



**INSTITUTO
FEDERAL**
Pernambuco

INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife

Departamento Acadêmico de Controle e Processos Industriais

Engenharia Mecânica

JÚLIA MIKAELLE GOMES DE ANDRADE FERREIRA

**ANÁLISE NUMÉRICA DE TROCADOR DE CALOR TIPO TUBO DUPLO
UTILIZANDO NANOFLUIDO A BASE DE GRAFENO**

Recife

2023

JÚLIA MIKAELLE GOMES DE ANDRADE FERREIRA

**ANÁLISE NUMÉRICA DE TROCADOR DE CALOR TIPO TUBO DUPLO
UTILIZANDO NANOFLUIDO A BASE DE GRAFENO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Controle e Processos Industriais do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jacek Stanislaw Michalewicz.

Coorientador: Prof. José Angelo Peixoto da Costa.

Recife

2023

F383a
2023

Ferreira, Júlia Mikaelle Gomes de Andrade.

Análise numérica de trocador de calor tipo tubo duplo utilizando nanofluido a base de grafeno /Júlia Mikaelle Gomes de Andrade Ferreira. --- Recife: O autor, 2023.
71f. il. Color.

TCC (Curso de Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

Inclui Referências e Apêndice

Orientador: Professor Dr. Jacek Stanislaw Michalewicz

Coorientador: Professor Dr. José Ângelo Peixoto da Costa

1. Engenharia mecânica. 2. Trocador de calor. 3. Troca térmica. 4. Nanofluido. 5. Grafeno. I. Título. II. Michalewicz, Jacek Stanislaw (orientador). III. Costa, José Ângelo Peixoto da. IV. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 620.1 (22 ed.)

**ANÁLISE NUMÉRICA DE TROCADOR DE CALOR TIPO TUBO DUPLO
UTILIZANDO NANOFLUIDO A BASE DE GRAFENO**

Trabalho aprovado. Recife, 17 de Julho de 2023.

Jacek Stanislaw Michalewicz

José Angelo Peixoto da Costa

José Claudino de Lira Junior

Recife
2023

À Deus e a todos que tiveram sua parcela de colaboração, que me ajudaram
direta
ou indiretamente até essa conquista.

À Jámille, que tanto vibrou por minhas vitórias, que tanto acalentou
meu coração. Parte de mim respira você! Sei que estás comigo nesse
momento. Saudades eternas.

Essa é nossa!

AGRADECIMENTOS

Esse momento é um somatório de forças que se inicia desde 1997. Por todos os momentos difíceis vivenciados pelos meus pais e pela garra de nunca me deixar faltar o que eu sempre precisei, o amor e o apoio deles. Por todo o esforço feito com o intuito de me proporcionar o que infelizmente eles não puderam desfrutar. Pela paciência e respeito ao meu tempo, meu processo e meu progresso.

Meu eterno obrigada! Ao meu tio, pai de consideração e padrinho que lutou lado a lado com os meus pais e os ajudou a me proporcionar toda a educação que conquistei e ainda irei conquistar. Obrigada! A minha tia, mãe de consideração e madrinha, por todo o cuidado e preocupação comigo e com os meus pensamentos diante dos vários turbilhões de acontecimentos que a vida me propôs e por todo o amor que sentes, Obrigada! À Arthur e Laurinha, irmãos mais novos que carrego com muito amor, e com o desejo de sempre ser espelho dentro de tudo de melhor que possa oferecer. Vocês me manterão viva, até sem imaginar. Aos meus avós, que além de avós, foram e são pais em dobro. Que sorte a minha poder receber a benção de vocês ao sair de casa super cedo, e ao retornar pra casa super tarde. Esse cuidado me fez enxergar que sou agraciada. Obrigada!

Aos meus sogros, cunhada e em especial ao meu namorado, família que com o advento do tempo recebi e hoje também faço parte, por todo apoio, cuidado e por vibrarem comigo a cada conquista. Obrigada!

Aos amigos que também carrego como família, do visão até aqui: Vocês fazem parte dessa história!

A minha dupla, Adriana (Angélica) e João Vitor: A faculdade não seria a mesma sem vocês. Não sei se chegaria ao final sem a amizade e parceria que criamos. Que nunca percamos esse vínculo. Por todo suporte e palavra de aconchego em momentos não tão fáceis e por sempre renovarem minhas energias. Gratidão!

E por último, mas, não menos importantes: Aos meus mestres, que desde o ensino técnico me abraçaram e construíram comigo essa relação de 6

anos. Me faltam palavras para tanto. Sou agraciada por tê-los em minha vida e por poder desfrutar não somente dos incríveis profissionais que são, mas também dos grandiosos seres humanos em especial Jacek Stanislaw e Angelo Costa e também à Lídice Gonçalves, Junior Urbano, Álvaro Ochoa, Héber e Andreza. Vocês estarão sempre guardados em lugar especial das minhas lembranças.

“A confiança em si mesmo é o primeiro passo para o sucesso.”

Ralph Waldo Emerson (1870)

RESUMO

Trocadores de calor são dispositivos que permitem a troca térmica entre dois ou mais fluidos que estejam separados por alguma interface sólida e que se encontram em temperaturas distintas. Presente em muitas indústrias esse dispositivo, faz essa troca de energia acontecer de forma indireta, através de elementos que separam os fluidos, ou diretamente, em um processo de mistura. Os arranjos para acontecer o escoamento desses fluidos podem ser em fluxo paralelo, ou em contra fluxo. Os fluidos de transferência de calor desempenham papel vital em muitas indústrias e processos, incluindo geração de energia, processos químicos, processos de aquecimento e também de resfriamento, transporte, microeletrônica e outras diversas áreas. Entre os principais fluidos encontramos a água, minerais óleos e etileno glicol. Porém, os fluidos comuns de transferência de calor têm um baixo rendimento energético quando comparados aos materiais sólidos, então, para atender as necessidades da obra, foi produzido um novo fluido de troca térmica, o nanofluido, que nada mais é que um fluido comum, com nanopartículas sólidas dissolvidas em sua composição. Partículas sólidas essas que suprem a deficiência energética do fluido comum. Levando em consideração sua importância para a indústria como um todo, por meio de um estudo numérico computacional (CFD), o presente trabalho tem por objetivo investigar a eficácia do uso do nanofluido à base de grafeno, qual parâmetro do nanofluido interfere e ajuda no aumento do desempenho da eficiência da troca térmica em trocadores de calor do tipo tubo duplo.

Palavras-chave: Trocador de calor; grafeno; troca térmica; nanofluido.

ABSTRACT

Heat exchangers are devices that allow heat exchange between two or more fluids that are separated by some solid interface and that are at different temperatures. Present in many industries, this device makes this energy exchange happen indirectly, through elements that separate the fluids, or directly, in a mixing process. The arrangements for the flow of these fluids can be in parallel flow, or in counter flow. Heat transfer fluids play a vital role in many industries and processes, including power generation, chemical processes, heating and cooling processes, transportation, microelectronics and many other areas. Among the main fluids we find water, mineral oils and ethylene glycol. However, common heat transfer fluids have a low energy yield when compared to solid materials, so, to meet the needs of the work, a new heat exchange fluid was produced, the nanofluid, which is nothing more than a common fluid, with solid nanoparticles dissolved in its composition. Solid particles that supply the energetic deficiency of the common fluid. Taking into account its importance for the industry as a whole, through a computational numerical study (CFD), the present work aims to investigate the effectiveness of the use of graphene-based nanofluid, which nanofluid parameter interferes and helps in the increase of heat exchange efficiency performance in double tube heat exchangers.

Keywords: Heat exchanger; graphene; thermal exchange; nanofluid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - escoamento do fluxo no trocador de calor tubo duplo.....	18
Figura 2 - Esquema: fenômenos de transferência de calor.....	26
Figura 3- Trocador de calor tubo duplo: escoamento em contra fluxo...	28
Figura 4 - Tipos de Grafeno.....	32
Figura 5 - Fluxograma simulações.....	36
Figura 6 - Modelo de trocador de calor desenhado no Solidworks.....	37
Figura 7 - Protótipo físico do trocador de calor tubo duplo.....	38
Figura 8 - Parâmetros do protótipo do trocador de calor.....	38
Figura 9 - Etapas simulação CFD.....	39
Figura 10 - Trocador de calor no Ansys.....	39
Figura 11 - Malha do trocador de calor no Ansys.....	40
Figura 12 - Número de Nusselt em escoamento laminar.....	48
Figura 13 - Expressões CFD – Ansys.....	49
Figura 14 - Simulação numérica: Temperatura.....	60
Figura 15 - Simulação numérica: Velocidade de escoamento.....	51
Figura 16 - Simulação numérica: Monitor de temperatura.....	62
Figura 17 - Simulação numérica: Resultados.....	62
Figura 18 - Resultados obtidos para nanofluido 0,01% de grafeno – 60°C.....	72
Figura 19 - Resultados obtidos para nanofluido 0,02% de grafeno – 60°C.....	73
Figura 20 - Resultados obtidos para nanofluido 0,03% de grafeno – 60 °C.....	74
Figura 21 - Resultados obtidos para a água - 60°C.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da malha no Ansys.....	40
Tabela 2 – Propriedades dinâmicas – Nanofluidos e água.....	41
Tabela 3 - Temperaturas de entrada para simulações.....	50
Tabela 4 - Arranjo de vazões para os fluidos durante a simulação.....	50
Tabela 5 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor global: Água x Nanofluido.....	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de Nusselt x escoamento: Fluido quente.....	53
Gráfico 2 - Nusselt x escoamento: Fluido quente variando.....	54
Gráfico 3 - Efetividade térmica x escoamento.....	55
Gráfico 4 - Coeficiente Global de Transferência de calor x escoamento: Fluidos quentes.....	56
Gráfico 5 - Coeficiente Global de Transferência de calor dos Nanofluidos com vazão quente variando.....	57
Gráfico 6 - Coeficiente global de transferência de Calor dos Nanofluidos com vazão quente fixa.....	58
Gráfico 7 - Variação percentual entre os coeficientes de transferência de calor.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS

Ag - Prata

Al - Alumínio

Al₂O₃ - Óxido de

AlumínioAu - Ouro

CC's – Condições de contorno

CFD – Computacional fluid Dynamics/ Dinâmica dos fluidos computacionais

CGNPS - Nanopartículas de Grafeno Tratados com Cravos da Índia

CNDG - Grafeno Compactado de Nitrogênio

CNT – Nanotubos de carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

Cu – Cobre

CuO - Óxido de cobre

CTAB - brometo de cetiltrimetilamônio

Fe – Ferro

Fe₃O₄ - Óxido de Ferro

GA - Goma arábica

GE – Grafeno

GNP – Nanopartículas de grafeno

GNP-PT - Nanopartículas de Grafeno Decorado com Platina

GO - Óxido de grafeno reduzido

GQD - Pontos quânticos de Grafeno

IFPE – Instituto Federal de Pernambuco

K – Condutividade térmica

LTDM - Diferença de Temperatura Média Logarítmica

MWCNT – Nanotubos de carbono de paredes duplas

mm – Milímetro

NF – Nanofluidos

nm – Nanômetro

µm - Micrômetro

Re – Número de Reynolds

RGO – Óxido de grafeno

RPM - Rotações por minuto

SDBS - Dodecil benzeno sulfonato de sódio

SDS - Dodecil sulfato de sódio

SiO₂ - Dióxido de Silício

TiO₂ - Dióxido de Titânio

ZnO – Óxido de zinco

2D – 2 dimensões

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - Área média de transferência de calor [m²]
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/m²]
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/m². k]
T - Temperatura [°C]
 ΔT_{LTMD} - Diferença de Temperaturas Média logarítmica [°C]
 ΔP - Perda de carga [Pa]

Letras gregas

Símbolo Denominação

ε - Efetividade

ρ - Densidade [kg/m^3]

μ - Viscosidade dinâmica [Kg/m. s]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Estrutura da tese.....	21
2 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	22
3 FUNDAMENTAÇÃO TÓRICA.....	25
3.1 Termodinâmica e a transferência de calor e massa.....	25
3.2 Trocadores de calor.....	26
3.2.1 Trocadores de calor Tubo duplo.....	27
3.3 Nanofluido.....	28
3.4 Grafeno.....	30
3.4.1 Grafeno: Características e propriedades.....	32
3.5 Computacional Fluid Dynamics (CFD).....	34
4 METODOLOGIA.....	36
4.1 Análise Numérica.....	37
4.1.1 Geometria/Geometry.....	39
4.1.2 Malha/Mesh.....	39
4.1.3 Configurações/Setup.....	41
4.1.3.1 Caracterização do fluido.....	41
4.1.3.2 Equações governantes.....	42
4.1.3.3 Processamento de dados.....	43
5.1.4 Pós processamento – Resultados/Results.....	49
5 RESULTADOS E ANÁLISES.....	52
5.1 Escoamento e número de Reynolds.....	52
5.2 Comportamento do número de Nusselt.....	52
5.3 Efetividade dos fluidos	54
5.4 Coeficiente Global de Transferência de Calor (U).....	56
5.5 Comportamento do modelo numérico – Ansys.....	60
6 CONCLUSÕES.....	63
7 PROJETOS FUTUROS.....	65
REFERÊNCIAS.....	66
APÊNDICE.....	72

1 INTRODUÇÃO

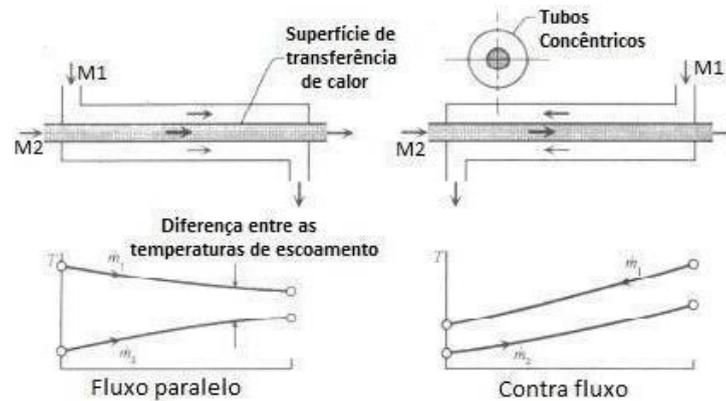
O processo de troca de calor entre dois fluidos que se encontram em diferentes temperaturas, separados por um “obstáculo” (interface) sólido, é muito utilizado no ramo da engenharia, sendo assim, conseqüentemente se faz muito presente nas indústrias. O equipamento usado para ocorrer esse tipo de troca de energia é denominado como trocador de calor, e podem ser aplicados a vários processos industriais com uma grande variedade de condições operacionais, tais como: a indústria química, a geração de vapor e recuperação de calor residual, aquecimento e condicionamento de ambientes, processos químicos e dentre outras inúmeras aplicações.

