



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife

Coordenação Acadêmica do Curso Superior em Engenharia Mecânica

Engenharia Mecânica

DAVI LUIZ RAMOS DOS SANTOS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO CFD DE TROCADORES DE CALOR
CASCO E TUBO UTILIZANDO NANOFLUIDO DE GRAFENO**

Recife

2023

DAVI LUIZ RAMOS DOS SANTOS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO CFD DE TROCADORES DE CALOR
CASCO E TUBO UTILIZANDO NANOFLUIDO DE GRAFENO**

Trabalho de conclusão de curso apresentada a Coordenação Acadêmica do Curso Superior em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.

Recife

2023

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Danielle Castro da Silva CRB4/1457

S237a

2023 Santos, Davi Luiz Ramos dos

Análise experimental e simulação CFD de trocadores de calor Casco e tubo utilizando nanofluido de grafeno. / Davi Luiz Ramos dos Santos. --- Recife: O autor, 2023.

59f. il. Color.

Trabalho de Conclusão (Curso Superior Tecnológico em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

Inclui Referências.

Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.

1. Trocador de calor. 2. Nanofluido. 3. Simulação CFD. 4. grafeno. I. Título. II. Costa, José Ângelo Peixoto da (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 620.1

**ANALISE EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO CFD DE TROCADORES DE CALOR
CASCO E TUBO UTILIZANDO NANOFLUIDO DE GRAFENO**

Trabalho aprovado. Recife, 10 / 01 / 2024.

José Ângelo Peixoto da Costa

Frederico Duarte de Menezes

José Claudino de Lira Júnior

Recife

2023

Dedico este trabalho à toda minha família e amigos que me apoiaram durante esta trajetória, me incentivando e acreditando em todos os momentos.

Também dedico este trabalho ao meu amigo e irmão de curso, Gabriel de Santana Santos (em memória), que sempre será lembrado pela pessoa leal, inteligente e carismática que foi.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a toda a minha família, especialmente aos meus pais, Aluizio e Ana, agradeço pelo constante apoio às minhas escolhas e pela oportunidade de seguir com os estudos. Ao meu irmão, Felipe, meu profundo agradecimento pelo apoio e incentivo durante todo o curso.

A todos os professores que colaboraram ao longo deste trabalho, em especial ao meu orientador, o Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa. Agradeço por abrir as portas da pesquisa por meio das Iniciações Científicas, pela dedicação e orientação durante a elaboração dos projetos, e por acreditar no meu potencial.

Aos professores Frederico Duarte e Álvaro Ochoa, meu muito obrigado, por toda orientação em trabalhos passados de iniciação científica.

Aos amigos, por tornarem meus dias mais tranquilos e divertidos, e por compartilharem conhecimentos e experiências.

Ao IFPE, Campus Recife, agradeço por todas as oportunidades proporcionadas desde da minha formação no curso técnico e agora na graduação. E pela disponibilização dos seus laboratórios, que foram essenciais para o desenvolvimento deste TCC.

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), meu agradecimento pelo apoio às pesquisas realizadas ao longo dos anos de graduação.

A todos, meu profundo e sincero obrigado.

RESUMO

Nos últimos anos, o planeta tem enfrentado significativas mudanças climáticas devido ao aquecimento global, principalmente em decorrência das emissões de poluentes na atmosfera. O aumento na geração desses poluentes está diretamente ligado à produção acelerada de energia, resultado da crescente demanda de setores, como as indústrias, ao longo dos anos. Os trocadores de calor têm enfrentado desafios de eficiência devido à baixa condutividade térmica dos fluidos convencionais. Com o objetivo de mitigar as emissões de carbono, através de trocadores de calor mais eficientes, pesquisas indicam que nanopartículas em suspensão têm grande potencial para melhorar a transferência de calor. Este estudo compreende uma abordagem abrangente, combinando testes experimentais e simulações numéricas por meio de software de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para analisar o desempenho de um trocador de calor casco e tubo. Na fase experimental, foram realizados testes em duas partes: inicialmente, variando as vazões para temperaturas de 40, 50 e 60 °C, utilizando água nos circuitos quente e frio. Posteriormente, os experimentos foram repetidos com a substituição da água por nanofluido de grafeno com concentração de 0,01% no circuito quente, mantendo água no circuito frio. As simulações numéricas replicaram as condições experimentais, permitindo uma comparação detalhada entre o desempenho do trocador de calor em diferentes configurações. A análise abrangeu parâmetros cruciais, como taxa de transferência de calor, coeficiente global de transferência de calor e a efetividade, visando avaliar a eficiência do sistema ao utilizar água e, posteriormente, ao incorporar nanofluido de grafeno, proporcionando insights valiosos para aplicações práticas e otimização de projetos futuros. Os testes mostraram que, mesmo para baixa concentração, o nanofluido de grafeno mostrou bons resultados comparados com a água, no trocador de calor casco e tubo e que essa diferença tende à aumenta em temperaturas mais altas. A concordância entre experimentos e simulações CFD mostrou a ótima qualidade do modelo utilizado. Por fim, os resultados destacam o potencial do nanofluido, mesmo em baixas concentrações, e a utilidade prática do modelo CFD na otimização de trocadores de calor.

Palavras-chave: Trocador de calor; nanofluido; simulação CFD; grafeno.

ABSTRACT

In recent years, the planet has faced significant climate changes due to global warming, mainly as a result of pollutant emissions into the atmosphere. The increase in the generation of these pollutants is directly linked to the accelerated production of energy, a result of the growing demand from sectors, such as industries, over the years. Heat exchangers have faced efficiency challenges due to the low thermal conductivity of conventional fluids. With the aim of mitigating carbon emissions through more efficient heat exchangers, research indicates that suspended nanoparticles have great potential to improve heat transfer. This study comprises a comprehensive approach, combining experimental tests and numerical simulations using computational fluid dynamics (CFD) software to analyze the performance of a shell-and-tube heat exchanger. In the experimental phase, tests were carried out in two parts: initially, varying the flow rates for temperatures of 40, 50 and 60 °C, using water in the hot and cold circuits. Subsequently, the experiments were repeated by replacing the water with graphene nanofluid with a concentration of 0.01% in the hot circuit, keeping water in the cold circuit. Numerical simulations replicated the experimental conditions, allowing a detailed comparison between heat exchanger performance in different configurations. The analysis covered crucial parameters such as heat transfer rate, overall heat transfer coefficient and effectiveness, aiming to evaluate the system's efficiency when using water and, subsequently, when incorporating graphene nanofluid, providing valuable insights for practical applications and optimization. of future projects. The tests showed that, even at low concentrations, the graphene nanofluid showed good results compared to water, in the shell and tube heat exchanger and that this difference tends to increase at higher temperatures. The agreement between experiments and CFD simulations showed the excellent quality of the model used. Finally, the results highlight the potential of nanofluid, even at low concentrations, and the practical usefulness of the CFD model in optimizing heat exchangers.

