluido: Grafeno 0,0250g												
40°	40,6	38,8	32,6	32,8	0,0000	0,0000	0,0467	0,0000	0%	0%	1%	0%
	38,7	37,9	32,5	32,7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0%	0%	0%	0%
	38,5	37,9	32,1	32,5	0,0505	0,0467	0,0000	0,0000	2%	1%	0%	0%
	38,4	38,0	31,9	32,5	0,0522	0,0405	0,0000	0,0000	2%	1%	0%	0%

	38,3	37,9	31,8	32,4	0,0467	0,0467	0,0000	0,0522	1%	1%	0%	2%
50°	45,6	41,8	29,2	30,0	0,0505	0,0405	0,0000	0,0522	2%	1%	0%	2%
	46,0	43,4	29,1	30,3	0,0405	0,0302	0,0000	0,0302	1%	1%	0%	1%
	46,4	44,3	29,2	30,8	0,0522	0,0505	0,0000	0,0000	2%	2%	0%	0%
	46,3	44,6	29,2	31,1	0,1138	0,0900	0,0000	0,0289	3%	3%	0%	1%
	45,9	44,4	28,9	31,1	0,0000	0,0405	0,0000	0,0467	0%	1%	0%	1%
60°	51,7	46,8	34,3	35,0	0,0000	0,0467	0,0000	0,0000	0%	1%	0%	0%
	52,7	49,8	33,9	35,3	0,0000	0,0522	0,0302	0,0505	0%	2%	1%	2%
	53,7	51,2	33,7	36,0	0,0302	0,0522	0,0000	0,0522	1%	2%	0%	2%
	53,7	51,6	33,6	36,1	0,0647	0,0701	0,0000	0,0000	2%	2%	0%	0%
	54,1	52,4	32,9	36,0	0,0831	0,0775	0,0000	0,0505	3%	2%	0%	2%
Fluido: Grafeno 0,050g												
40°	40,1	38,8	33,7	33,8	0,0505	0,0000	0,0302	0,0467	2%	0%	1%	1%
	39,7	38,8	32,7	33,1	0,0289	0,0452	0,0000	0,0000	1%	1%	0%	0%
	38,9	38,4	33,8	34,0	0,0688	0,0701	0,0000	0,0000	2%	2%	0%	0%
	38,4	38,2	34,2	34,4	0,0000	0,0405	0,0000	0,0302	0%	1%	0%	1%
	38,0	37,9	34,3	34,4	0,0505	0,0405	0,0000	0,0000	2%	1%	0%	0%
50°	46,3	42,5	31,3	32,0	0,0000	0,0522	0,0405	0,0505	0%	2%	1%	2%
	46,4	44,0	31,4	32,4	0,0000	0,0522	0,0000	0,0000	0%	2%	0%	0%
	47,1	45,2	31,2	32,6	0,0000	0,0405	0,0467	0,0000	0%	1%	1%	0%
	46,2	44,5	30,3	32,0	0,1221	0,0982	0,0000	0,0302	4%	3%	0%	1%
	46,1	44,8	30,3	32,3	0,0775	0,0831	0,0000	0,0505	2%	3%	0%	2%
60°	50,7	45,2	30,0	31,0	0,0000	0,0647	0,0302	0,0505	0%	2%	1%	2%
	52,4	48,5	29,9	31,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0467	0%	0%	0%	1%
	53,3	50,2	29,8	32,2	0,0000	0,0452	0,0000	0,0452	0%	1%	0%	1%
	54,1	51,3	29,1	32,2	0,0302	0,0000	0,0000	0,0467	1%	0%	0%	1%
	54,0	51,6	29,0	32,4	0,0905	0,0820	0,0000	0,0302	3%	2%	0%	1%

Fonte: O autor, 2020.