Nos trocadores de calor os fluidos possíveis que podem ser usados na troca de energia são: líquido-líquido, líquido-gás, gás-gás. Esses equipamentos são classificados conforme a figura 1.

Em Çengel (2012) diz que, a transferência de energia em trocadores de calor envolve em geral convecção e condução em cada fluido. Outros fatores considerados nestes estudos são o coeficiente global de transferência de calor e a taxa de transferência de calor. Esses fatores dependem da magnitude da diferença de temperatura entre os fluidos no local, e essa temperatura varia ao longo do trocador. Logo, o tipo de trocador de calor influencia na distribuição da temperatura no trocador.

O trocador de calor duplo-tubo é constituído por dois tubos concêntricos de diferentes diâmetros. Um fluido no trocador de calor tubo duplo escoar no tubo menor, enquanto o outro escoar através do espaço anular, entre os dois tubos. Dois tipos de arranjos de escoamento, são possíveis nesse tipo de trocador de calor: o escoamento paralelo, onde os fluidos quentes e frios entram no trocador de calor na mesma extremidade e avançam na mesma direção. Já no contra fluxo, os fluidos quentes e frios entram no trocador em extremidades opostas, e assim por sua vez, escoam em direções opostas.

Figura 1 - Escoamento do fluxo no trocador de calor tubo duplo



Fonte: Çengel (2012).

Nanofluido, como o próprio nome sugere, é um fluido comum com nanopartículas sólidas dissolvidas em suspensão. O processo de adição de um material sólido a um líquido tem como objetivo otimizar as propriedades referentes a troca térmica do fluido.

De acordo com Vilar *et al.* (2016) 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.

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).

A simulação computacional é uma tecnologia que veio para transformar as indústrias. Por meio dela, engenheiros e especialistas conseguem trabalhar com protótipos digitais para o desenvolvimento de novos produtos, projetos e processos, além de entenderem o comportamento de materiais, entre outras coisas. Dessa forma, antes de colocar qualquer produto em produção, é possível testar todas as suas variáveis em um protótipo digital. Além da previsibilidade do funcionamento de um determinado elemento, a simulação traz diferentes vantagens para as indústrias, como: qualidade e produtividade.

Já no que se trata da análise computacional do projeto, tomando

como base Ameer *et al.* (2014) e Feng *et al.* (2014), ambos afirmam que diversos trabalhos têm sido desenvolvidos na área de trocadores de calor, analisando parâmetros geométricos e buscando melhorias no desempenho dos mesmos (Wu *et al.*, 2014; Dutra *et al.*, 2009). Yang *et al.* (2014) apresentaram estudos numéricos tridimensionais com trocadores de calor do tipo casco e tubo, através da modelagem de modelo unitário, modelo periódico, modelo dos meios porosos, e considerando a metodologia do CFD (Computational Fluid Dynamics), onde os resultados apontaram que as abordagens do modelo periódico, de meios porosos e o do CFD, obtiveram grande precisão quando comparados com os resultados experimentais. Han *et al.* (2014), apresentou em seus estudos que uma possível solução para o problema das incrustações nas tubulações dos trocadores de calor, um modelo numérico para prever a taxa de deposição de partículas de gases de cinzas, considerando transporte de partículas e estimando o comportamento baseado no software CFX.

Analisando as infinitas possibilidades de utilidade dos trocadores de calor em âmbito industrial. Se viu a necessidade de explorar pontos a melhorar dentro do equipamento, junto a isso, e acompanhando o aumento no uso do nanofluido e também do grafeno, o projeto foi desenvolvido. Também fez parte da pesquisa, a criação de um modelo computacional CFD de trocador de calor do tipo tubo duplo, utilizando o software ANSYS, sob o ponto de vista da eficiência energética, através da análise dos resultados obtidos numericamente.

Tendo em vista que além de muito utilizado, o trocador de calor por si só já é um dispositivo que traz benefícios aos que fazem uso do mesmo. A busca em otimizar esse processo, é de sumo interesse para o polo engenheiro e tem um grande potencial dentro do cenário industrial em âmbito geral.

Sabendo que os fluidos comuns de transferência de calor têm suas limitações, e que o uso do nanofluido está em prospecção. Aproveitou-se o momento de unir o útil ao agradável, tentando trazer as propriedades antes limitantes no que diz respeito a troca térmica, agora, como um potencializador da mesma. Se o fluido convencionalmente usado, não consegue atender as perspectivas, porque não inovar e desenvolver um estudo de um nanofluido a base do mais famoso material da atualidade: O grafeno.

O grafeno, apesar de ter sido descoberto, mesmo que brevemente

em 1947, em 2004 teve o seu “boom” e foi considerado o material de 1001 utilidades, podendo ser utilizado em quase todo o setor tecnológico. Em 2010, chegou a receber o Prêmio Nobel de Física, após desenvolverem um estudo de um transistor a base de grafeno. O material, pode ser extraído de um mineral maleável e abundante no planeta como um todo, o grafite. O grafeno promete ser o futuro da tecnologia com suas incríveis características. E no âmbito de interesse ao projeto, ele chega a ser considerado o material de melhor condutividade térmica da atualidade, chegando a superar até o cobre, amplamente utilizado no nosso cotidiano. (GEIM *et al.*, 2007)

1.1 Estrutura da tese

A presente tese encontra-se estruturada em 6 grandes capítulos:

Iniciando pela introdução preliminar aos principais assuntos e conceitos que o projeto foi fundamentado. Os pilares que o formam consistem em temas como trocadores de calor, seus tipos, e a simulação computacional.

Seguindo pela referência bibliográfica, capítulo 2, abordando os principais projetos que fundamentaram o desejo de continuar nessa linha de pesquisa, as experiências, os ganhos, e as percas proporcionadas por cada produção.

O capítulo 3, traz a metodologia, com o objetivo de fazer o leitor entender como aconteceu a colheita de dados de modo numérico e como funciona o âmbito da análise numérica computacional aplica ao caso em questão.

Os resultados, se encontram no capítulo 4, e foram provenientes de todos os esforços realizados no capítulo 3, contendo análises termofluidas no que diz respeito ao desempenho do número de Nusselt, efetividade, e coeficiente global de transferência de Calor (U).

Chegando até as considerações finais do projeto (capítulo 5) e o que foi possível concluir mediante todas simulações e análises realizadas.

No capítulo 6 é abordado os possíveis projetos em que o atual projeto poderia servir como base no sentido de buscar sempre a melhora acadêmica e a implementação em âmbito industrial.

Em seguida, encontra-se as referências essenciais para construção da tese, e os apêndices pertinentes a mesma.

2 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma série de estudos que utilizaram o nanofluidos como fluido de transferência de calor em diversos contextos, experimentais e numéricos, com o intuito de corroborar a motivação e o seguimento na linha desse raciocínio para essa tese. Em Lima (2021), nos últimos anos, o estudo das características de transferência de calor em nanofluidos, vem crescendo progressivamente nos últimos anos. Ele ainda afirma que as propriedades especiais do grafeno tem atraído pesquisadores das mais diversas áreas, em especial para a utilização em nanomateriais com o objetivo de obter altos desempenhos térmicos.

Em El-Maghlany *et al.* (2016) foi investigado o desempenho de Cu-água como nanofluidos em trocador de calor do tipo tubo duplo horizontal, com escoamento em contrafluxo. Concentrações volumétricas das nanopartículas de Cu na água foram variadas entre 1 a 3%. Os nanofluidos foram usados no anel do trocador de calor e a água quente foi utilizada no tubo interno girando de 0 a 500 rpm. Como resultado do projeto desenvolvido foi analisado um aprimoramento na taxa de transferência de calor obtida com o nanofluido, assim como a rotação do tubo interno. A otimização do aumento da transferência de calor e a queda da pressão mostraram que nanofluidos tiveram uma pequena penalidade na queda de pressão quando foram comparados com o tubo interno rotação.

Foi observado transferência de calor de nanofluidos à base de água e CuO colocando compartimentos em um trocador de calor do tipo tubo duplo. Os experimentos foram realizados com concentrações de 0,1 e 0,2%. Foi observado que o nanofluido mostra um aumento na transferência de calor em comparação com a água. A transferência de calor nanofluídica a 0,1% de concentração volumétrica aumentou 10-12%, enquanto a transferência de calor nanofluídica a 0,2% de concentração volumétrica aumentou em 25-30%. (SINGH *et al.*, 2016)

Han *et al.* (2017) estudaram as características de transferência de

calor e fluxo do Cu, Al, Al₂O₃, Fe₂O₃, nanofluidos de carbono e grafite multi-paredes fluindo através da correia torcida interna, externo tubos de rosca na faixa de número de Reynolds (grandeza adimensional que de acordo com seu valor pode caracterizar o fluxo do fluido entre laminar e turbulento) de 2.000 a 12.000. Os resultados mostram que a porcentagem de nanopartículas aumenta a transferência de calor.

Em Khedkar *et al.* (2014) foi possível estudar e investigar as características de transferência de calor de um nanofluido de TiO₂ usado como refrigerante em um trocador de calor concêntrico. No experimento, um trocador de calor feito de um tubo de cobre com um comprimento de 1000 mm e o desempenho do refrigerante de água e os nanofluidos de TiO₂ foram comparados. Os resultados deste trabalho são importantes para a eficácia na troca de calor em trocadores de tubo concêntrico para melhorar o desempenho de refrigeração em sistemas de refrigeração.

A pesquisa experimental realizada por PALANISAMY (2017) foi desenvolvida em um tipo de trocador de calor helicoidal utilizando nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT). De acordo com o método de duas etapas usando surfactante de sódio dodecilbenzeno em concentrações de 0,1, 0,3 e 0,5% as nanopartículas MWCNT foram sintetizadas e assim os experimentos poderão dar sequência e serem realizados no fluxo laminado de regime num intervalo de 481 gama de números Dean. Nas taxas de concentração de 0,1, 0,3 e 0,5%, o número de Nusselt (parâmetro adimensional que fornece o coeficiente convectivo que permite calcular o calor transferidos entre dois materiais) aumentou em 22, 41 e 52%, respectivamente.

De acordo com Ren *et al.* (2018) O grafeno é uma das mais novas nanopartículas amplamente utilizadas em vários campos da nanotecnologia. É um material bidimensional de carbono com uma folha plana espessa de um átomo de sp² átomos de carbono ligados, dispostos em uma rede cristalina de favo de mel. Devido às suas propriedades extraordinárias, esses materiais atraíram a atenção de muitos pesquisadores. A sua condutividade térmica e área de superfície de

nanosheet de grafeno, que é uma nanoestrutura bidimensional com espessura em uma escala que varia de 1 a 100 nm, de camada única são cerca de 5000 W / m.K e 2630 m²/ gr, respectivamente. A alta condutividade térmica do grafeno, sugere melhor desempenho desta nanopartícula em comparação com outras nanoestruturas e até mesmo nanotubos de carbono. Portanto, estudo de desempenho térmico de nanofluidos contendo grafeno nanosheets atraiu muita atenção. Em seus próprios exemplos, é possível que, nanosheets (uma nanoestrutura bidimensional com espessura em uma escala que varia de 1 a 100 nm) de grafeno dispersos em etilenoglicol e o aumento da condutividade térmica para uma dispersão contendo 5% em volume de grafeno foi de até 86%.

Mohd *et al.* (2018), diz que o modelo $k-\epsilon$ foi implantado no processamento numérico com o intuito de modelar o fluxo turbulento na investigação e garantir a precisão dos dados e resultados obtidos. Esse modelo abrange duas equações de transportes extras para representar as propriedades turbulentas do escoamento de fluxo internos e limitados por parede. Porém, o método só demonstra bons resultados quando os gradientes de pressão médio estão pequenos.

E, para finalizar este capítulo, Bahiraei *et al.* (2019a) com o intuito de reduzir os custos em produções de ambientes experimentais 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.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

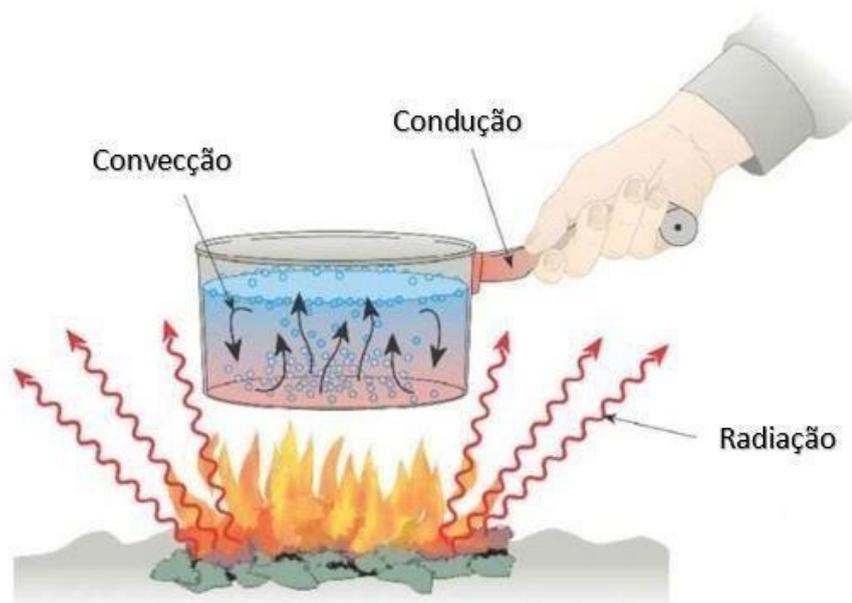
3.1 Termodinâmica e a transferência de calor e massa

A partir do estudo da termodinâmica, a energia pode ser transferida através de interações de um sistema com a sua vizinhança. Essas interações são chamadas de trabalho e calor. Entretanto, a termodinâmica lida com os estados extremos (inicial e final) do processo ao longo do qual uma interação ocorre e não fornece informação sobre a natureza da interação ou sobre a taxa na qual ela ocorre. Transferência de calor é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Portanto, sempre que existir uma diferença de temperaturas em um meio ou entre meios, haverá, necessariamente, transferência de calor. (INCROPERA,2014)

Dentre os diferentes tipos de processo para transferência de calor, temos:

- **Condução:** Quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido;
- **Convecção:** se refere à transferência de calor que ocorrerá entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles estiverem a diferentes temperaturas;
- **Radiação:** Todas as superfícies com temperatura não nula emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Desta forma, na ausência de um meio interposto participante, há transferência de calor líquida, por radiação, entre duas superfícies a diferentes temperaturas.

Figura 2 - Esquema: fenômenos de transferência de calor.



Fonte: Adaptado de Silva (2022).

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 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).