Keywords: Heat exchanger; nanofluid; CFD simulation; graphene.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades termofísicas à 25 °C da água e nanofluido	31
Tabela 2: Variações das vazões.	33
Tabela 3. Especificações do trocador de calor TD360c.	35
Tabela 4. Dados da malha Grosseira.	40
Tabela 5. Dados da malha refinada.	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Gráfico das temperaturas de entrada e saída do teste experimental e do modelo computacional.	47
Gráfico 2. Número de Nusselt x número de Reynolds.	48
Gráfico 3. Gráfico do U Exp. X CFD para a água e nanofluido 40°C.	49
Gráfico 4. Gráfico do U Exp. X CFD para a água e nanofluido 50°C.	50
Gráfico 5. Gráfico do U Exp. X CFD para a água e nanofluido 60°C.	50
Gráfico 6. Gráfico da efetividade EXP e CFD para a água e nanofluido a 40°C.	52
Gráfico 7. Gráfico da efetividade EXP e CFD para a água e nanofluido a 50°C.	52
Gráfico 8. Gráfico da efetividade EXP e CFD para a água e nanofluido a 60°C.	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consumo energético no Brasil.	17
Figura 2. Formas de transferência de calor.	21
Figura 3. Componentes do trocador casco e tubo.	23
Figura 4. Trocador de calor casco e tubo.	24
Figura 5. Método de preparação do nanofluido.	26
Figura 6. Estrutura do grafeno.	27
Figura 7. Aplicações CFD.	28
Figura 8. Nanofluido de grafeno.	31
Figura 9. Módulo de serviço TD360.	32
Figura 10. Trocador de calor casco e tubo TD360c.	34
Figura 11. Escoamento contrafluxo.	34
Figura 12. Termopar tipo K usado na bancada experimental.	36
Figura 13. Válvula controladora de vazão.	36
Figura 14. Modelagem 3D do trocador de calor casco e tubo.	37
Figura 15. Fluxograma das etapas de uma simulação CFD.	38
Figura 16. Geometria importada para o design model.	39
Figura 17. Malha grosseira.	40
Figura 18. Malha refinada.	40
Figura 19. CFX-pre.	41
Figura 20. Troca térmica no trocador de calor casco e tubo.	53
Figura 21. Velocidade dos fluidos no trocador de calor casco e tubo.	54

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

- A - Área média de transferência de calor [m^2]
- BEN - Balanço Energético Nacional
- C - Capacidade Calorífica [W/k]
- CAD - Computer Aided Design
- CFD - Computational Fluid Dynamics
- Cp - Calor específico [j/Kg.k]
- D - Diâmetro [m]
- EPE - Empresa de Pesquisa em Energia
- f - Fator de Atrito
- h - Coeficiente de transferência de Calor [W/m. k]
- IFPE – Instituto Federal de Pernambuco
- k - Condutividade Térmica [W/m.k]
- L - Comprimento do Tubo [m]
- LEMAN - Laboratório de Eletroquímica e Materiais Nanoestruturados
- \dot{m} - Vazão mássica [kg/s]
- MDF – Método das Diferenças Finitas
- MEF – Método dos Elementos Finitos
- Nu - Número de Nusselt
- MVF – Método dos Volumes Finitos
- PID - Proportional Integral Derivative Controller
- Pr - Número de Prandtl
- $q_{\text{méd}}$ - Taxa média de transferência de calor [W]
- q - Taxa de transferência de calor [W]
- Q - Fluxo de calor [W/m^2]
- q_{max} - Taxa de transferência de calor máxima [W]
- Re - Número de Reynolds
- V - Velocidade média [m/s]
- VDAS - Versatile Data Acquisition System
- U - Coeficiente Global de Transferência de Calor [$W/m^2 \cdot k$]
- T - Temperatura [°C]
- ΔT_{LTMD} - Diferença de Temperaturas Média logarítmica [°C]

ΔP - Perda de carga [Pa]

ε - Efetividade

ρ - Densidade [kg/m^3]

μ - Viscosidade dinâmica [$\text{Kg}/\text{m} \cdot \text{s}$]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivos específicos	19
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1 Transferência de calor	20
3.2 Trocadores de calor	22
3.3 Trocador de calor casco e tubo	23
3.4 Nanofluidos	25
3.5 Grafeno	26
3.6 Fluidodinâmica computacional (CFD)	28
4 METODOLOGIA	30
4.1 Análise experimental	30
4.1.1 Nanofluido de grafeno	30
4.1.2 Bancada de trocadores de calor TD360	31
4.1.2.1 Modulo de serviço TD360	32
4.1.2.2 Trocador de calor casco e tubo TD360c	33
4.1.2.3 Termopar tipo K	35
4.1.2.4 Válvula de vazão	36
4.2 Análise computacional	37
4.2.1 Geometria	38
4.2.2 Malha	39
4.2.3 Configurações	41
4.3 Equações governantes	42
4.2.4 Processamento de dados	43
5 RESULTADOS	47
6 CONCLUSÕES	55
REFERENCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

No contexto atual, com o aumento significativo da necessidade global de energia, a produção e o uso desse recurso se tornaram uma questão crucial em escala mundial. O custo crescente e a maior dependência de combustíveis fósseis têm despertado a preocupação generalizada em relação à escassez desses recursos não renováveis e aos impactos que eles têm ao meio ambiente (BIZERRA, 2018).

Diante da escassez de recursos naturais, as indústrias de grande porte têm direcionado significativos investimentos e empenhado esforços consideráveis no desenvolvimento de sistemas e dispositivos de elevada performance. Essa busca por soluções que visem tanto a redução do consumo de energia como o aprimoramento da eficiência operacional, permitindo um consumo mais racional. Além disso, tais medidas visam mitigar os impactos ambientais e prevenir o esgotamento de recursos a longo prazo (ETTEFAGHI et al., 2017).

Na atualidade os trocadores de calor casco e tubo, considerado um dos mais utilizados no setor industrial, é um equipamento que tem como objetivo arrefecer ou aquecer um determinado fluido através de condução e convecção. Esses permutadores são compostos por um casco cujo seu interior possui alguns tubos, onde por esse casco passa um fluido e nos tubos outro fluido, com temperaturas distintas que pode ou não sofrer mudança de fase, visando obter a troca térmica. Esse tipo de trocador é bem requisitado em aplicações onde exista a utilização de alta pressão, como indústrias químicas e refinarias de petróleo, devido a sua funcionalidade que não vai ser alterada nessas pressões elevadas (PAL, 2016; COSTA, 2018).

Graças ao seu bom desempenho operacional e versatilidade os trocadores casco e tubo se tornaram muito comuns nas indústrias em várias aplicações, ao ponto de ser um dos mais utilizados. Este trocador consiste basicamente de um casco metálico cilíndrico que envolve um feixe de tubos em seu interior. Um dos fluidos utilizados no permutador escoam pelo casco e o outro fluido, pelos tubos do feixe. A troca térmica ocorre através das paredes dos tubos. Os componentes principais deste equipamento são o casco, o feixe de tubos e os cabeçotes de entrada e retorno. (ABD et al., 2018).

Devido ao grande uso dos trocadores de calor casco e tubo nas indústrias vêm se cobrando cada vez mais desempenho e maior eficiência térmica na sua utilização. A transferência de calor feita pelos permutadores depende de vários fatores, como a temperatura, o fluido usado no trocador, a pressão, números de tubos, espessura do casco e da geometria dos tubos e das chicanas (ANDRZEJCZYK, 2017).

Recentemente, têm-se realizado diversos estudos que exploram o uso de materiais à base de carbono em aplicações eletroquímicas, devido às suas propriedades únicas, estrutura distintiva e ampla disponibilidade, além de serem ecologicamente seguros. Entre esses materiais, merece destaque o Grafeno (SEGUNDO E VILAR, 2016).

O Grafeno é um material de estrutura plana composto por átomos de carbono organizados em uma camada monoatômica com formato de folha, apresentando células hexagonais. Suas propriedades únicas incluem uma notável mobilidade eletrônica e de transporte, que são incomparáveis em relação a outros materiais naturais. Além disso, o Grafeno exibe excelentes características mecânicas, químicas e térmicas, o que o torna um material extremamente versátil e promissor (HAQUE et al., 2018; BORDIGNON, 2018).

Com a passar do tempo vem se exigindo cada vez mais eficiência dos trocadores, ao ponto de que os fluidos convencionais não satisfazem a troca de calor de alta intensidade necessária em muitos setores. Com isso pesquisas recentes vêm mostrando o elevado desempenho do uso do nanofluido em trocadores de calor. Os nanofluidos são misturas que podem ser adquiridas através da dispersão de diferentes nanopartículas em determinado fluido com o objetivo de melhorar as propriedades térmicas. (ESFAHANI E LANGURI, 2017; ARSHAD et al., 2019).

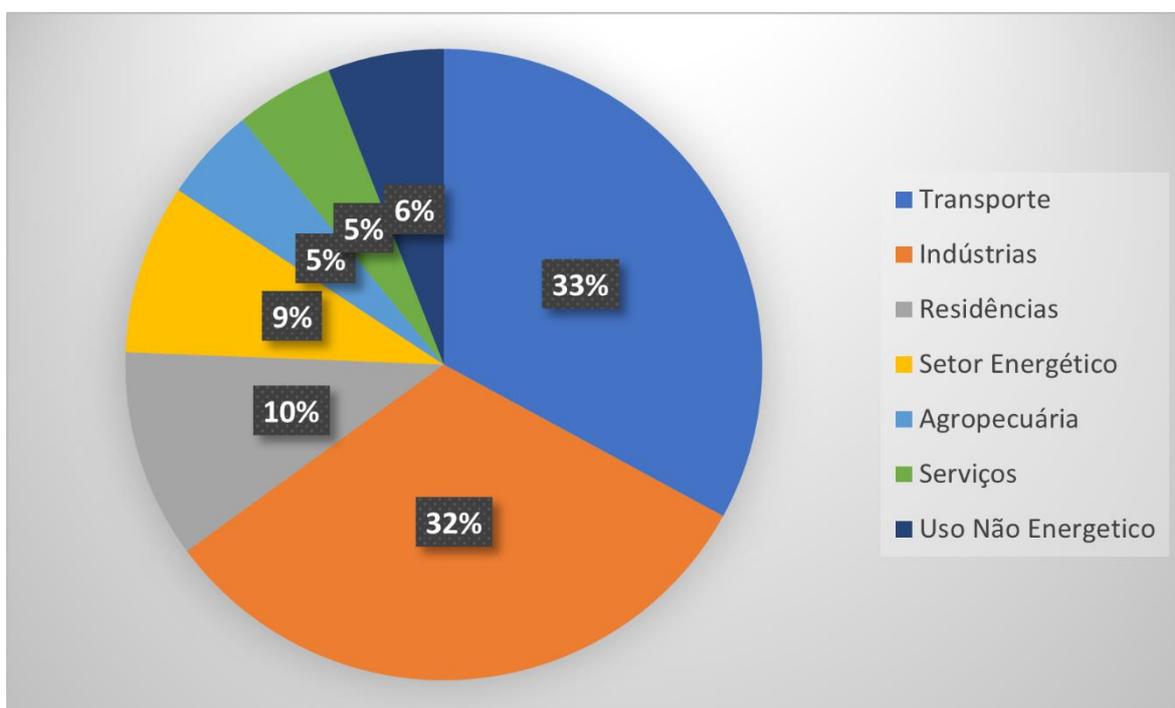
Portanto, esse trabalho tem como proposta verificar o desempenho do trocador de calor do tipo casco e tubo utilizando nanofluido a base de grafeno, objetivando que o permutador mostre um aumento de eficiência quando se comparado a outro fluido.

1.1 Motivação

Ao longo dos anos, o Brasil vem passando por um grande aumento no consumo energético. Esse fenômeno vem crescendo devido a vários fatores, como o crescimento econômico do país, o crescimento populacional, a crescente no setor industrial e maior acesso a bens de serviço. Junto com esse aumento do consumo vem consigo preocupações e desafios (EPE, 2023).

Segundo o relatório de 2023 da BEN (Balanço Energético Nacional), disponibilizado pela EPE (Empresa de Pesquisa em Energia) (**Figura 1**), observa-se que, em 2022, um dos setores que mais consumiu energia no Brasil foi o industrial, ficando apenas atrás do setor de transporte. Esses dados refletem o rápido crescimento do setor industrial no Brasil, o que tem impulsionado pesquisas na área de melhoria da eficiência dos equipamentos utilizados nas indústrias.

Figura 1. Consumo energético no Brasil.



Fonte: ADAPTADO BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - EPE (2023).

Portanto, estudos em trocadores de calor casco e tubo vêm sendo desenvolvidos cada vez com mais frequência com o objetivo de melhorar sua

eficiência, o que impacta no consumo energético desses trocadores. A melhoria de desempenho desses trocadores é de grande importância para o setor industrial, pois eles estão inseridos em diversos setores da indústria, como química, petroquímica, farmacêutica, siderúrgica entre outras.

A melhoria da eficiência dos trocadores casco e tubo, além de diminuindo o consumo energético e gerar uma economia nos custos operacionais da indústria, também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Ao reduzir o consumo de energia, faz com que menos combustíveis fósseis sejam queimados, o que resulta em uma menor pegada de carbono, conseqüentemente, diminuindo os impactos ambientais negativos. Esse fator, além de atender às demandas regulatórias que estão cada vez mais rigorosas em relação às emissões de carbono, também fortalece a responsabilidade ambiental das empresas, contribuindo assim para a sustentabilidade do planeta (MARQUES; HADDAD; MARTINS, 2007).

Contudo, espera-se que esse trabalho estimule cada vez mais o desenvolvimento de pesquisas voltadas para contribuição direta ou indiretamente na redução de poluentes e da eficiência trocadores de calor visando sempre uma prática mais sustentável com menores impactos ao meio ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

A proposta deste trabalho é a criação de um modelo numérico computacional de um trocador de calor casco e tubo realizando análises numéricas e experimentais do equipamento, utilizando nanofluidos de grafeno à base de água (H₂O), com o objetivo de encontrar os máximos pontos de eficiência e comparar os dados encontrados nas análises numéricas e experimentais.

2.2 Objetivos específicos

- Levantamento bibliográfico;
- Realizar a análise experimental do trocador de calor usando apenas água e depois água e nanofluido;
- Realizar a simulação computacional do trocador de calor;
- Fazer a análise e comparação dos dados obtidos experimentalmente com os da simulação;
- Apresentar os dados obtidos da simulação;
- Publicar resultados obtidos em periódicos indexados e congressos nacionais e internacionais da área.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, abordaremos os fundamentos teóricos da transferência de calor na literatura, discutindo os tipos e aplicações dos trocadores de calor, principalmente o trocador casco e tubo, que é trocador utilizado para estudo neste trabalho, bem como a importância do uso de nanofluidos como fluido alternativo para permutadores. Além disso, exploraremos o grafeno, material de estudo neste trabalho, apresentando seu conceito, características, vantagens e diversas aplicações nos nanofluidos, assim como em outros contextos, como trocadores de calor. Essas explicações visam proporcionar um melhor entendimento do tema, esclarecendo conceitos e desenvolvimentos relevantes para este trabalho.