3.2 Trocadores de calor

Com a sua infinidade de tipos e modelos, os trocadores de calor podem ser classificados de várias formas, como por exemplo, pelo tipo de serviço que eles executam dentro de uma determinada atividade

(ARAUJO, 2002). Podendo ser utilizado em uma gama de aplicações, desde sistemas de aquecimento, até produção de potências em grandes usinas. (KREITH *et al.*, 2011).

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).

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

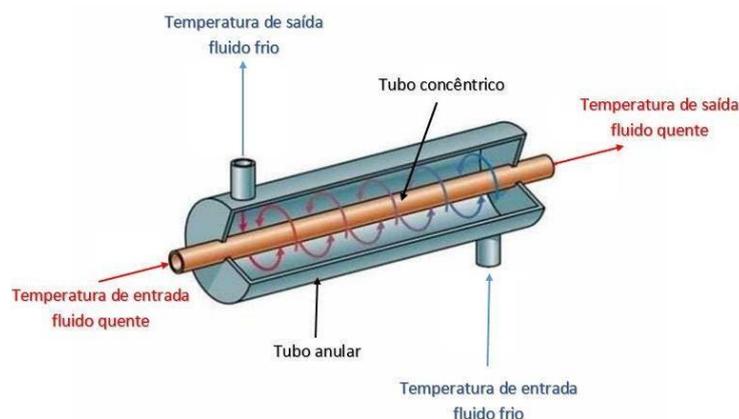
- Tubular: casco e tubo, duplo tubo, resfriadores a ar, tubo aquecido;
- De placa: placa, espiral, lamela, placa aletada;
- De materiais altamente resistentes a corrosão: grafite, vidro, teflon;
- Especiais: rotativos, elétricos.

3.2.1 Trocadores de calor Tubo duplo

O trocador de calor tipo tubo duplo, ou bi tubular é considerado um dos mais simples trocadores de calor. O dispositivo é utilizado e é constituído por dois tubos concêntricos de diferentes diâmetros, como mostra a figura 3, geralmente com dois trechos retos e com conexões apropriadas nas extremidades de cada tubo, no qual, em um o fluido escoar através do tubo menor, enquanto o outro escoar 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).

Figura 3- Trocador de calor tubo duplo: escoamento em contra fluxo



Fonte: Autor (2023)

As formas de arranjo de escoamento mais usuais são as de fluxo paralelo e em contra fluxo. O fluxo em paralelo acontece quando o escoamento de ambos os fluidos se encontra no mesmo sentido. O arranjo de fluxo contrário (também conhecido como escoamento em contracorrente) caracteriza-se pelo escoamento dos fluidos estarem em sentidos opostos.

Apesar de ser considerado o mais simples dentre os trocadores de calor, o mesmo possui algumas e interessantes vantagens, como por exemplo: 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).

3.3 Nanofluido

Segundo Akyurek *et al.* (2018) Os fluidos comuns de transferência de calor têm menor condutividade térmica do que os sólidos, devido à sua baixa temperatura e propriedades. Nesse caso, esse fluido tem algumas

limitações no que diz respeito a melhoria do desempenho da troca térmica e a compactação de dispositivos de engenharia. Existem alguns meios de suprir essa necessidade dos fluidos convencionais, um exemplo, é quando se adiciona pequenas partículas sólidas sejam elas de material metálicas, não metálicas e poliméricas a fluidos em geral de transferência de calor. As partículas comuns ou mesmo micrômetros se forem usadas, podem ser consideradas uma jogada de risco, pois elas não podem ser usadas em algumas aplicações, como por exemplo o uso em equipamentos que possam gerar entupimentos ou decantação. Embora melhorem o desempenho térmico, as mesmas possuem algumas outras limitações, haja vista que elas causam alguns problemas como o rápido assentamento de partículas, o entupimento dos canais de fluxo, tem pouca estabilidade e aumento da queda de pressão no fluido. Por outro lado, esses problemas podem ser resolvidos usando dispersões de partículas de tamanho nanométrico.

Para esse propósito, nanopartículas no tamanho com um intervalo de 1– 100 nm são utilizadas em fluidos de base em vez destas partículas mais usuais. As suspensões chamadas de nanofluidos são usadas em muitas indústrias. Estas características dos nanofluidos levam a uma ampla variedade de aplicações tais como fornecimento de energia, indústria automotiva, indústria química, sistemas de aquecimento / resfriamento, microeletrônica e assim por diante. O primeiro e mais importante passo de ter nanofluidos estáveis é a preparação. Usando nanofluidos pode aumentar o desempenho térmico do calor sistema de troca. Portanto, as propriedades termofísicas dos fluidos de trabalho devem ser investigadas. Nanofluidos constituídos por diferentes nanopartículas e materiais fluidos investigado por muitos pesquisadores sobre sua preparação, caracterização, modelagem, calor desempenho de transferência, características e aplicações de fluxo como Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , SiO_2 , nanotubos de carbono (CNT), Cu , Fe_2O_3 e Fe_3O_4 são algumas das nanopartículas comuns que são utilizados neste estudo.

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”. O 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).

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 (IZADKHAN *et al.*, 2014).

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).

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 Prêmio 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).

Entre os diferentes tipos de nanofluidos, dentre as partículas metálicas que estão sendo usados estão os Cu, Al, Fe, Au, e Ag, e de NFs, e entre as partículas na forma oxidada estão os Al_2O_3 , CuO, Fe_3O_4 , TiO_2 , CO_2 , SiO_2 , 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 nanofluidos de óxido de Grafeno em diferentes concentrações mostraram condutividades térmicas substancialmente mais altas que fluidos base.

Dentre os inúmeros tipos de nanofluidos a base de grafeno, é possível encontrar dentre as literaturas:

- Pontos quânticos de Grafeno - GQD: utilizado nas pesquisas de Sedaghat e Yousefi (2019), Soleymaniha *et al.* (2018), Etefaghi *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 (1957), Sajjad *et al.* (2018), Esfahani 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).

Figura 4 - Tipos de Grafeno



Fonte: Adaptado de Arshad *et al.* (2019).

3.4.1 Grafeno: Características e propriedades

O grafeno possui uma estrutura considerada a mais leve, mais forte e mais fina da atualidade. Suas características dão origem a propriedades químicas e físicas que argumentam e justificam o número crescente de estudos científicos voltados as utilidades deste fenômeno de material. Ele chega a ser 200 vezes mais resistente do que o aço e 1 milhão de vezes menor que um fio de cabelo. (SEGUNDO e VILAR, 2016)(COSTA *et al.*, 2018).

- Estabilidade do grafeno

Em PINTO (2016) O grafeno apresenta vagos enrugamentos que possibilitam acabar com as vibrações térmicas que desestabilizam a estrutura do material. Por outro lado, também apresenta uma alta

qualidade cristalina, levando o material a um patamar quimicamente estável à temperatura ambiente, no seu estado livre (suspensão).

De acordo com Askari *et al.* (2016) dentre os principais obstáculos encontrados pela indústria para o uso do nanofluido em massa, a estabilidade das nanopartículas no fluido base é o maior desafio. Para estabilizar as nanopartículas do fluido, é utilizado os surfactantes, contudo, encontrar tanto as nanopartículas como os surfactantes mais adequados para cada sistema em específico é de grande importância, pois interfere diretamente na qualidade da obtenção do resultado. (ASKARI *et al.*, 2016).

Seguindo a linha de raciocínio de vários outros autores, para dispersar o GE em fluidos a base de água utilizaram surfactantes. A pesquisa desenvolvida por Akyürek *et al.* (2018) e Sarsam *et al.* (2016) investigou as consequências de alguns produtos químicos tensoativos, sobre a estabilização das nanoplaquetas de Grafeno (GNP) na água, como por exemplo, o Dodecil Benzeno Sulfonato de Sódio (SDBS), Dodecil Sulfato de sódio (SDS), brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB) e goma arábica. Tudo isso fazendo uso de um ultrassom para homogeneizar o nanofluido. O surfactante SDBS com razão de 1:1 e duração ultrassônica de 60 minutos apresentaram boa estabilidade no período de 60 dias. Ou seja, houve decantação das GNP após este período.

Por outro lado, A adição de surfactantes acaba afetando o desempenho da transferência de calor dos nanofluidos, principalmente em temperaturas mais elevadas, afirma Akyurek *et. al.*, em 2018. Mas, mesmo assim seu uso é indicado e deve ser utilizado no preparo do fluido.

- Condutividade térmica do grafeno

O cobre, considerado o melhor condutor térmico da atualidade, consegue atingir a marca de 400W/m.K. Seguindo a mesma análise para o GE, em temperatura ambiente, ele consegue atingir a meta de 5000 W/m.K. O que possibilita, por sua vez, uma infinidade de aplicações, com

enfoque em gerenciamento térmico. (SADEGHINEZHAD *et al.* 2016). Quanto maior a concentração de GE, maior será sua condutividade térmica (ESFAHANI E LANGURI, 2017).

De acordo com Sedaghat e Yousefi (2019), estudos obtiveram resultados em que os nanofluidos a base de etilenoglicol, água apresentam um efeito melhorado da condutividade térmica do fluido de transferência de calor em sua taxa de transferência de calor.

Em função da alta condutividade, por consequência, é possível obter melhor desempenho desta nanopartícula em comparação com outras nanoestruturas, até mesmo nanotubos de carbono. Como limitação, o GE não pode se dispersar na água por um longo espaço de tempo. Sendo necessário dessa maneira, de acordo com Ghozatloo *et al.* (2013) tornar o GE funcional, fazendo uso de surfactantes para torná-lo hidrofílico. A consequência dessa atitude é a formação de defeitos gerados ao fluido, que promovem significativamente o espalhamento de fônons e reduzem a condutividade térmica do Grafeno (IZADKHAH *et al.* 2014).

3.5 Computacional Fluid Dynamics (CFD)

O uso de técnicas numéricas para a solução de complexos problemas da engenharia e da física é, hoje, uma realidade, graças ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento. Em função dessa disponibilidade computacional, que cresce exponencialmente, o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas tem recebido enorme atenção dos analistas numéricos. A ampla aceitação dos modelos numéricos pela comunidade interessada na solução desses problemas explica-se pela grande versatilidade e relativa simplicidade de aplicação destas técnicas. A tarefa de um método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes na equação por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Um método analítico que tivesse a habilidade de resolver tais equações nos daria a solução em uma forma fechada e seria possível, então, calcular os valores

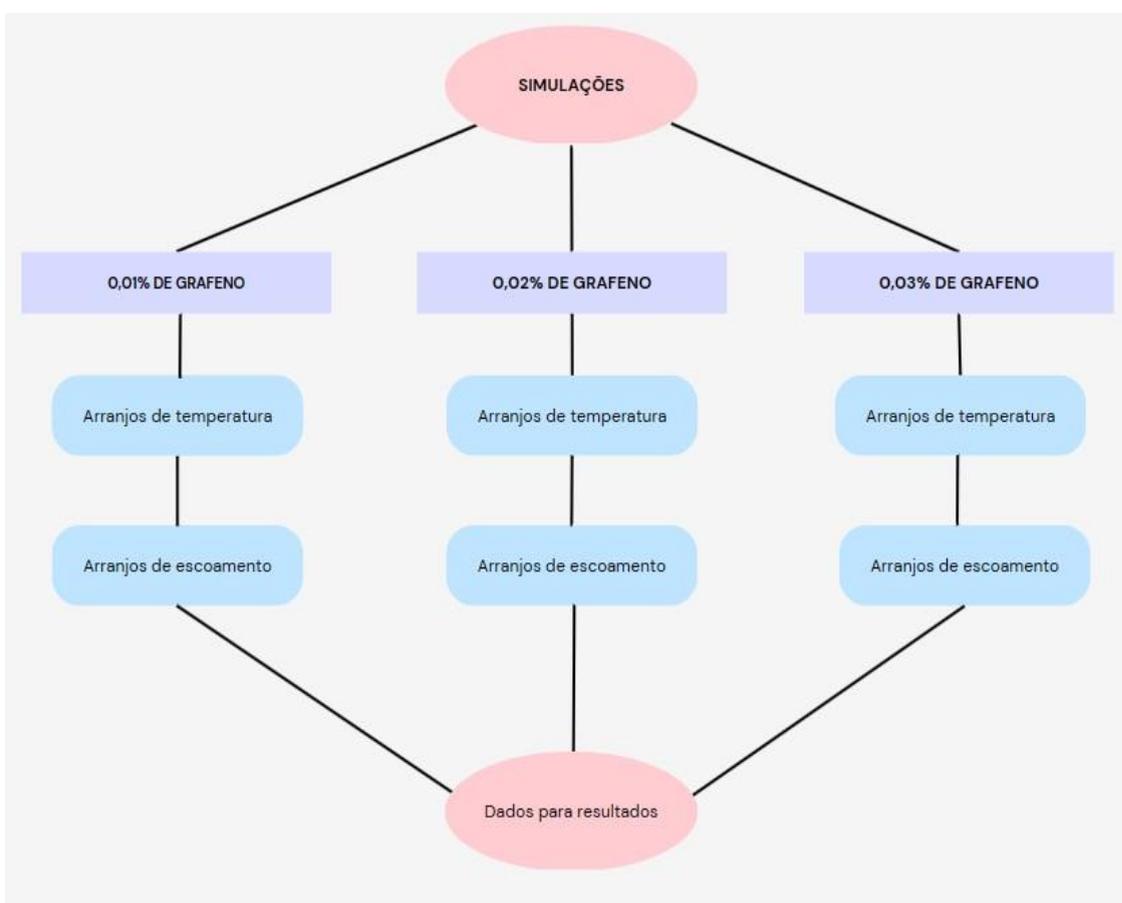
das variáveis dependentes em nível infinitesimal, isto é, para um número infinito de pontos. (MALISKA,2004) .

Na dinâmica dos fluidos computacionais (CFD), os fluidos são governados por equações diferenciais parciais, que trazem consigo, as leis de quantidade de movimento e energia, e conservação da massa. Essa área de pesquisa tem como objetivo avaliar simulações numéricas de escoamento de fluidos, transferência de calor e outros fenômenos relacionados, como combustão, reações químicas e turbulência. (LIMA *et al.*, 2019).

4 METODOLOGIA

O desenvolver dessa tese aconteceu estudando três tipos de nanofluidos diferentes, sendo eles de 0,01% , 0,02% e 0,03% de grafeno em suas concentrações, com temperaturas de trabalho pré estabelecidas de 40°C,50°C e 60°C. Com arranjos específicos para as temperaturas de entrada do fluido quente e também do fluido frio, somado aos arranjos de vazão também pros dois fluidos de troca de calor estudados, esses arranjos são mais detalhados nas tabelas 3 e 4. O fluxo de escoamento estudado no projeto foi o contrafluxo. Todos esses parâmetros se basearam de acordo com Michalewicz *et al.* (2019), (2020), (2022) e Ferreira (2021).