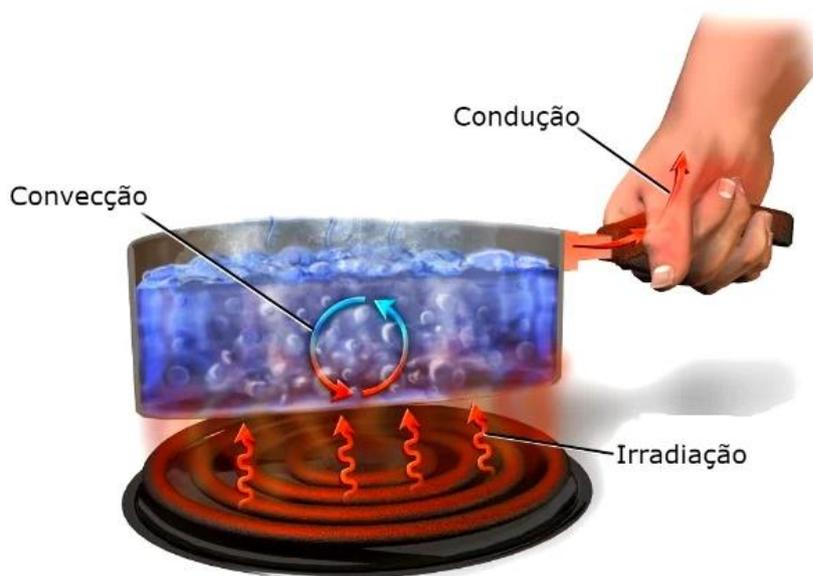
3.1 Transferência de calor

A área da ciência em que se estuda os modos como a energia é transportada e as relações entre os sistemas e o ambiente em que estão inseridas é a termodinâmica, sendo essas interações o calor ou trabalho (INCROPERA,2008).

Existem diversas formas de como a energia pode ser transportada, e uma dessas formas é através do calor, de acordo com Incropera et al. (2008) a transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço. A transferência de calor pode ser resumida em três formas (

Figura 2), condução, convecção e radiação onde o transporte de energia de vai de um lugar para outro, que resulta numa diferença de temperatura entre essas regiões, que pode ser chamada de taxa de transferência de calor (KREITH et al., 2018).

Figura 2. Formas de transferência de calor.



Fonte: GOUVEIA (2023).

A transferência de calor por condução está intrinsecamente associada ao transporte de vibrações entre moléculas. Onde moléculas de maior energia (maior calor) vibram mais intensamente, transmitindo esse movimento às moléculas vizinhas de menor energia (menor calor). Para esse fenômeno ocorrer é preciso um meio material como os metais, onde esse processo é mais eficiente devido ao calor se propagar com maior facilidade graças a sua ótima condutividade térmica (CARVALHO, 2002).

A troca térmica que acontece quando um fluido que está escoando a uma determinada temperatura entra em contato com uma superfície a uma temperatura distinta, esse fenômeno chama-se de transferência de calor por convecção (KREITH et al., 2011). Esse modo de transferência de calor acontece devido à transposição molecular aleatória e ao movimento global do fluido no interior da camada limite, que está diretamente associado à densidade do fluido, fazendo com que influencie em quanto calor será passado para o fluido (INCROPERA et al., 2008).

A transferência de calor por convecção pode ocorrer de dois tipos: convecção forçada, onde o fluido é impulsionado a escoar no sistema, e convecção livre, onde o

fluido flui naturalmente, com a densidade própria como limitador de movimento (CARVALHO, 2002).

Quando a energia da matéria é passada através de ondas eletromagnéticas (fótons) de um corpo para o outro dar-se o nome de radiação. Esse modo de transferência de calor acontece em todos os corpos que tenham uma temperatura acima de zero absoluto. Além de não precisar de meio intermediário para se propagar, a transmissão ela é proporcional à diferença de temperatura elevada à quarta potência, ou seja, quanto maior a temperatura, mais calor será transferido (ÇENGEL et al., 2012).

3.2 Trocadores de calor

O trocador de calor é um equipamento muito utilizado nas indústrias, que tem como principal função realizar uma troca térmica de dois ou mais fluidos de temperaturas distintas, além de mantê-los separados para que não haja mistura. A troca térmica que acontece nos fluidos em um trocador de calor se dá por convecção, enquanto que nas paredes dos tubos se dá por condução (ÇENGEL; GHAJAR, 2011).

Em um trocador de calor, o funcionamento se dá pelo fluido quente transferindo calor, fazendo com que ele se resfrie, podendo ou não sofrer mudança de fase. O fluido refrigerante, por outro lado, recebe o calor transferido e também pode sofrer uma mudança de fase ou, se não ocorrer nenhuma mudança de fase, aquecer (ARAUJO, 2002).

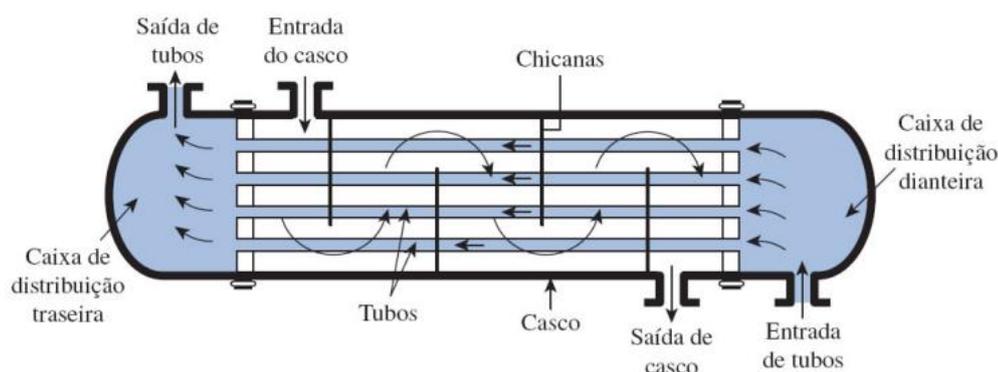
Existem diversos tipos de permutadores, e eles podem ser divididos em categorias como: atuação para transferência de calor, quantidade de fluidos de trabalho, quanto ao seu tamanho, o tipo de elaboração, o arranjo do escoamento dos fluidos e o tipo de transferência de calor (SHAH; SEKULIC, 2003).

No setor industrial, utilizam-se diversos tipos de trocadores de calor em diferentes aplicações. A seleção desses trocadores de calor está atrelada a variáveis como as temperaturas e pressões de trabalho. Além disso, é de grande importância levar em consideração a eficiência do trocador que será utilizado, a perda de carga que influencia na questão do consumo energético, o peso e as dimensões requeridas (KAKAÇ, 2012).

3.3 Trocador de calor casco e tubo

Os trocadores de calor do tipo casco e tubo têm como principais componentes seu casco externo e os tubos internos. O arranjo desse trocador (**Figura 3**) permite que um dos fluidos de operação escoe no interior do casco, ao mesmo tempo em que o outro fluido escoe por dentro dos tubos que estão contidos dentro do casco. A transferência de calor que ocorre nesse trocador é indireta, ou seja, os fluidos não se misturam (SOUZA, 2013). Em relação aos trocadores casco e tubo, frequentemente são adicionadas chicanas dentro do casco, com o objetivo de fazer o fluido escoar por mais tempo. Isso possibilita ter uma maior transferência de calor, além de garantir uma maior simetria entre os espaçamentos dos tubos (ÇENGEL et al., 2012).

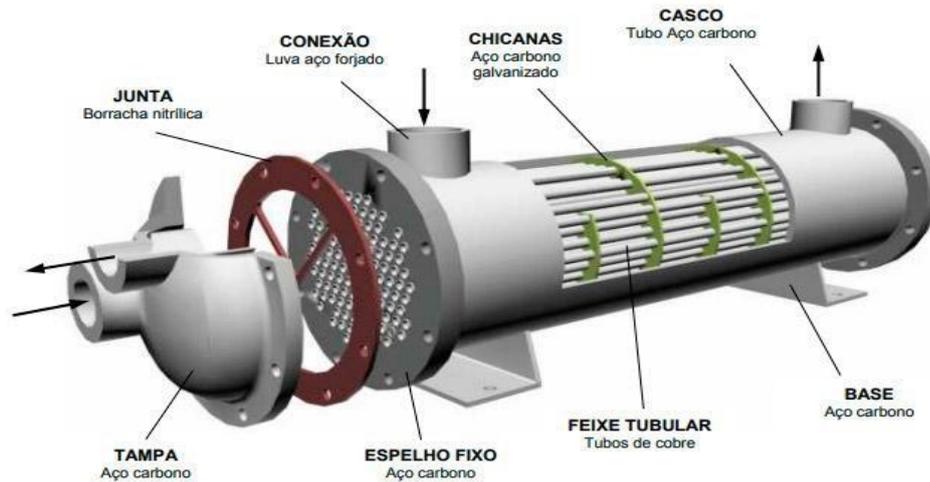
Figura 3. Componentes do trocador casco e tubo.



Fonte: ÇENGEL (2012).

No segmento industrial, existem várias aplicações em que o trocador de calor (**Figura 4**) é utilizado, sendo elas em indústrias químicas, principalmente as petroquímicas, os geradores de vapor, refrigeradores de óleo e outras mais. O trocador de calor casco e tubo, diferente dos outros trocadores, pode ser modificado para adaptar-se às mais variadas demandas e condições de trabalho (KAKAÇ, 2012). O uso do trocador de calor casco e tubo não se limita apenas a fluidos líquidos, ele pode ser utilizado com gases ou vapores, como condensadores ou vaporizadores, independentemente da posição, seja ela vertical ou horizontal, dependendo apenas do tipo de trabalho que será submetido (ÇENGEL et al., 2012).

Figura 4. Trocador de calor casco e tubo.



Fonte: FIORILO E NASCIMENTO (2010).

Um trocador de calor é um equipamento que deve ser escolhido de acordo com suas aplicações. Segundo Edwards (2008), ao projetar-se um trocador de calor, algumas observações devem ser levadas em consideração para que tenha um ganho máximo de eficiência no trocador de calor, sendo elas:

- Tipo de fluido e localização (casco ou tubo);
- Seleção de temperatura nas correntes;
- Limites de velocidades e pressões de operação no casco e no tubo;
- Coeficiente de incrustação;
- Número de passagens;
- Comprimento de tubulação;
- Material.

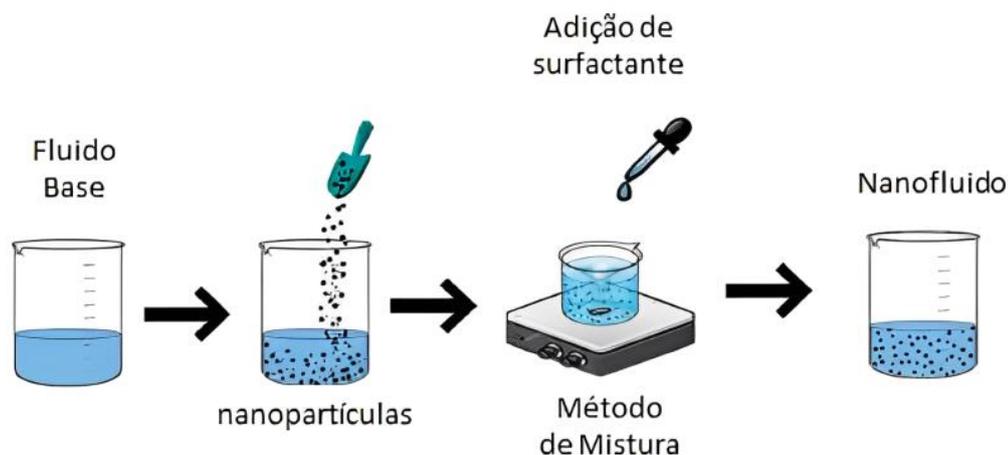
3.4 Nanofluidos

Com o grande crescimento do setor industrial, o uso de fluidos convencionais como água, óleo e etilenoglicol não possui mais a condutividade térmica necessária para atender às necessidades térmicas requeridas na maioria dos setores, incluindo os setores de transporte, microeletrônica, aeroespacial e manufatura (ESFAHANI e LANGURI, 2017). Devido à grande necessidade de maior rendimento térmico dos fluidos, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de buscar fluidos mais eficientes em questões de desempenho energético, o que faz com que o consumo energético nas indústrias seja reduzido (GHOZATLOO et al., 2014).

A primeira vez que o termo "nanofluido" foi utilizado foi em 1995 por Choi, em Laboratório Nacional Argonne. O nanofluido é composto por nanopartículas com diâmetro que podem variar de 1 a 100 nm, misturadas a um fluido convencional (AKYÜREK et al., 2018).

Nanofluido pode ser definido como a mistura de nanopartículas sólidas em suspensão em um fluido base (**Figura 5**). O nanofluido pode ser dividido em duas partes, a parte sólida (nanométrica) e a parte fluida, que é o fluido base. Onde, após uma dispersão uniforme, resultará em uma mistura estável e propriedades distintas dos componentes que fazem parte (ÖZERINÇ, 2010; SIDIK 2014). A mistura dessas nanopartículas faz com que as propriedades termofísicas melhorem consideravelmente, graças à maior condutividade térmica do material das nanopartículas (MARTÍNEZ-MERINO et al., 2022).

Figura 5. Método de preparação do nanofluido.



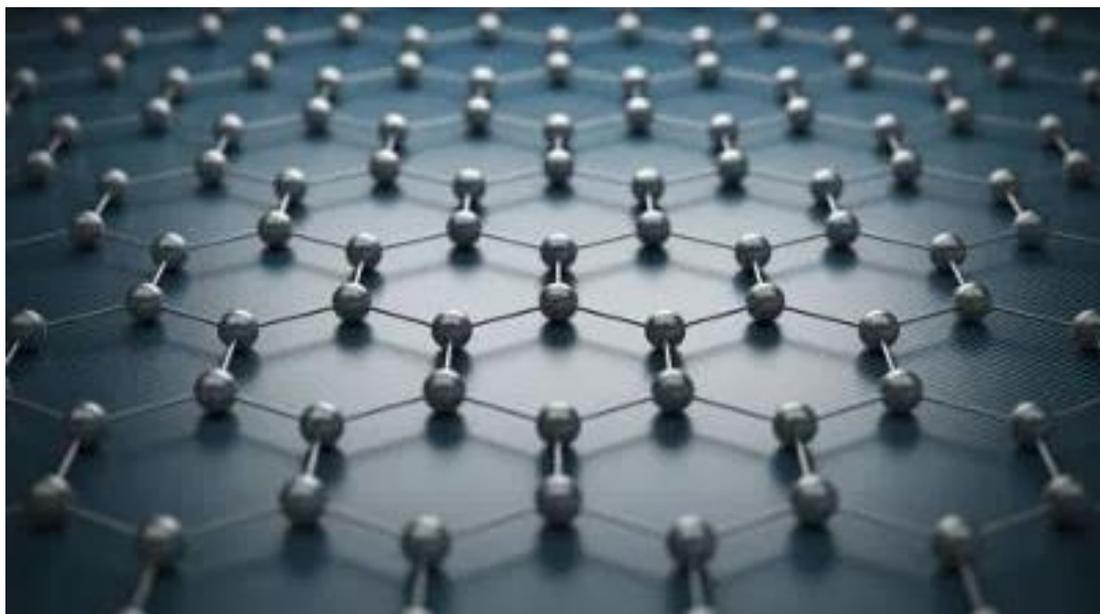
Fonte: MUKHERJEE E COLABORADORES (2018).