Figura 5 - Fluxograma simulações

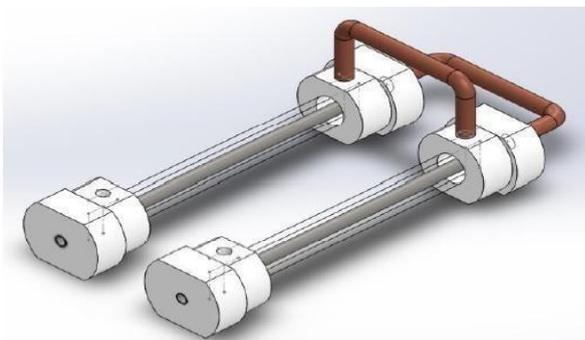


Fonte: Autor (2023).

4.1 Análise Numérica (CFD)

A modelagem computacional do trocador de calor tubo duplo (figura 6) foi realizada por meio do método CFD (Computational Fluid Dynamics), utilizando o SolidWorks para a modelagem física, separando os domínios sólidos e de fluidos.

Figura 6 - Modelo de trocador de calor desenhado no Solidworks



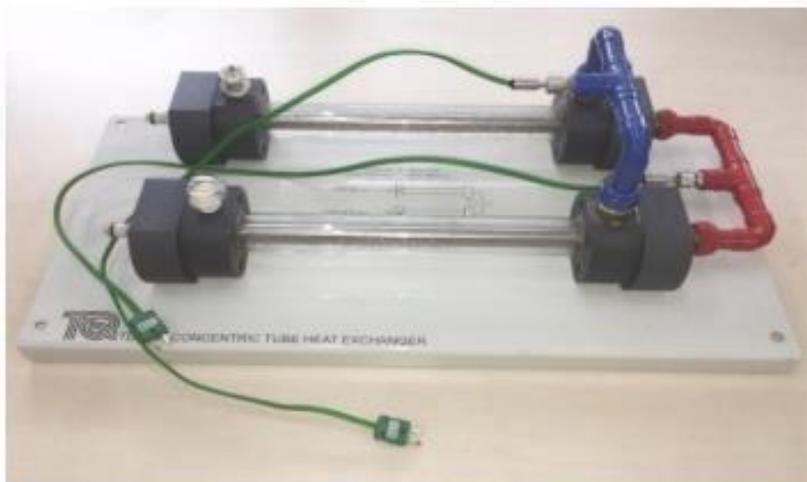
Fonte: Autor (2020).

Com o modelo pronto foi realizada a análise física do problema inserindo as Condições de Contorno (CC's) e simulando com solvers CFD.

Foram realizadas simulações usando a mesma geometria e dimensões do trocador tubo duplo dos testes experimentais utilizadas em pesquisas anteriores. 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 dos Nanofluidos x água.

O desenho do trocador desenvolvido seguiu os parâmetros existentes ao protótipo encontrado no IFPE – Campus Recife. Assim como mostram as imagens a seguir.

Figura 7 - Protótipo físico do trocador de calor tubo duplo



Fonte: Autor (2019).

Figura 8 - Parâmetros do protótipo do trocador de calor

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).

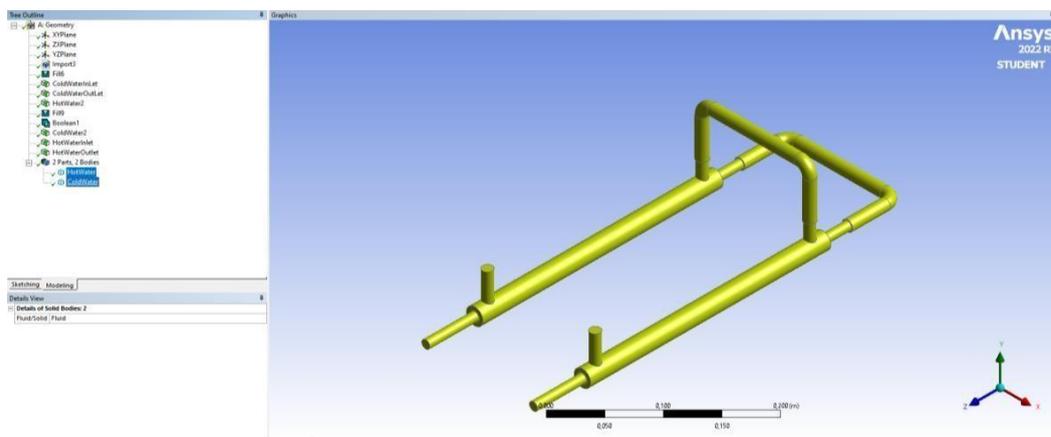
Todos os cálculos e modelos numéricos foram resultantes partindo primeiramente dessas informações. A simulação numérica acontece em 4 etapas, sendo elas as seguintes:

Figura 9 - Etapas simulação CFD

Fonte: Autor (2023).

4.1.1 Geometria/Geometry

A figura 10 apresenta o modelo feito no solidworks do trocador de calor tipo tubo duplo, transferido até a plataforma da Ansys. O mesmo conta com 2 corpos, um referente ao circuito de fluido frio “ColdWater” (tubo externo de maior diâmetro) e outro referente ao circuito de fluido quente “HotWater” (tubo interno de menor diâmetro).

Figura 10 - Trocador de calor no Ansys

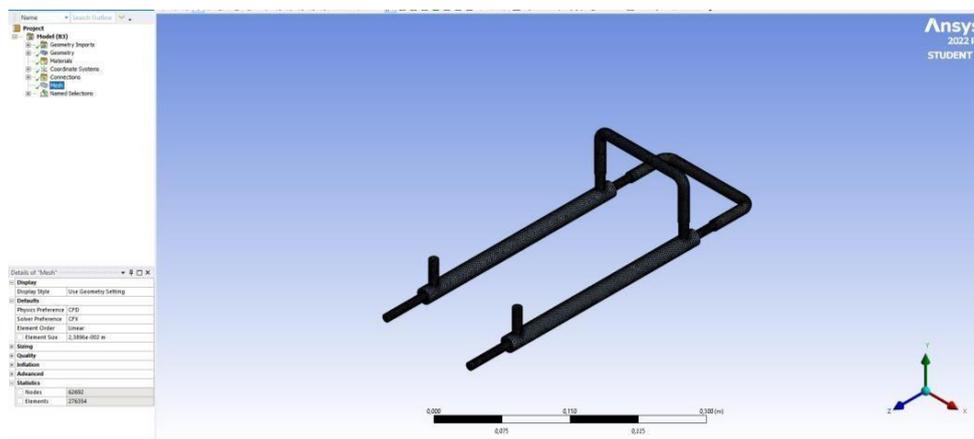
Fonte: Autor (2023)

4.1.2 Malha/Mesh

Na etapa de estabelecimento de malha para obtenção e análise de dados dentro do software, quanto mais refinada a malha, ou seja, quanto maior seu número de nós e elementos, mais preciso serão os resultados. A

figura 11, mostra a interface do software no momento de geração da mesma.

Figura 11 - Malha do trocador de calor no Ansys



Fonte: Autor (2023).

A versão estudiantil do software da Ansys, proporcionado gratuitamente, tem como limite o número de 500.000 elementos. Além dessa limitação, o computador onde a simulação acontece também interfere nesse número, fazendo com que a simulação aconteça lentamente, ou acabe sobrecarregando o dispositivo, inviabilizando o processo. Por esses motivos, tivemos como parâmetros de malha os seguintes valores:

Tabela 1 - Parâmetros da malha no Ansys

PADRÕES	
Preferências Físicas:	CFD
Preferência de Solução:	CFX
Ordem do Elemento:	Linear
Tamanho do Elemento:	0,023869m
ESTATÍSTICAS	
Número de nós:	62692
Número de elementos:	276354

Fonte: Autor (2023).

Com 626692 nós e 276354 elementos, as simulações foram

realizadas no notebook Samsung Book Intel Core i5 8GB 256Gb SSD 11ª Geração. O número de nós e elementos, são de suma importância para a precisão de obtenção de dados, mas, a versão estudantil disponibilizada pelo software dispõe de limitações quanto ao uso desse parâmetro.

4.1.3 Configurações/Setup

De acordo com Silva (2019), baseado na técnica de volumes finitos, o CFX, combina poderosos recursos de pré e pós processamento com um solver bastante avançado. O solver tem capacidade de resolver equações voltadas a mecânicas dos fluidos, como Navier-Stokes e várias outras da área que possam agregar no que diz respeito aos fenômenos de transportes. Através do método dos volumes finitos, este software possibilita explicar os resultados gerados relacionados ao equipamento processado, como por exemplo, velocidade, escoamento, e perfil de temperatura. Chegando até a ir além nos detalhes, como analisar o impacto de inserção de alterações geométricas, aletas, chicanas, ranhuras e superfícies rugosas, como visto em Lima *et. al* (2019).

4.1.3.1 Caracterização do fluido

Para cada percentual de nanofluido a base de grafeno há dados específicos que se fazem necessário na simulação para tornar a modelagem mais real.

Tabela 2 – Propriedades dinâmicas – Nanofluidos e água

Parâmetros	0,01% de grafeno	0,02% de grafeno	0,03% de grafeno	Água
Densidade	945,18 Kg*m ³	957,24 Kg*m ³	965,5 Kg*m ³	997,0 Kg*m ³
Capacidade de calor específico	3897,6 J/Kg*K	3844,46 J/Kg*K	3847,78 J/Kg*K	4181,7 J/Kg*K
Viscosidade Dinâmica	0,0009134 Kg/m*s	0,0009364 Kg/m*s	0,00096 Kg/m*s	0,000889 Kg/m*s
Condutividade térmica	0,58 W/m*K	0,58 W/m*K	0,60 W/m*K	0,60 W/m*K

Fonte: Autor (2023).

4.1.3.2 Equações governantes

Analisando o fluido foram admitidas algumas premissas para se dar início aos cálculos. Primeiramente, os fluidos foram considerados fluidos newtoniano, ou seja, sua viscosidade dinâmica independe da taxa de deformação, com escoamento incompressível permanente, e fluxo de contracorrente em tubos lisos, ou seja, sem rugosidade. Dentre as equações que serviu de suporte para o estudo desenvolvido, tivemos a conservação da massa, conservação de momento (navier-stokes) e conservação de energia, como mostram as equações governamentais em suas formas gerais a seguir, de acordo com Bahiraei *et al.* (2019):

- Conservação de massa:

$$\delta m_x + \delta m_y + \delta m_z - [\delta m_x + \frac{\partial \delta m_x}{\partial x} dx] - [\delta m_y + \frac{\partial \delta m_y}{\partial y} dy] + [\delta m_z + \frac{\partial \delta m_z}{\partial z} dz] = \frac{\partial \delta m}{\partial t} \quad (1)$$

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:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

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;

ρg : é a força gravitacional;

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

- Conservação de Energia:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla(k \nabla T - \sum_j h_j J_j) + S_h \quad (3)$$

4.1.3.3 Processamento de dados

Para a análise de caracterização de transferência de calor por meio da convecção é usado no processamento de dados o balanço de energia e massa dos fluidos estudados (nanofluidos e água) nos trocadores de calor. O estudo é agregado com a avaliação do número de Prandtl, sua eficiência, o coeficiente global de transferência de calor, para que assim, podemos usar a aplicabilidade em diversas áreas industriais.

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 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10, como mostra a seguir. Os dados de temperaturas médias, obtidos com a simulação, juntamente com as vazões mássicas dos fluidos (quentes e frios), são usados com esse conjunto de equações.

$$\dot{m} = \rho VA \quad (4)$$

$$A = \pi D_i L \quad (5)$$

$$V = \frac{4\dot{m}}{\rho \pi D_h^2} \quad (6)$$

$$C_w = (\dot{m}C_p)_w \quad e \quad C_{nf} = (\dot{m}C_p)_{nf} \quad (7)$$

$$q'' = \frac{Q_{ave}}{A} \quad (8)$$

$$q_w = \dot{m}_w C_{p_w} (T_{c2} - T_{c1})_w \quad e \quad q_{nf} = \dot{m}_{nf} C_{p_{nf}} (T_{c2} - T_{c1})_{nf} \quad (9)$$

$$Q_{ave} = \frac{q_{nf} + q_w}{2} \quad (10)$$

Em Abbasian e Amani (2012), é visto a mudança de fase de um fluido pode ser expresso e calculado pela Lei de Resfriamento de Newton, esse feito acontece no cálculo do coeficiente global de transferência de calor por convecção (Eq. 11). Esse coeficiente (h) é um parâmetro determinado experimentalmente, cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção, como as propriedades dos fluidos estudados, a geometria da superfície, a velocidade da massa do fluido em questão e a natureza do movimento do fluido. (ÇENGEL *et. al*, 2012). Ainda de acordo com Çengel *et. al* (2012) A taxa de transferência de calor necessária para alterar o fluido de 1°C ao escoar através de um trocador de calor é definida como a taxa de capacidade térmica.

$$h = \frac{q''}{(T_{wall} - T_{nf})} \quad (11)$$

O método da Diferença de Temperaturas Médias Logarítmicas – LMTDE (Eq. 12), é o método mais coerente para a análise de trocadores de calor que permitem alcançar uma mudança de temperatura específica com vazões mássicas conhecidas, e, também é o método mais utilizado. Com ele, é possível que um trocador de calor que satisfaça as exigências

necessárias na sua utilização para a indústria ou até para as pesquisas em laboratórios.

O ΔT_1 e ΔT_2 são as variações de temperaturas entre o fluido quente e frio em ambas as extremidades (entrada e saída) no trocador de calor:

A partir das equações 5, 8 e 12 pode ser calculado o Coeficiente Global de Transferência de calor – U pela Equação 14 e 14a:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (12)$$

$$\Delta T_1 = T_{h2} - T_{c1} \quad e \quad \Delta T_2 = T_{h1} - T_{c2} \quad (13)$$

$$U = \frac{Q_{ave}}{\Delta T_{LMTD} A} \quad (14)$$

$$U = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \quad (14a)$$

O número de Reynolds, caracteriza o escoamento do fluido em turbulento, se $R \geq 2300$ e laminar se inferior a esse parâmetro. Esse número pode ser obtido de acordo com as fórmulas de número 15, no tubo interno e no anular, respetivamente. Já o número de Prandtl (que é um parâmetro que relaciona a espessura das camadas de limite térmico e velocidade) pode ser calculado através da equação 16.