3.5 Grafeno

As primeiras investigações sobre grafita, visando uma melhor compreensão de suas propriedades derivadas do carbono simples, remontam a 1840, quando o cientista alemão Schafhaeutl realizou experimentos onde através do uso de ácido sulfúrico e ácido nítrico, tinha como objetivo produzir grafite intercalado e esfoliado. A principal meta desse estudo era garantir que a estrutura da grafita não fosse alterada, mas sim a distância entre as lamelas (BOEHM, H. P.; STUMPP, 2007). A partir desse período, iniciou-se um novo segmento, onde o campo científico começou a estudar e explorar o grafite, impulsionando o desenvolvimento contínuo de pesquisas sobre a estrutura do grafeno.

O grafeno, um produto derivado do carbono, é definido como um material bidimensional devido à sua espessura monoatômica, onde pode chegar a menos de 1 nm (MENDONÇA, 2018). Pode ser exemplificado como uma folha plana de átomos de carbono compactados em uma grade de duas dimensões, agrupados em uma estrutura hexagonal (**Figura 6**) (HASSAN; MARION, 2016). Graças a essas características, o grafeno mostrou ter muitos benefícios e possibilidades de aplicação, sendo considerado um material promissor se comparado a outros.

Figura 6. Estrutura do grafeno.



Fonte: RAFAEL HELERBROCK (2023).

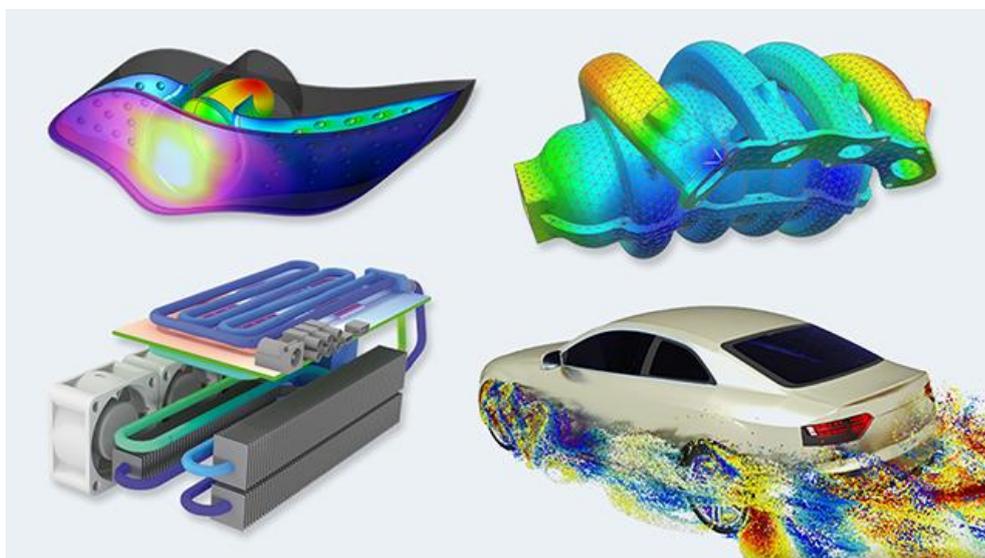
O grafeno emerge como uma alternativa promissora ao silício e ao diamante, destacando-se por suas notáveis propriedades eletrônicas, mecânicas e térmicas, bem como por sua elevada condutividade. Contudo, apesar da possibilidade de síntese por diferentes métodos, ainda há a necessidade de otimizar a produtividade e reduzir os custos associados. Adicionalmente, os métodos modernos de caracterização exigem a transferência do grafeno para um substrato específico, o que por vezes compromete a eficiência da caracterização. Diante desse cenário, a pesquisa está voltada para o desenvolvimento de novos métodos que possam oferecer identificação rápida e eficaz, superando as limitações inerentes à produção desse composto (NOVOSELOV et al., 2012).

O grafeno exibe uma estrutura que confere um conjunto de propriedades intrínsecas, despertando considerável interesse nos âmbitos científico e tecnológico. Características como sua notável condutividade elétrica e térmica, transparência óptica, alta resistência mecânica e flexibilidade proporcionam uma ampla gama de aplicações em diversos setores tecnológicos, incluindo painéis e células solares, eletrônica, detectores gasosos, transistores de alta velocidade, entre outras possíveis utilizações (PINTO, 2016).

3.6 Fluidodinâmica computacional (CFD)

A Fluidodinâmica Computacional ou CFD (Computational Fluid Dynamics) é a análise de sistemas com base em metodologias advindas da Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor. Através dela é possível observar o comportamento de vários fenômenos, como por exemplo escoamento de fluidos, transferência de calor, reações químicas e outros mais por meio de simulação computacional. Essa ferramenta é fundamental na utilização em diversas áreas tanto, industriais quanto científicas. Principalmente, é empregada para resolver diversos problemas na engenharia, como a implementação de novos equipamentos ou aprimoramento de equipamentos já existentes. Algumas aplicações (**Figura 7**) em que se observa bastante o uso da ferramenta CFD incluem processos químicos, ventilação, engenharia espacial, geração de energia, aerodinâmica de aeronaves, veículos, e várias outras (TU, J.; YEOH, G.; LIU, C., 2013).

Figura 7. Aplicações CFD.



Fonte: JL ENGENHARIA E SOFTWARE (2021).

É de grande importância para a engenharia compreender e quantificar os fenômenos de escoamento com transferência de calor, especialmente em processos de produção energética e equipamentos térmicos. Dada sua relevância em diversas aplicações, a simulação numérica possibilita um entendimento mais aprofundado

desses fenômenos. Na atualidade cada vez mais o setor industrial está utilizando essa ferramenta, o que permite aprimorar projetos de engenharia, gerar mais dados e realizar análises mais precisas de situações que não seriam possíveis experimentalmente, além de serem mais rápidas e mais econômicas do que os testes experimentais (MALISKA, 2017). Essas vantagens, aliadas a uma grande variedade de possibilidades na utilização do CFD, estende-se a área de pesquisas científicas o que influencia no avanço de melhorias e desenvolvimentos de tecnologias.

A área da fluidodinâmica computacional, embora não esteja limitada a um conjunto específico de métodos ou técnicas numéricas em suas simulações, costuma empregar tradicionalmente abordagens como Diferenças Finitas (MDF), Volumes Finitos (MVF) e Elementos Finitos (MEF) para resolver as equações características. Tanto o MEF quanto o MDF derivam suas soluções a partir de uma dedução matemática e discretizada das equações constitutivas, enquanto o MVF realiza um equilíbrio de conservação de propriedades dentro de um volume de controle definido para derivar uma equação característica aproximada e correspondente (BATISTA, 2017).

4 METODOLOGIA

Na metodologia, serão abordados os materiais e métodos utilizados neste trabalho, nos quais será possível observar a análise realizada tanto experimentalmente como numericamente no trocador de calor casco e tubo, utilizando apenas água e água com nanofluido. Além disso, neste capítulo, será apresentado o nanofluido utilizado para realização dos experimentos, juntamente com suas propriedades termofísicas e as vazões empregadas. No próximo capítulo, será possível observar o comportamento das temperaturas no trocador, onde após os processamentos dos dados tanto experimental como computacional foi feita a apresentação comparativa por meios gráficos.

4.1 Análise experimental

4.1.1 Nanofluido de grafeno

O nanofluido (**Figura 8**) utilizado neste trabalho foi à base de grafeno com uma concentração de 0,01% em peso, cuja produção foi desenvolvida pelo grupo do Laboratório de Eletroquímica e Materiais Nanoestruturados (LEMAN), localizado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), campus Recife. Na **Tabela 1** pode-se observar os parâmetros utilizados tanto do nanofluido como da água, como condutividade térmica (k), densidade (ρ), viscosidade dinâmica (μ) e calor específico (C_p), necessários para a realização dos cálculos.

Figura 8. Nanofluido de grafeno.

Fonte: AUTOR, 2018.

Tabela 1. Propriedades termofísicas à 25 °C da água e nanofluido

Parâmetros	Água	Nanofluido 0,01%
Densidade (Kg/m ³)	937,5	947,1
Capacidade de calor específico (J/kg.k)	4120	3842
Viscosidade dinâmica (Kg/ms)	0,000891	0,000919
Condutividade térmica (w/mK)	0,62	0,57

Fonte: AUTOR, 2023.

4.1.2 Bancada de trocadores de calor TD360

Os ensaios experimentais deste trabalho foram realizados na bancada de trocadores de calor TD360 do fabricante TecQuipment, localizada no laboratório C24 do IFPE campus Recife. Esta bancada experimental é composta pelo módulo de serviço compacto (TD360), onde nele pode-se utilizar vários tipos de trocadores de calor como tubo concêntrico (TD360a), por placas (TD360b), casco e tubo (TD360c) e o vaso encamisado com serpentina e agitador (TD360d). Os dados fornecidos pela bancada foram coletados com o auxílio do software VDAS (Versatile Data Acquisition System). Com ele, é possível coletar dados importantes para o sistema, como temperatura e vazão, variáveis essas necessárias para realizar os cálculos do

coeficiente global (U), efetividade (ϵ), Nusselt (Nu) e o número de Raynald (Re), por exemplo. Além disso, é possível gerar tabelas no Excel que fornecem dados com média e desvio padrão das temperaturas coletadas.

4.1.2.1 Módulo de serviço TD360

Para realizar os experimentos utilizando apenas água e, posteriormente, água e nanofluido, foi utilizado um módulo de serviço TD360 (**Figura 9**). Esta bancada experimental é composta por dois circuitos, um quente (água/nanofluido) e o outro frio (água/água), onde ambas as vazões são reguladas por uma válvula agulha manual. Através dessas válvulas foram feitas 5 combinações de vazões. No fluido quente, as vazões variaram entre 0,5 e 2,5 L/min, enquanto o fluido frio manteve-se constante em 2,5 L/min, como pode ser visto na **Tabela 2**:

Figura 9. Módulo de serviço TD360.



Fonte: TECQUIPMENT, 2009.

Tabela 2: Variações das vazões.

Variações	Vazão Fluido Quente	Vazão Fluido Frio
1	0,50 L/min	2,50 L/min
2	1,00 L/min	2,50 L/min
3	1,50 L/min	2,50 L/min
4	2,00 L/min	2,50 L/min
5	2,50 L/min	2,50 L/min

Fonte: AUTOR, 2023.

O software VDAS, utilizado para coletar as temperaturas dos testes tanto do circuito quente como do circuito frio, operou de forma que, para cada variação de vazão, aguardou-se 10 minutos para estabilizar a temperatura do circuito quente. Após a estabilização, procedeu-se com 10 leituras de temperatura, uma por segundo, tanto de entrada como de saída de ambos os circuitos, e repetindo o mesmo processo para cada variação de vazão. Após as leituras, o próprio software VDAS disponibilizou todas as temperaturas coletadas e dados estatísticos como a média aritmética e o desvio padrão das temperaturas coletadas, que foram utilizados para determinar os erros de medição, onde a variação máxima ficou abaixo dos 2%.

O circuito do fluido quente, possui um tanque que através de um aquecedor elétrico integrado, eleva a temperatura do fluido que sai do sistema por meio de um dreno da bancada. A variação da temperatura do fluido quente é feita por um controlador de temperatura PID (Proportional Integral Derivative Controller). Este fluido é constantemente lançado do tanque ao trocador e de volta ao mesmo por meio de uma bomba centrífuga. Para o circuito do fluido frio, é alimentado por água natural fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento. Nos testes realizados o fluido frio foi utilizado em temperatura ambiente, enquanto o fluido quente variou entre as temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

4.1.2.2 Trocador de calor casco e tubo TD360c

Entre os quatro trocadores de calor fornecidos pela bancada TD360, foi utilizado neste trabalho o trocador casco e tubo (TD360c). Este trocador de calor (**Figura 10**) é constituído por um casco de acrílico, por onde flui o fluido frio, direcionado internamente por três chicanas. Dentro desse casco, há seis tubos de aço

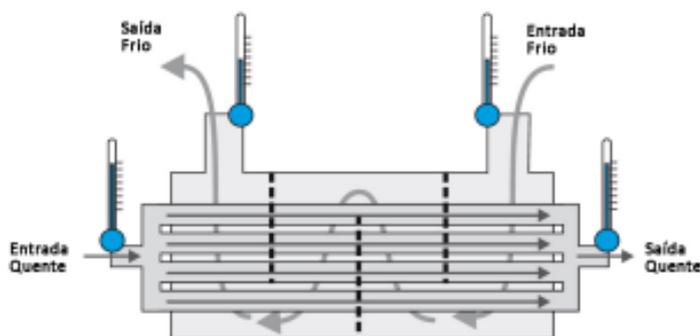
inoxidável envolvidos pelo fluido frio, enquanto o fluido quente percorre o interior desses tubos. O escoamento escolhido para esta pesquisa foi o contrafluxo, caracterizado pelo movimento do fluido frio em direção oposta ao fluido quente, como ilustrado na **Figura 11** a seguir:

Figura 10. Trocador de calor casco e tubo TD360c.



Fonte: TECQUIPMENT, 2009.

Figura 11. Escoamento contrafluxo.



Fonte: TECQUIPMENT, 2009.

A seguir segue a **Tabela 3** com as especificações técnicas do trocador de calor TD360c:

Tabela 3. Especificações do trocador de calor TD360c.

Itens	Detalhes
Largura (mm)	500
Altura (mm)	150
Profundidade (mm)	260
Peso (kg)	2,7
Tubo externo (casco)	Acrílico transparente
Diâmetro interno do casco (mm)	50
Diâmetro externo do casco (mm)	60
Tubo interno	Aço inoxidável
Tubos	7
Diâmetro interno dos tubos (mm)	4
Diâmetro externo dos tubos (mm)	6
Defletores	3
Área média de transferência de calor (m ²)	0,02

Fonte: TECQUIPMENT, 2009.

4.1.2.3 Termopar tipo K

Para realizar as medições de temperatura, tanto de entrada como de saída do trocador de calor, foi utilizado o termopar tipo K (**Figura 12**), que faz parte do módulo de serviço TD360. Sua composição consiste em um fio de chromel, com termoelemento positivo, e outro de alumel, com termoelemento negativo. Esses termopares possuem uma faixa de operação que abrange de -200°C a 1.260°C, com uma resolução de 0,1 °C e um erro de 0,05 °C. Esse tipo de termopar é muito utilizado devido as suas possibilidades de uso, como por exemplo, a possibilidade de ser utilizado de forma contínua em atmosferas oxidantes.

Figura 12. Termopar tipo K usado na bancada experimental.



Fonte: AUTOR, 2023.

4.1.2.4 Válvula de vazão

Os fluidos, tanto quentes quanto frios, passam por válvulas agulha de precisão (**Figura 13**), cujo material é de aço inoxidável com uma precisão de 1%. Através de um dreno, eles fluem até o trocador de calor e, posteriormente, para o tanque destinado ao fluido quente. Já o fluido frio, após sair do trocador, é descartado. Ambas as válvulas podem ser reguladas e observadas através do painel próprio da bancada.

Figura 13. Válvula controladora de vazão.