Em Çengel et al. (2012) Teoricamente, há uma grande dificuldade em lidar com o escoamento turbulento. Por esse motivo, as correlações para os coeficientes de atrito existentes, são baseadas em estudos experimentais. Em tubos lisos, com escoamento plenamente desenvolvido, e para o fluido base como água, o fator de atrito pode ser calculado pela equação de Petukov de 1970. (Eq. 17)

$$Re_{nf} = \frac{\rho V D_i}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi D_i \mu} \quad e \quad Re_w = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi(D_e + D_i)\mu} \quad (15)$$

$$P_r = \frac{C_{pk}}{K} \quad (16)$$

$$f = (0,709 \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad 2300 < Re < 5 \times 10^6 \quad (17)$$

As equações numeradas de 18 à 22, foram utilizadas para verificar e comparar os resultados gerados dos coeficientes de atrito, através das correlações de Von Kármán (Andrade e Carvalho, 2001), Colebrook (1939), Bausius (1908) e Prandtl (ÇENGEL, 2009). A equação 22, em especial, foi utilizada para determinar o fator de atrito dos nanofluido.

$$f = 0,3164 Re^{-0,25} \quad 3000 < Re < 10^5 \quad (18)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (19)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log(\sqrt{f}) - 0,8 \quad (20)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{E}{3,7} \right) \quad (21)$$

$$f = \frac{\frac{\Delta P}{L \rho V^2}}{D^2} \quad (22)$$

Adimensionalizar as equações e combinar as variáveis em estudos dentro da área de transferência de calor por convecção, é uma prática comum, com o objetivo de se reduzir o número total de variáveis. Essa prática somada ao uso do número de Nusselt (Nu), na equação 23, pode adimensionalizar também o coeficiente de transferência de calor (h). DE acordo com Çengel (2009) os tubos de aço inoxidável apresentam rugosidade de $\varepsilon = 0,002$ mm, mas, nesse estudo os tubos foram considerados lisos, com rugosidade desprezível $\varepsilon = 0$.

$$\text{Nu} = \frac{hD_h}{k} \quad (23)$$

Nas equações 24, 25 e 26 descritas para escoamentos turbulentos plenamente desenvolvidos em tubos sem rugosidades, com fluidos internos monofásicos e com números de nusselt, podemos encontrar as correlações empíricas propostas por Dittus-Boelter, Petukhov (1970) e Gnielinski (1975). Em Çengel (2009) é dito que quanto maior for o número de Nusselt, mais eficaz será a convecção. 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 sua camada é representado pelo Nu. Apesar da equação de Dittus-Boelter ser umas das mais utilizadas equações dentro da literatura, a mesma possui erros implícitos de até 25%. Por outro lado, Petukhov e Gnielinski são menos utilizadas, mais complexas, e com melhor precisão e erros consideravelmente reduzidos, em torno de 10%.

$$\text{Nu} = 0,023\text{Re}^{0,8}\text{Pr}^{0,4} \quad \text{Re} > 10000; 0,6 \leq \text{Pr} < 160; \frac{L}{D} > 10 \quad (24)$$

$$\text{Nu} = 0,023\text{Re}^{0,8}\text{Pr}^{0,4} \quad \text{Re} > 10000; 0,6 \leq \text{Pr} < 160; \frac{L}{D} > 10 \quad (25)$$

$$\text{Nu} = \frac{\frac{f}{s}(\text{Re}-1000)\text{Pr}}{1+12,7\left(\frac{f}{s}\right)^{0,5}\left(\text{Pr}\left(\frac{2}{3}\right)-1\right)} \quad 10^4 < \text{Re} < 5 \times 10^6; 0,5 < \text{Pr} < 200 \quad (26)$$

Em caso de escoamento laminar o Nusselt pode ser dado a partir da seguinte figura, se apresentar as características: Escoamento interno, Região anular do tubo, em Regime laminar, como mostra imagem a seguir.

Figura 12 - Número de Nusselt em escoamento laminar

D_f/D_o	Nu_f
0	—
0,05	17,46
0,10	11,56
0,25	7,37
0,50	5,74
≈1,00	4,86

Fonte: Incropera (2014).

A equação que define o fator de atrito, anteriormente descrita nessa seção (Eq. 22) é utilizada como base, para encontrar a perda de carga que estejam atreladas à altura adicional que o fluido deve ser elevado pela bomba a qual o sistema estiver relacionado. A partir do momento que a perda de carga é conhecida, para superar a resistência ao escoamento associado a perda de carga, podemos determinar a potência de bombeamento (\dot{W}), pela equação 27.

$$\dot{W} = \frac{\dot{m}\Delta p}{\rho} \quad (27)$$

A partir da equação 9, descrita anteriormente nessa seção é definida efetividade da transferência de calor (ε) (Eq. 28,28a e 28b) encontrado nos trocadores de calor, já a equação 29, também descrita nessa seção, nos permite chegar, onde a variável “Cmin” é considerada como o valor mínimo que conta na 7ª equação deste parágrafo.

$$\varepsilon = \frac{Q_{ave}}{q_{max}} \quad (28)$$

$$\epsilon_{nf} = \frac{C_{nf}(T_{h1} - T_{h2})}{C_w(T_{h1} - T_{c2})} \quad (28a)$$

$$\epsilon_w = \frac{C_w(T_{c1} - T_{c2})}{C_w(T_{h1} - T_{c2})} \quad (28b)$$

$$q_{max} = C_{min}(T_{h1} - T_{c1}) \quad (29)$$

Findando a demonstração de cálculos utilizada no desenvolver desta obra, é possível iniciar-se o processamento de obtenção de dados.

4.1.4 Pós processamento – Resultados/Results

Nesse cenário juntamente com o setup/configurações criamos uma parametrização. Com variáveis de entrada necessária para a simulação acontecer, e variáveis de saída, que o próprio programa nos responde, tomando como base todas as informações inseridas na etapa das configurações. Aqui, também é possível inserir as fórmulas precisas para calcular os resultados desejados, como mostra a figura 13.

Figura 13 - Expressões CFD - Ansys

Expressions	
Accumulated Time Step	130
CCOLD	QCOLD*CP/COLD
CHOT	QHOT*CP/HOT
CPCOLD	4178
CPHOT	3842
Current Phase Position	0
Current Time Step	130
DELTATCOLD	TCOLDOUT-TCOLDIN
DELTATHOT	THOTIN-THOTOUT
DPCOLD	areaAve(Pressure)@ColdWaterInlet - areaAve(Pressure)@ColdWaterOutlet
DPHOT	areaAve(Pressure)@HotWaterOutlet - areaAve(Pressure)@HotWaterInlet
EFETIVIDADECOLD	CCOLD*DELTATCOLD/(CCOLD*(THOTIN-TCOLDIN))
EFETIVIDADEHOT	(CHOT*DELTATHOT)/(CCOLD*DELTATCOLD)
EFF	(EFFCOLD + EFFHOT)/2
EFFCOLD	(areaAve(Temperature)@ColdWaterOutlet - areaAve(Temperature)@ColdWaterInlet)/(areaAve(Temperature)@HotWaterOutlet - areaAve(Temperature)@ColdWaterInlet)*100
EFFHOT	100*(areaAve(Temperature)@HotWaterOutlet - areaAve(Temperature)@HotWaterInlet)/(areaAve(Temperature)@HotWaterOutlet - areaAve(Temperature)@ColdWaterInlet)
Phase	Current Phase Position
QCOLD	0.0425 [kg s ⁻¹]
QHOT	0.0085 [kg s ⁻¹]
Reference Pressure	1 [atm]
Sequence Step	130
TCOLDIN	27.7 [C]
TCOLDOUT	maxVal(Temperature)@Point 1
THOTIN	40.6 [C]
THOTOUT	maxVal(Temperature)@Point 2
Time	0 [s]
atstep	Accumulated Time Step
ctstep	Current Time Step
ssstep	Sequence Step
t	Time

Fonte: Autor (2023).

Tabela 3 - Temperaturas de entrada para simulações

40° C		50° C		60° C	
Te (°C)	Te (°C)	Te (°C)	Te (°C)	Te (°C)	Te (°C)
40,6	27,7	48,4	30,6	54,90	26,9
40,6	28	48,3	29,5	55,50	26,6
39,9	28,3	49,3	29,4	56,80	26,5
40,7	28,8	48,8	29,6	58,30	26,3
39,4	29	48,9	29,7	58,10	26,3
HOT	COL D	HOT	COL D	HOT	COL D
39,3	28,3	49	28,4	59,1	25,8
39,6	29,5	49,4	29	59,4	25,9
39,9	29,5	49,2	28,7	58,8	25,9
40,6	29,7	49,1	28,2	58,3	26,1
39,5	30	48,9	27,4	58,2	25,8

Fonte: Autor (2023).

Tabela 4 - Arranjo de vazões para os fluidos durante a simulação

VAZÃO DOS FLUIDOS (Kg*s)	Arranjo	Fluido quente	Fluido frio
	1	0,5	2,5
2	1	2,5	
3	1,5	2,5	
4	2	2,5	
5	2,5	2,5	
6	2,5	0,5	
7	2,5	1	
8	2,5	1,5	
9	2,5	2	
10	2,5	2,5	

Fonte: Autor (2023).

A tabela 3 e 4 são provenientes dos arranjos de vazões criados para simulações tanto no que diz respeito a vazão, como também ao arranjo de temperaturas, levando em consideração pesquisas anteriormente já desenvolvidas em âmbitos experimentais.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

Para início dos tratamentos de dados pós realização das simulações, foi gerado uma planilha no Excel com o objetivo de facilitar e entender melhor os dados por experimento, assim como os anexos contidos no apêndice desta obra. Apesar do trabalho em 3 temperaturas diferentes, os resultados mais pertinentes foram os trabalhados em 60° C.

Nela a partir dos cálculos realizados com os dados obtidos via simulação conseguimos definir, o número de Reynolds, o tipo de escoamento, o número de Nusselt, o fator entre diâmetros para encontro do Nusselt em caso particular do escoamento laminar, o coeficiente de convecção dos fluidos, a efetividade dos fluído, a perda de carga para cada fluido analisado e o coeficiente global de transferência de calor para aquele sistema, como demonstra imagens de resultados no apêndice desta tese.

5.1 Escoamento e o número de Reynolds

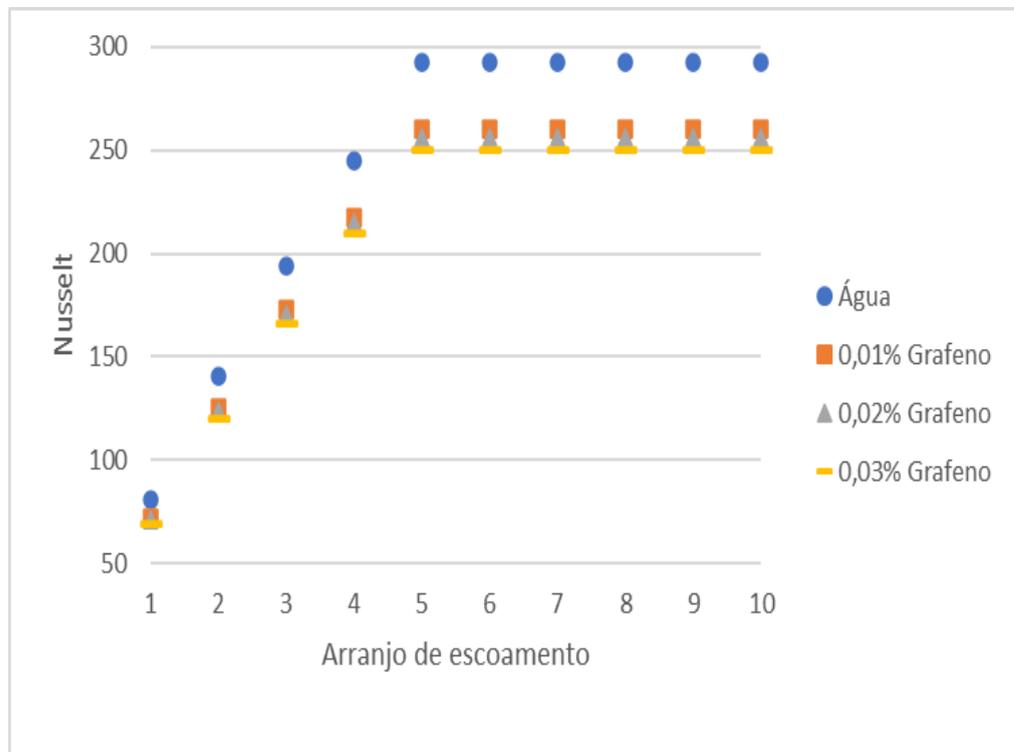
O número de Reynolds (Re), é um número adimensional que define o regime de escoamento de fluxos entre escoamento laminar ($Re < 2300$) ou turbulento ($Re \geq 2300$). O comportamento de escoamento entre as simulações realizadas, seguiram o mesmo padrão entre os fluidos.

5.2 Comportamento do número de Nusselt

O número de Nusselt está totalmente ligado ao número de Reynolds de maneira proporcional, ou seja, quanto maior o número de Reynolds, maior será o número de Nusselt. E, é através dele que encontramos o coeficiente de

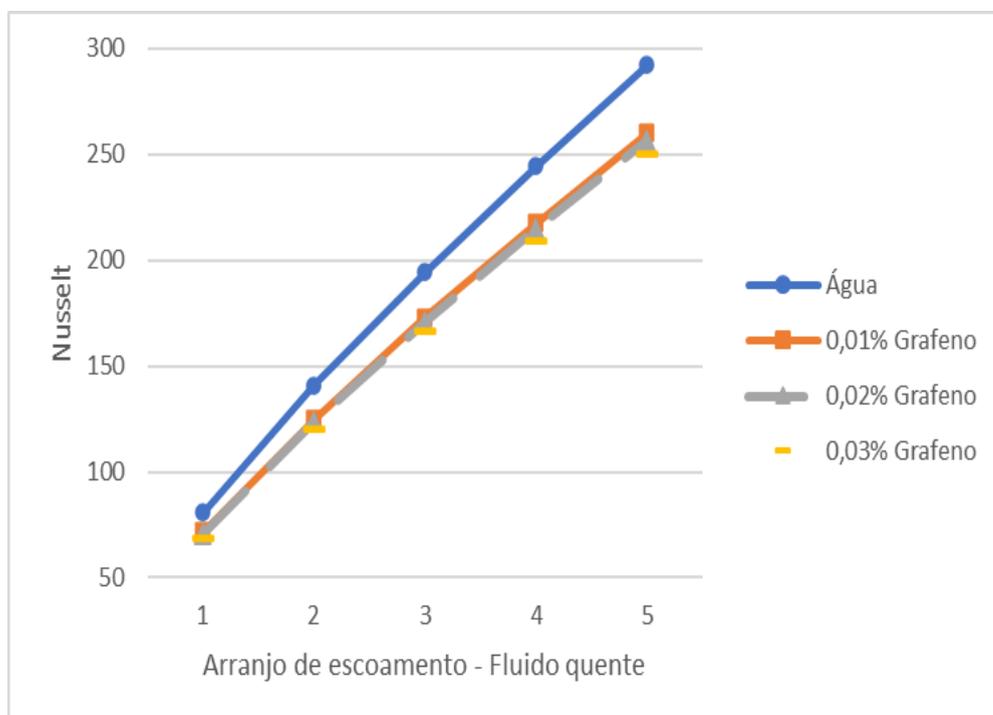
transferência de calor por convecção dos fluidos (h). Assim como o número de Reynolds, os coeficientes também se comportam de maneira diretamente proporcional.

Gráfico 1 - Número de Nusselt x escoamento: Fluido quente



Fonte: Autor (2023).

Aqui os 5 primeiros arranjos acontecem de forma que o fluido quente a cada novo arranjo, sofre alteração na sua vazão. E assim como a sua vazão apresenta um crescimento, o número de Nusselt por sua vez acompanha o dado no que tangeo seu comportamento.

Gráfico 2 - Nusselt x escoamento: Fluido quente variando

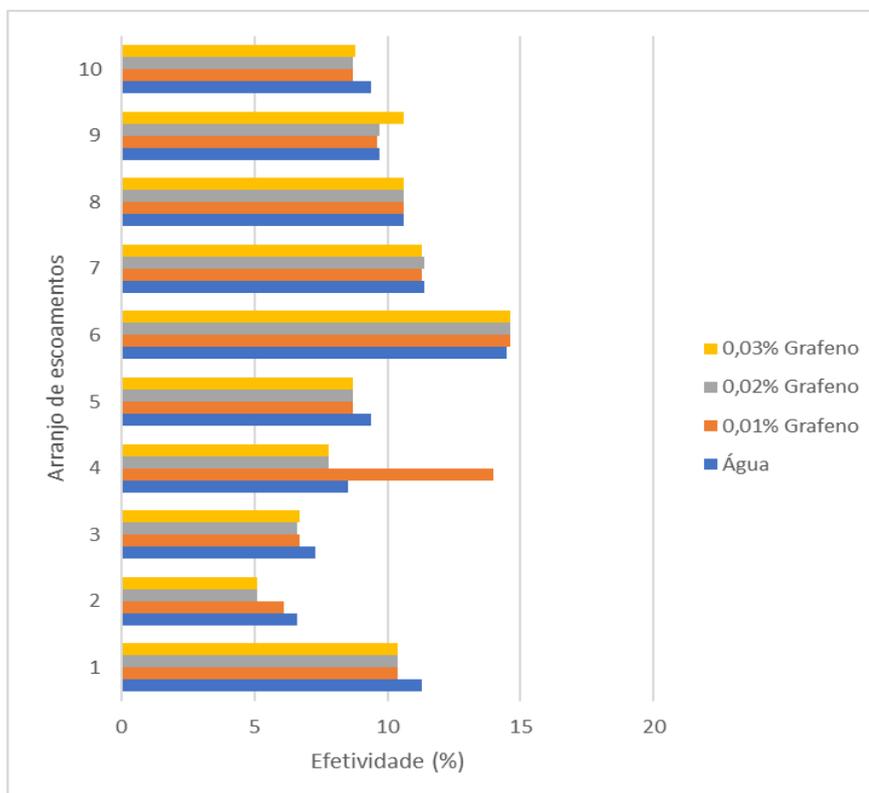
Fonte: Autor (2023).

A partir do 5º arranjo em diante, o fluido quente não sofre mais alteração da sua vazão, permanecendo constante no valor de 0,0425 kg*s, e o número de Nusselt chega a assumir nesses pontos valores de 292,41 para a água, 260,25 para o nanofluido de grafeno a 0,01% de concentração, 256,58 para 0,02% de Grafeno e 250,91 para a concentração de 0,03% de grafeno.

5.3 Efetividade dos fluidos

A efetividade térmica diz respeito ao máximo de transferência de calor possível no trocador de calor em estudo (teórico) comparado ao real (físico ou simulação).

Gráfico 3 - Efetividade térmica x escoamento



Fonte: Autor (2023).

O gráfico apresentado anteriormente, mostra todos os arranjos de escoamento possíveis e os fluidos analisados. Enquanto a variação da vazão do fluido quente (5 primeiros arranjos), há uma não proporcionalidade entre os resultados obtidos. À medida que a vazão aumenta, nem sempre em todos os pontos a efetividade também aumenta, assim como mostra o escoamento do arranjo

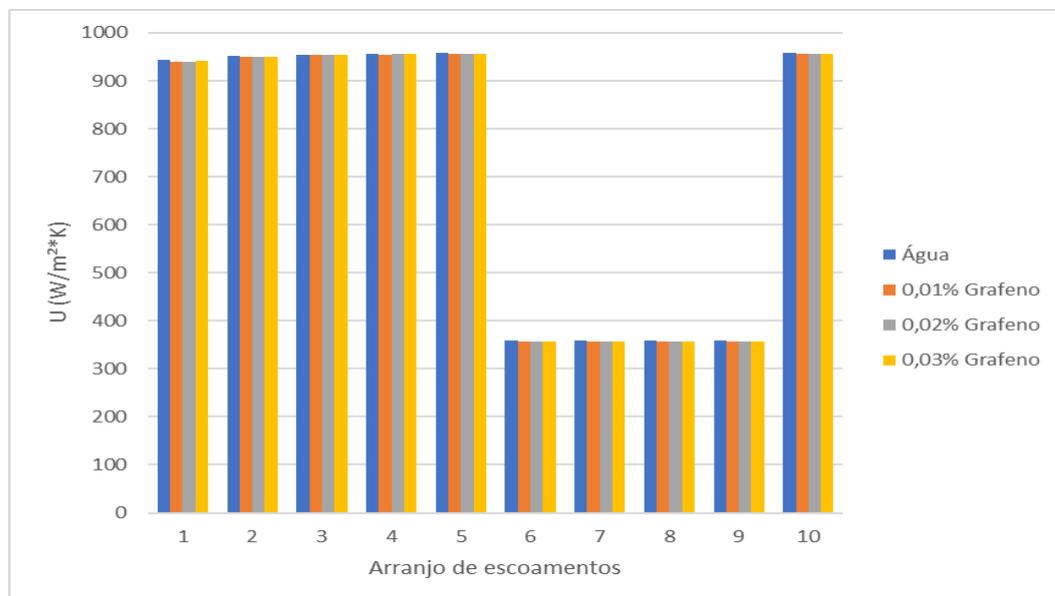
2. No 6º arranjo (vazão fluido quente: 0,0425 kg.s; vazão fluido frio: 0,0085 kg.s) chegamos aos picos de efetividade máxima, para todos os fluidos. O gráfico mostra uma leve superioridade dos nanofluidos, quando comparados à água. Efetividade a água 14,35 %, efetividade dos nanofluidos 14,6%. A partir do 6º arranjo os valores entre as efetividades dos fluidos ficam bem próximos uns aos outros. Mostrando assim, que quando a vazão máxima do fluido quente está fixada, melhor se comporta

a efetividade dos fluidos. (SADEGHINEZHAD *et al.* 2016). Isso devido a sua alta condutividade térmica do grafeno, que sugere melhor desempenho desta nanopartícula em comparação com outras nanoestruturas. (REN *et al.* 2018).

5.4 Coeficiente Global de Transferência de calor (U)

O coeficiente global de transferência de calor se refere ao quão bem o calor é conduzido através de uma série de meios resistentes. Ou seja, apesar do circuito e do ambiente no qual o fluido se encontra, quanto que essa troca térmica é eficaz.

Gráfico 4 - Coeficiente Global de Transferência de calor x escoamento: Fluidosquentes



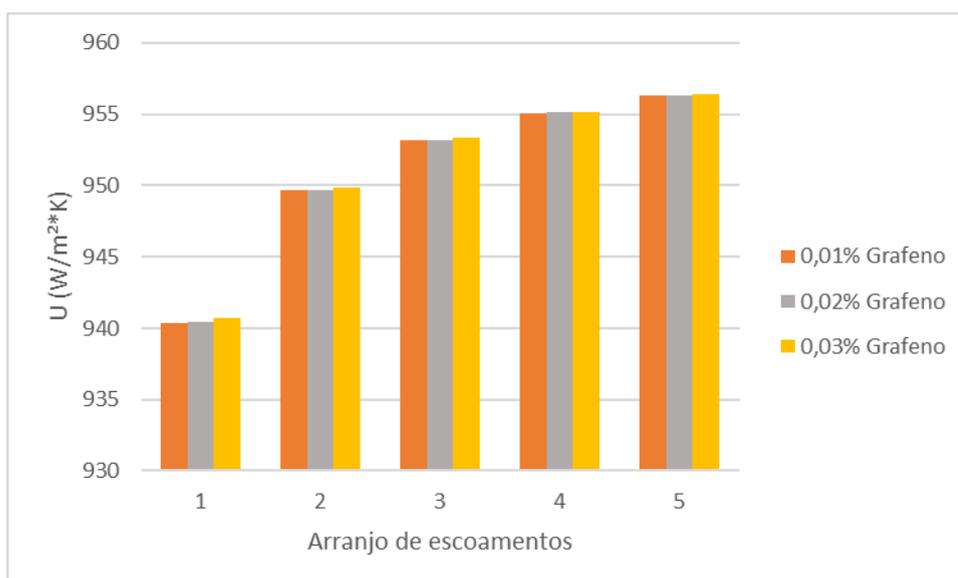
Fonte: Autor (2023).

Nos arranjos de 1 ao 5 (gráfico 5), todos os escoamentos entre fluidosquentes e frios, são turbulentos, assim como também no arranjo 10 (gráfico 6), já nos arranjos 6 a 9 (gráfico 6), os escoamentos são laminares, para o fluido frio, como Nusselt, mais baixo, haja vista que seu Nusselt está atrelado a figura anteriormente apresentada encontrada em Incropera 2014. E, também para esses pontos em que o escoamento laminar se aplica, temos os menores valores de U, assim como mostra o

gráfico 6.

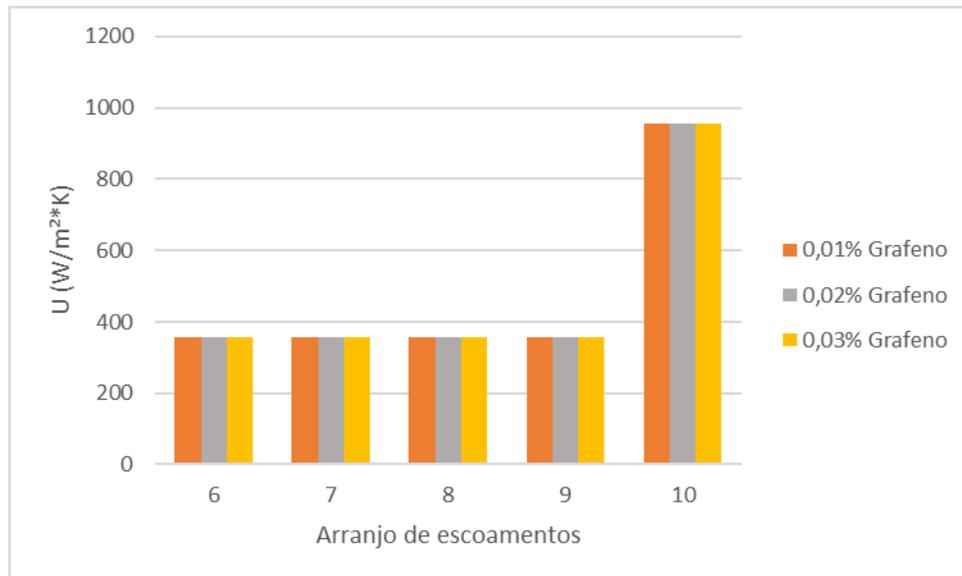
Já no gráfico 5, temos os 5 primeiros arranjos de escoamento com a vazão o fluido quente (nanofluidos em questão), aumentando progressivamente a cada nova combinação, o que perceptivelmente, mostra também o acréscimo da propriedade analisada U . Corroborando a pesquisa desenvolvida em 2017 por Han *et al.*, aqui quanto maior a percentagem de nanopartículas sólidas de grafeno dissolvidas no fluido, melhor a transferência de calor entre os nanofluidos produzidos.

Gráfico 5 - Coeficiente Global de Transferência de calor dos Nanofluidos com vazão quente variando.



Fonte: Autor (2023).

Gráfico 6 - Coeficiente global de transferência de Calor dos Nanofluidos com vazão quente fixa



Fonte: Autor (2023).

Com os 3 gráficos anteriores, para os nanofluidos, à medida que a sua concentração aumenta, também se acresce o seu coeficiente. Ou seja, a transferência de calor do nanofluido de 0,01% < 0,02% < 0,03%. O ponto máximo do nanofluido acontece nos arranjos 5 e 10 na concentração de 0,03%, com a combinação de 0,0425 kg*s de vazão para o fluido quente e 0,0425 kg*s para o fluido frio, com o coeficiente no valor de 956,38 W/m²*K. No máximo das vazões estudadas. (ESFAHANI E LANGURI, 2017). (SEDAGHAT e YOUSEFI, 2019).

A água por sua vez em todos os pontos ela se comporta de maneira superior ao nanofluido, chegando a ter seus pontos máximos também nos arranjos 5 e 10, no valor de 957,45 W/m²*K.

Tabela 5 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor global: Água x Nanofluido

U Água - 60C (W/m ² *K)	U 0,03% de Grafeno - 60C (W/m ² *K)	ΔU (%)
944,47	940,7	0,400765
952,06	949,86	0,231613
954,93	953,32	0,168883
956,47	955,19	0,134005
957,45	956,38	0,11188
358,04	357,89	0,041912
358,04	357,89	0,041912
358,04	357,89	0,041912
358,04	357,89	0,041912
957,45	956,38	0,11188

Fonte: Autor (2023).

Gráfico 7 - Variação percentual entre os coeficientes de transferência de calor



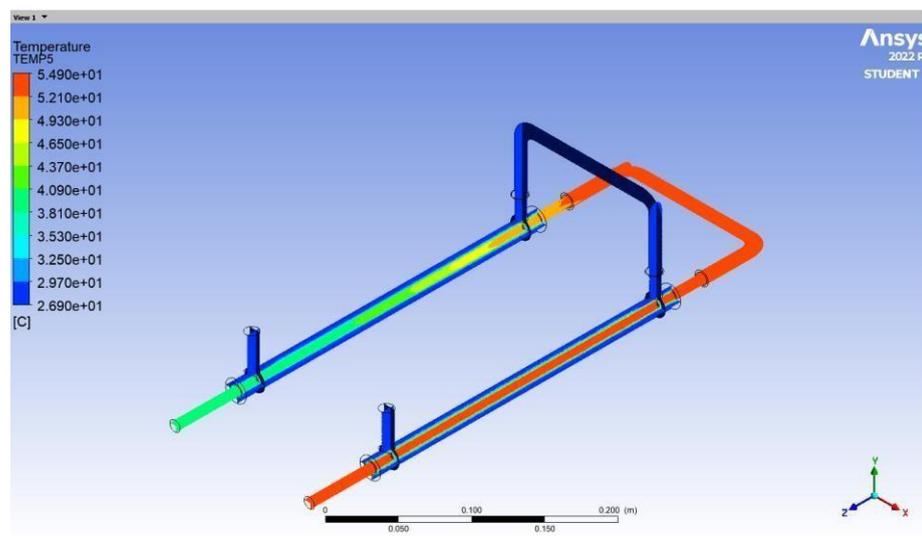
Fonte: Autor (2023).

A tabela 5 e o gráfico 7 mostram o percentual referente a diferença entre os dados obtidos no que diz respeito ao coeficiente de transferência de calor encontrado entre o nanofluido (0,03% de grafeno) que melhor se apresentou e a água. Mostrando que, a medida que se aumenta a vazão do fluido quente (arranjos de 1 ao 5), menor vem sendo essa diferença, ou seja, mais próximos os valores vão ficando um do outro. E que quando mantemos o fluido quente numa vazão fixa, com o fluido frio variando (arranjos de 6-10), os arranjos de 6 à 9 se comportam constantes, devido ao seu escoamento laminar.

5.5 Comportamento do modelo computacional – Ansys

A figura a seguir apresenta o resultado do comportamento da temperatura interna dentro do trocador de calor tubo duplo no modelo CFD, em vista 3D. A barra de cores mostra uma variedade de acordo com a intensidade da temperatura, de azul a vermelho indicando a faixa de temperatura do mínimo ao máximo em todo o escoamento do trocador. Nela podemos perceber que na entrada do 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 a saída do nanofluido e entrada da água, ocorre nas partes finais do trocador de calor a maior transferência de calor presente nos fluidos.

Figura 14 - Simulação numérica: Temperatura

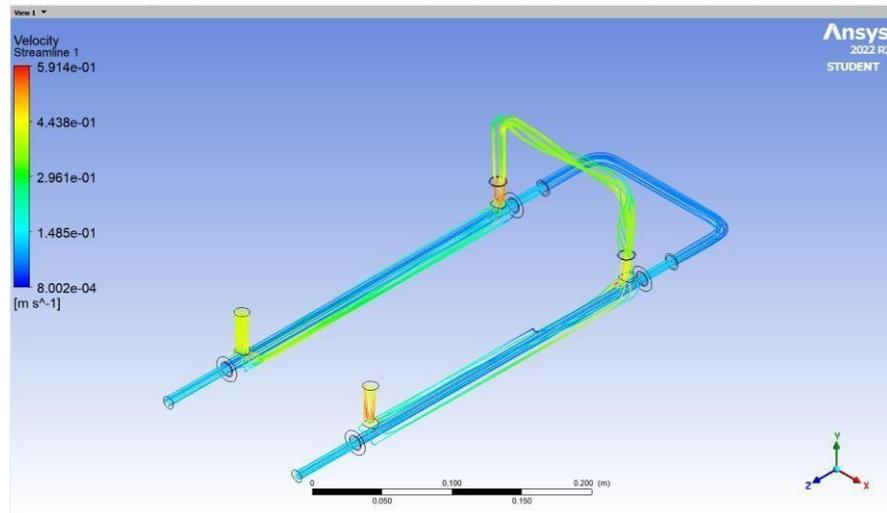


Fonte: Autor (2023).

O comportamento das linhas de corrente (streamlines) de fluxo interno no trocador de calor tubo duplo é apresentado na Figura 15, nela podemos perceber que os vetores de velocidade foram aplicados nas entradas e saídas no sentido contra fluxo. Conforme o modelo, 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 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).

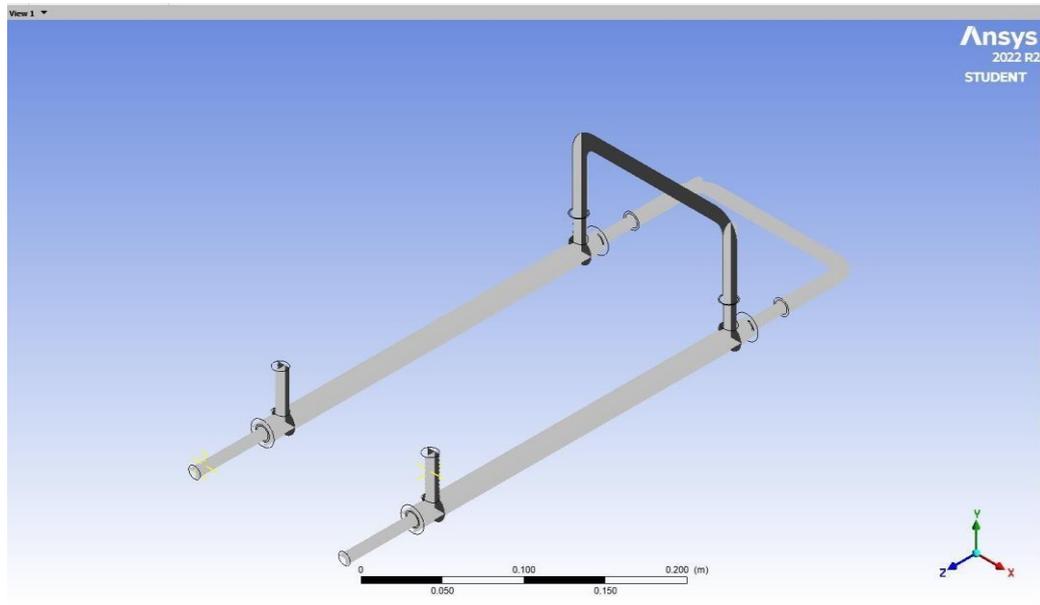
Figura 15 - Simulação numérica: Velocidade de escoamento



Fonte: Autor (2023).

Na simulação foi possível aplicar dois monitores (em amarelo), na figura 16, que possibilitaram o mapeamento das temperaturas tanto para o fluido quente, quanto para o fluido frio. A partir daí, culminado com as expressões adicionadas ao software foi possível retirar informações que serviram como base para cálculos e todos os resultados mostrados anteriormente (figura 17).

Figura 16 - Simulação numérica: Monitor de temperatura



Fontem: Autor (2023).

Figura 17 - Simulação numérica: Resultados

Table of Design Points										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Name	P4 - QCOLD	P5 - QHOT	P6 - TCOLDIN	P7 - THOTIN	P1 - EFF	P2 - DPHOT	P3 - DPCOLD	P8 - THOTOUT	P9 - TCOLDOUT
2	Units	kg s ⁻¹	kg s ⁻¹	C	C		Pa	Pa	C	C
3	DP 0 (Current)	0,0425	0,0085	26,9	54,9	30,086	19,231	454,68	38,86	27,744
4	DP 1	0,0425	0,017	26,6	55,5	9,6269	68,497	454,67	51,474	28,181
5	DP 2	0,0425	0,0255	26,5	56,8	9,5112	149,14	454,68	53,13	28,641
6	DP 3	0,0425	0,034	26,3	58,3	9,3863	263,2	454,68	54,891	28,955
7	DP 4	0,0425	0,0425	26,3	58,1	9,4034	412,17	454,68	55,075	29,325
8	DP 5	0,0085	0,0425	25,8	59,1	23,358	412,17	19,495	58,081	40,382
9	DP 6	0,017	0,0425	25,9	59,4	23,899	412,17	73,551	57,766	40,236
10	DP 7	0,0255	0,0425	25,9	58,8	11,082	412,17	163,28	56,553	30,946
11	DP 8	0,034	0,0425	26,1	58,3	9,5779	412,17	289,93	55,592	29,631
12	DP 9	0,0425	0,0425	25,8	58,2	9,4029	412,17	454,68	55,118	28,881
*										

Fonte: Autor (2023).

6 CONCLUSÕES

A simulação computacional CFD é de extrema importância, haja vista que podemos ter acesso a todos os resultados antes mesmo de um teste experimental. Aqui é possível entender e corrigir erros, tentando minimizar futuros problemas em análises experimentais.

O trocador de calor desenvolvido no modelo numérico nos permite avaliar alguns parâmetros o que diz respeito a preparação do nanofluido. É de suma importância o estudo de variáveis como fator de atrito, coeficiente global de transferência de calor, número de Nusselt, pois, os mesmos desempenham papel fundamental no comportamento de um sistema eficaz.

Foi possível observar que na simulação, o uso de nanofluido no trocador de calor, ofereceu um ganho de 7°C , aproximadamente, um ganho de 26% de temperatura, quando comparados a simulação com o fluido base água.

O aumento da condutividade térmica do fluido com a adição de nanopartículas, promove um comportamento proporcional entre as grandezas de concentração de grafeno no nanofluido, Reynolds e Nusselt. Ou seja, quanto mais a concentração do nanofluido, maior o número de Reynolds, e maior o número de Nusselt. No gráfico 2 também é possível visualizar que, a água se mantém superior no quesito número de Nusselt, quando comparado aos três nanofluidos estudados. E dentre os nanofluidos, o de 0,03% de concentração apresenta o maior valor dos demais. Em outras palavras, o nanofluido a base grafeno com concentração 0,03% é o fluido mais próximo do fluido água, o que tangencia o comportamento referente ao número de Nusselt.

O nanofluido utilizado também apresenta comportamento de grandeza proporcional, quando relacionamos a concentração do fluido, ao número de Reynolds, e a temperatura de trabalho, juntamente ao coeficiente global de transferência de calor (U).

Embora o grafeno tenha incríveis propriedades térmicas cientificamente comprovadas. As concentrações aqui estudadas, no circuito

em contra fluxo com o nanofluido no fluxo de fluido quente, ainda não viabilizaram a implementação e uso do nanofluido como fluido para transferência de calor, haja vista que, mesmo que por pouco, a nossa concentração de 0,03% de grafeno ainda se manteve inferior nos resultados obtidos. A água no caso, se manteve superior, 0,4%, no que diz respeito a eficiência da troca térmica.

Embora o grafeno tenha incríveis propriedades térmicas cientificamente comprovadas. As concentrações aqui estudadas, no circuito em contra fluxo com o nanofluido no fluxo de fluido quente, ainda não viabilizaram a implementação e uso do nanofluido como fluido para transferência de calor, haja vista que, mesmo que por pouco, a nossa concentração de 0,03% de grafeno ainda se manteve inferior nos cálculos obtidos. A água no caso, se manteve superior, apenas 0,4%, na melhor das hipóteses.

7 PROJETOS FUTUROS

Apesar dos nanofluidos estudados não ultrapassarem a água em termos de troca térmica, e seu uso ainda não ser recomendado em âmbito de implementação industrial. Em âmbito pesquisa/acadêmico o fato de chegar tão próximo é um resultado positivo. Em estudos futuros é possível utilizar outros nanofluidos a base de Grafeno, como o Óxido de Grafeno ou o Grafeno Reduzido e comparar com este estudo. Trabalhar com outras concentrações em um outro tipo de circuito visto pelo projeto desenvolvido, talvez, avaliar o nanofluido agora, em fluxo frio, ao invés do quente poderia proporcionar resultados diferentes. Além dessas opções, desenvolver geometrias internas, que tendam a aumentar o regime de escoamento e os demais parâmetros que possam impactar num coeficiente global de transferência de calor ainda maior. A infinidade de possibilidades é imensa. Tudo isso com o objetivo de se obter um maior coeficiente global de transferência de calor, e assim uma maior eficiência em comparação com a água.

REFERÊNCIAS

ABBASIAN, A. A.A.; AMANI, J. Experimental study on the effect of TiO₂-water nanofluid on heat transfer and pressure drop. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 42, p. 107– 115, 2012.

AMEEL, B., Degroote, J., T'Joel, C., Huisseune, H., Schampheleire, S., Vierendeels, J., Paepe, M. Accounting for the effect of the heat exchanger length in the performance evaluation of compact fin and tube heat exchangers. **Applied Thermal Engineering**, 65; 2014.

ARAÚJO, E. C. C. Trocadores de calor. Série Apontamentos, EdUFSCAR: São Carlos, 2002.

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.

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.

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.

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 Conversion and Management**, v. 180, p. 72-82, 2019a.

BAHIRAEI, M.; MAZAHERI, N.; RIZEHVANDI, A.; Application of a hybrid nanofluid containing Graphene nanoplatelet-platinum composite power in a triple-tube heat exchanger equipped with inserted ribs. **Applied Thermal Engineering**, v. 149, p. 588- 601, 2019b.

BORDIGNON, R. **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.

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.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. São Paulo:McGraw-Hill, 2009.

ÇENGEL, Yunus A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

DUTRA, C. J. C., PRIMO, A. R., MAGNANI, F. S., HENRÍQUEZ, G. J. R. Relatório Final do Projeto P49 – **Projeto COGENCASA**. Universidade Federal de Pernambuco.UFPE. Recife 2009.

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-MAGHLANY, W., HANAFY, A. A., HASSAN, A. A., & EL-MAGID, M. A. (2016). Experimental study of Cu-water nanofluid heat transfer and pressure drop in a horizontal double-tube heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 78(May), 100–111.

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

FENG, H., Zhong, W., Wu, Y., Tong, S. Thermodynamic performance analysis and algorithm model of multipressure heat recovery steam generators (HRSG) based on heat exchangers layout. **Energy Conversion and Management**, 81; 2014.

FERREIRA, J. M. G. A. ; MICHALEWICZ, J.S. . Análise experimental e simulação CFD de trocadores de calor tubo duplo com fita torcida utilizando nanofluido de grafeno.**XVI Congresso de Iniciação Científica do Ifpe**, 2021, Recife-PE. XVI CONIC.Recife-PE, 2021.

Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn. **Principles of heat transfer**. 7th edition. USA. Cengage Learning, 2011.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. **The rise of graphene**. Nature Materials, v.6, P. 183-191, 2007.

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.

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.

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

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.

HAN, D., HE, W. F., & ASIF, F. Z. (2017). Experimental study of heat transfer enhancement using nanofluid in double tube heat exchanger. **Energy Procedia**, 142, 2547–2553.

HAN, H., He, Y., Tao, W., Li, Y. A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 72; 2014.

HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, JR. R. E. **Preparation of Graphitic Oxide**. National Lead Company, p. 1339, 1957.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, P. David; BERGMAN, L. Theodore; LAVINE, S. Adrienne. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6ª Edição, Rio de Janeiro: 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.

JEONG, H. Surface modification of Graphene Nanoparticles by Acid Treatment and Grinding Process. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 18, p. 645-650, 2018.

KHEDKAR, R. S.; SONAWANE, S. S.; WASEWAR, K. L.; Heat transfer study on concentric tube heat exchanger using TiO₂-water-based nanofluid.

International Communications in Heat and Mass Transfer, v. 57, p. 163-169, 2014.

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.

LIMA, A. A. S.; OCHOA, A. A. V.; COSTA, J. A. P. DA; HENRÍQUEZ, J. R.; CFD 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.

MALISKA, C. R., 2004, “**Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**”, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos.

MICHALEWICZ, J.S.; FERREIRA, J. M. G. A. Comparação entre diversas concentrações do nanofluido de grafeno em trocadores de calor tipo tubo duplo usando análise experimental e CFD. **XV Congresso de Iniciação Científica do Ifpe**, 2020, Recife.

MICHALEWICZ, J.S.; FERREIRA, J. M. G. A. Análise experimental de trocadores de calor tubo duplo utilizando nanofluido. **II JIPEEIS- Jornada Internacional de Pesquisa, Ensino, Extensão, Inovação e Sustentabilidade**, 2019, Recife-PE. v. 1.

MICHALEWICZ, J.S. ; FERREIRA, J. M. G. A. ; COSTA, J. A. P. ; MENEZES, F. D. ; ALVES, J. V. P. . Estudo de concentrações do nanofluido a base de grafeno em trocadores de calor do tipo tubo duplo usando análise experimental e simulação CFD. **CONEM-Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2022, Terezina-PI.

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

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 mllly thin carbon films. Science**, v.306, P. 666-669, 2004.

PALANISAMY, K., & KUMAR, P. C. M. (2017). Heat transfer enhancement and pressure drop analysis of a cone helical coiled tube heat exchanger using WCNT/water nanofluid. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, 10(Speciallssue),7–13.

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.

SADEGHINEZHAD, E.; MEHRALI, M.; SAIDUR, R.; MEHRALI, M.; LATIBARI, S. T.; AKHIANI, A. R.; METSELAAR, H. S. C. A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications. **Energy Conversion and Management**, v. 111, p. 466-487, 2016.

SADRI, R.; HOSSEINI, M.; KAZI, S.N.; BAGHERI, S.; ABDELRAZEK, A. H.; HMADI, G.; ZUBIR, N.; AHMAD, R.; ABIDIN, N. I. Z. A facile, bio-based, novel approach for synthesis of covalently functionalized graphene nanoplatelet nanofluids 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 modeling of turbulent convection heat transfer of nanofluids containing green functionalized graphene nanoplatelets flowing in a horizontal tube: comparison with experimental data. **Journal of molecular liquids**, v. 269, p. 152-159, 2018.

SAJJAD, M.; KAMRAN, M. S.; SHUAKAT, R.; ZEINELABDEEN, M. I. M.; Numerical investigation of laminar convective heat transfer of Graphene oxide/ ethylene glycol- water nanofluids in a horizontal tube. **Engineering science and technology, an International Journal**, v. 21, p. 727-735, 2018.

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**. LongmanScientific e Technical: Harlow, 1988.

SEDAGHAT, F.; YOUSEFI, F. Synthesis, characterization, measurements and modeling thermal conductivity and viscosity of graphene quantum dots nanofluids. **Journal of 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.

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.

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.

TQ TEC QUIMPMENTEL. **Bancada de Trocadores de calor** – Guia do usuário.2009.

WALLACE, P. R. The bang theory of graphite. **Physical Review Journals Archive**, v.71, p.622-634, 1947.

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.

WU, X. P., Yang, L. J., Du, X. Z., Yang, Y. P. Flow and heat transfer characteristics of indirect dry cooling system with horizontal heat exchanger A-frames at ambient winds. **International Journal of Thermal Sciences**, 79; 2014.

YANG, J., Maa, L., Bock, J., Jacobi, A. M., Liu, W. A comparison of four numerical modeling approaches for enhanced shell-and-tube heat exchangers with experimental validation. **Applied Thermal Engineering**, 65; 2014.

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.; ALEHASHM, 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.

APÊNDICE

- Resultados obtidos para construção do capítulo IV desta tese:

Figura 18 - Resultados obtidos para nanofluido 0,01% de grafeno – 60°C

VAZÃO DOS FLUIDOS (kg·s)	Arranjo	Fluido Quente	Fluido Frio	Tubo anular (Fluido frio/Água)						
				Re	Escoamento	di/de	Nusselt	ha (W/m ² *K)	Ea (%)	ΔPa (Pa)
1		0,0085	0,0425	2489,2	turb.	-	15,4	962,5	3	23458,82
2		0,017	0,0425	2489,2	turb.	-	15,03	939,37	6,5	23458,82
3		0,0255	0,0425	2489,2	turb.	-	15,03	939,37	7	23458,82
4		0,34	0,0425	2489,2	turb.	-	15,03	939,37	8,2	23458,82
5		0,0425	0,0425	2489,2	turb.	-	15,03	939,37	9,4	23458,82
6		0,0425	0,0085	497,84	lamiinar	0,5	5,74	358,75	43,78	117294,1
7		0,0425	0,017	995,68	laminar	0,5	5,74	358,75	42,7	58647,05
8		0,0425	0,0255	1493,52	laminar	0,5	5,74	358,75	15,2	39098,03
9		0,0425	0,034	1991,36	laminar	0,5	5,74	358,75	10,9	29323,52
10		0,0425	0,0425	2489,2	turb.	-	15,03	939,37	9,5	23458,82

VAZÃO DOS FLUIDOS (kg·s)	Arranjo	Fluido Quente	Fluido Frio	Tubo concentrico (Fluido quente/Nanofluidos/Água)						U (W/m ² *K)
				Re	Escoamento	Nusselt	hn (W/m ² *K)	En (%)	ΔPn (Pa)	
1		0,0085	0,0425	11782,39	turb.	71,81	40935,19	10,5	113588,2	940,38
2		0,017	0,0425	23564,79	turb.	125,03	71272,31	5	5571,76	949,67
3		0,0255	0,0425	35347,19	turb.	172,94	98581,15	6,6	37141,17	953,19
4		0,34	0,0425	47129,56	turb.	217,7	124092,31	7,8	27855,88	955,09
5		0,0425	0,0425	58911,99	turb.	260,25	148344,99	8,7	22284,7	956,29
6		0,0425	0,0085	56395,96	turb.	250,91	150548,55	14,1	22717,64	357,89
7		0,0425	0,017	56395,96	turb.	250,91	150548,55	11,2	22717,64	357,89
8		0,0425	0,0255	56395,96	turb.	250,91	150548,55	10,5	22717,64	357,89
9		0,0425	0,034	56395,96	turb.	250,91	150548,55	9,6	22717,64	357,89
10		0,0425	0,0425	56395,96	turb.	250,91	150548,55	8,7	22717,64	956,29

Fonte: Autor(2023).

Figura 19 - Resultados obtidos para nanofluido 0,02% de grafeno – 60°C

VAZÃO DOS FLUIDOS (Kg* s)	Arranjo	Fluido Quente	Fluido Frio	Tubo anular (Fluido frio/Água)						
				Re	Escoamento	di/de	Nusselt	ha (W/m ² *K)	Ea (%)	ΔPa (Pa)
				1	0,0085	0,0425	2489,2	turb.	-	15,4
2	0,017	0,0425	2489,2	turb.	-	13,95	871,87	5,4	23458,82	
3	0,0255	0,0425	2489,2	turb.	-	13,95	871,87	7	23458,82	
4	0,34	0,0425	2489,2	turb.	-	13,95	871,87	8,2	23458,82	
5	0,0425	0,0425	2489,2	turb.	-	13,95	871,87	9,4	23458,82	
6	0,0425	0,0085	497,84	laminar	0,5	5,74	358,75	43,7	117294,1	
7	0,0425	0,017	995,68	laminar	0,5	5,74	358,75	42,8	58647,05	
8	0,0425	0,0255	1493,52	laminar	0,5	5,74	358,75	15,5	39098,03	
9	0,0425	0,034	1991,36	laminar	0,5	5,74	358,75	10,9	29323,52	
10	0,0425	0,0425	2489,2	turb.	-	13,95	871,87	9,3	23458,82	

VAZÃO DOS FLUIDOS (Kg* s)	Arranjo	Fluido Quente	Fluido Frio	Tubo concentrico (Fluido quente/Nanofluidos/Água)						U
				Re	Escoamento	Nusselt	hn (W/m ² *K)	En (%)	ΔPn (Pa)	(W/m ² *K)
				1	0,0085	0,0425	11563,46	turb.	70,8	41066,41
2	0,017	0,0425	23126,92	turb.	123,27	71500,77	5,1	56308,23	861,36	
3	0,0255	0,0425	34690,38	turb.	170,51	98897,14	6,6	37538,82	864,25	
4	0,34	0,0425	46253,84	turb.	214,63	124490,07	7,8	28154,11	865,8	
5	0,0425	0,0425	57817,3	turb.	256,58	148820,49	8,7	22523,29	866,8	
6	0,0425	0,0085	57817,3	turb.	256,58	148820,49	14,08	22523,29	357,88	
7	0,0425	0,017	57817,3	turb.	256,58	148820,49	11,25	22523,29	357,88	
8	0,0425	0,0255	57817,3	turb.	256,58	148820,49	10,4	22523,29	357,88	
9	0,0425	0,034	57817,3	turb.	256,58	148820,49	9,6	22523,29	357,88	
10	0,0425	0,0425	57817,3	turb.	256,58	148820,49	8,7	22523,29	866,8	

Fonte: Autor (2023).

Figura 20 - Resultados obtidos para nanofluido 0,03% de grafeno – 60 °C

VAZÃO DOS FLUIDOS (kg*s)	Arranjo	Fluido Quente	Fluido Frio	Tubo anular (Fluido frio/Água)						
				Re	Escoamento	di/de	Nusselt	ha (W/m ² *K)	Ea (%)	ΔPa (Pa)
	1	0,0085	0,0425	2489,2	turb.	-	15,4	962,5	3	23458,82
	2	0,017	0,0425	2489,2	turb.	-	13,95	871,87	5,4	23458,82
	3	0,0255	0,0425	2489,2	turb.	-	13,95	871,87	7	23458,82
	4	0,34	0,0425	2489,2	turb.	-	13,95	871,87	8,2	23458,82
	5	0,0425	0,0425	2489,2	turb.	-	13,95	871,87	9,5	23458,82
	6	0,0425	0,0085	497,84	laminar	0,5	5,74	358,75	43,7	117294,1
	7	0,0425	0,017	995,68	laminar	0,5	5,74	358,75	42,7	58647,05
	8	0,0425	0,0255	1493,52	laminar	0,5	5,74	358,75	15,3	39098,03
	9	0,0425	0,034	1991,36	laminar	0,5	5,74	358,75	10,9	29323,52
	70	0,0425	0,0425	2489,2	turb.	-	13,95	871,87	9,5	23458,82

VAZÃO DOS FLUIDOS (kg*s)	Arranjo	Fluido Quente	Fluido Frio	Tubo concêntrico (Fluido quente/Nanofluidos/Água)						U (W/m ² *K)
				Re	Escoamento	Nusselt	hn (W/m ² *K)	En (%)	ΔPn (Pa)	
	1	0,0085	0,0425	11279,19	turb.	69,23	41543,26	10,5	113588,2	940,7
	2	0,017	0,0425	22558,38	turb.	120,55	72331,01	5,1	56794,11	949,86
	3	0,0255	0,0425	33837,57	turb.	166,74	100045,5	6,6	37862,74	953,32
	4	0,34	0,0425	45116,77	turb.	209,89	125935,61	7,8	28397,05	955,19
	5	0,0425	0,0425	56395,96	turb.	250,91	150548,55	8,7	22717,64	956,38
	6	0,0425	0,0085	56395,96	turb.	250,91	150548,55	14	22717,64	357,89
	7	0,0425	0,017	56395,96	turb.	250,91	150548,55	11,2	22717,64	357,89
	8	0,0425	0,0255	56395,96	turb.	250,91	150548,55	10,5	22717,64	357,89
	9	0,0425	0,034	56395,96	turb.	250,91	150548,55	9,6	22717,64	357,89
	70	0,0425	0,0425	56395,96	turb.	250,91	150548,55	8,7	22717,64	956,38

Fonte: Autor (2023).

Figura 21 - Resultados obtidos para a água - 60°C

VAZÃO DOS FLUIDOS (Kg ⁺ s)	Arranjo	Fluido Quente	Fluido Frio	Tubo anular (Fluido frio/Água)						
				Re	Escoamento	di/de	Nusselt	ha (W/m ² *K)	Ea (%)	ΔPa (Pa)
				1	0,0085	0,0425	2489,2	turbulento	-	15,4
2	0,017	0,0425	2489,2	turbulento	-	15,4	962,5	5,5	23458,82	
3	0,0255	0,0425	2489,2	turbulento	-	15,4	962,5	7,1	23458,82	
4	0,34	0,0425	2489,2	turbulento	-	15,4	962,5	8,3	23458,82	
5	0,0425	0,0425	2489,2	turbulento	-	15,4	962,5	9,6	23458,82	
6	0,0425	0,0085	497,84	laminar	0,5	5,74	358,75	42,7	117294,1	
7	0,0425	0,017	995,68	laminar	0,5	5,74	358,75	41,61	58647,05	
8	0,0425	0,0255	1493,52	laminar	0,5	5,74	358,75	15,1	39098,03	
9	0,0425	0,034	1991,36	laminar	0,5	5,74	358,75	10,9	29323,52	
70	0,0425	0,0425	2489,2	turbulento	-	15,4	871,87	9,4	23458,82	

VAZÃO DOS FLUIDOS (Kg ⁺ s)	Arranjo	Fluido Quente	Fluido Frio	Tubo concentrico (Fluido quente/Nanofluidos/Água)						U
				Re	Escoamento	Nusselt	hn (W/m ² *K)	En (%)	ΔPn (Pa)	(W/m ² *K)
				1	0,0085	0,0425	14935	turbulento	80,68	50431,2
2	0,017	0,0425	29870,41	turbulento	140,89	87805,83	5,5	58647,05	952,06	
3	0,0255	0,0425	44805,62	turbulento	194,31	121449,68	7,2	39098,03	954,93	
4	0,34	0,0425	59740,83	turbulento	244,6	152878,83	8,5	29323,52	956,47	
5	0,0425	0,0425	74676,03	turbulento	292,41	182757,57	9,5	23458,82	957,45	
6	0,0425	0,0085	74676,03	turbulento	292,41	182757,57	15,5	23458,82	358,04	
7	0,0425	0,017	74676,03	turbulento	292,41	182757,57	12,3	23458,82	358,04	
8	0,0425	0,0255	74676,03	turbulento	292,41	182757,57	11,4	23458,82	358,04	
9	0,0425	0,034	74676,03	turbulento	292,41	182757,57	10,5	23458,82	358,04	
70	0,0425	0,0425	74676,03	turbulento	292,41	182757,57	9,5	23458,82	957,45	

Fonte: Autor (2023).