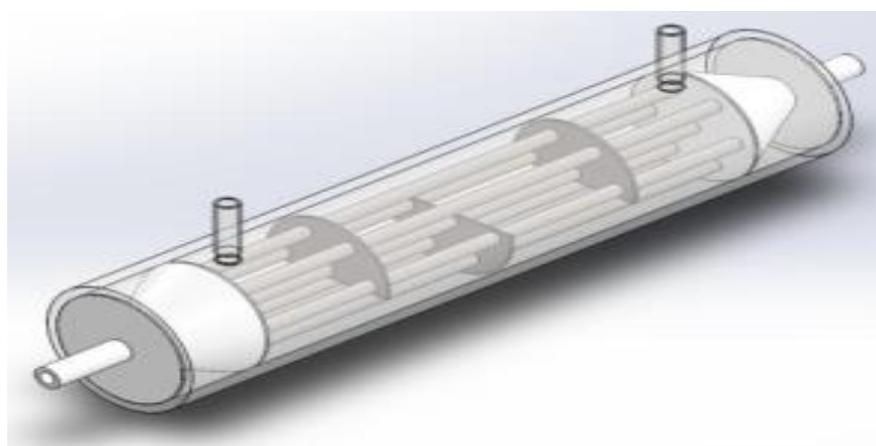


Fonte: TECQUIPMENT, 2009.

4.2 Análise computacional

Para realizar a análise numérica via simulação CFD, foi feita a modelagem 3D (**Figura 14**) do mesmo trocador usado na bancada experimental TD360, o trocador casco e tubo TD360c, levando em consideração as mesmas dimensões e design. A modelagem 3D desse trocador foi desenvolvida por COSTA et al. (2018), utilizando o software Solidworks, que é um software de CAD 3D (Computer Aided Design).

Figura 14. Modelagem 3D do trocador de calor casco e tubo.



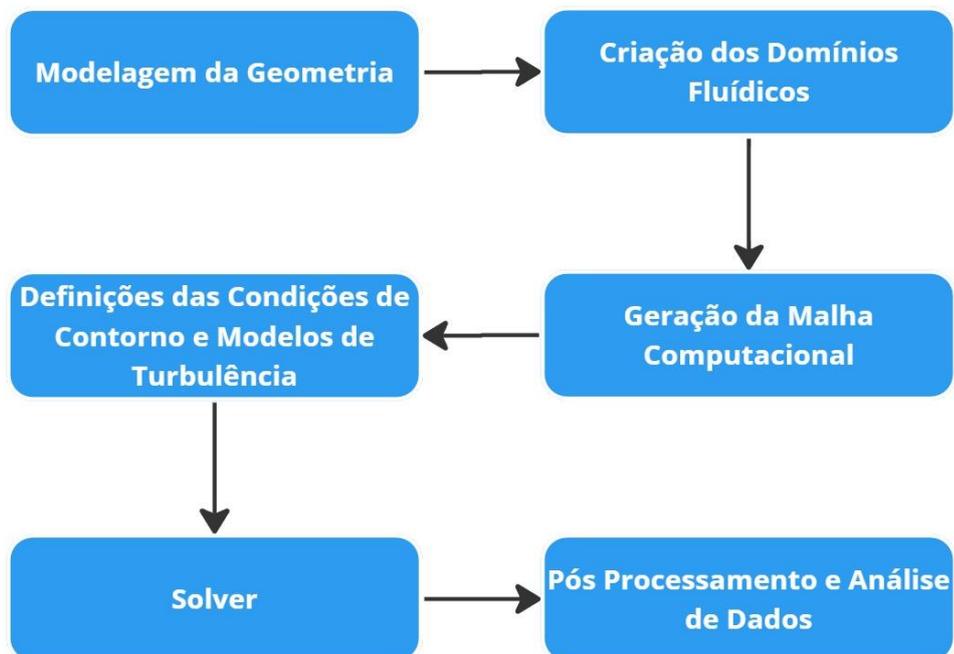
Fonte: AUTOR, 2018.

Para realizar a análise computacional foi utilizado o *Ansys CFX*, que é software de simulação que engloba diversos tipos de análises como estrutural, eletromagnética, fluidodinâmica e multifísica. O manuseio dessa ferramenta é muito comum pelos engenheiros devidos as possibilidades de verificar como um determinado produto vai funcionar no mundo real. Esse tipo de análise permite reduzir custo de protótipos, tempo de produção, melhorar qualidade e diminuir riscos de falha permitindo assim que diversos setores inovem e otimizem produtos com grande rapidez.

O fluxograma (**Figura 15**) a seguir resume sequencialmente as etapas necessárias para realizar uma simulação CFD. Primeiramente, é necessário realizar a modelagem da geometria a ser analisada. Em seguida, são definidas as *named selections* referentes às regiões de entrada e saída para as condições de contorno da geometria a ser estudada. No próximo passo, é gerada a malha computacional,

responsável pela discretização dos domínios por meio de métodos numéricos, como MVF (Método dos Volumes Finitos). A etapa seguinte envolve o solver, que desempenha um papel crucial na aplicação interativa dos cálculos das equações sobre cada volume de controle. É nesse estágio que é possível observar se os cálculos para o sistema convergiram ou não. Por último, temos a análise de dados, onde os resultados da simulação podem ser observados através de gradientes de temperatura, pressão e velocidade, vetores de direção, gráficos, entre outros.

Figura 15. Fluxograma das etapas de uma simulação CFD.



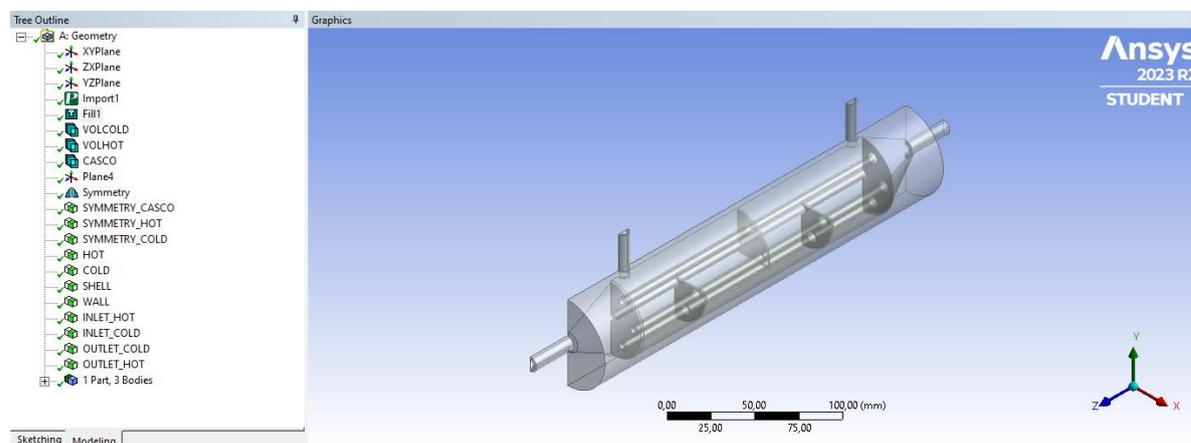
Fonte: AUTOR, 2023.

4.2.1 Geometria

Na primeira etapa da simulação, a geometria foi importada para a ferramenta Design Model, onde foram criados os domínios fluidos e adicionadas as named selections para a geometria do trocador de calor. Como o trocador utilizado é simétrico, foi possível empregar o comando symmetry. Esse comando corta a geometria ao meio e considera, para efeitos de cálculos computacionais, apenas

metade do trocador. Isso permite o uso mais eficiente da memória computacional e reduz o tempo de simulação, como pode ser observado na **Figura 16**.

Figura 16. Geometria importada para o design model.

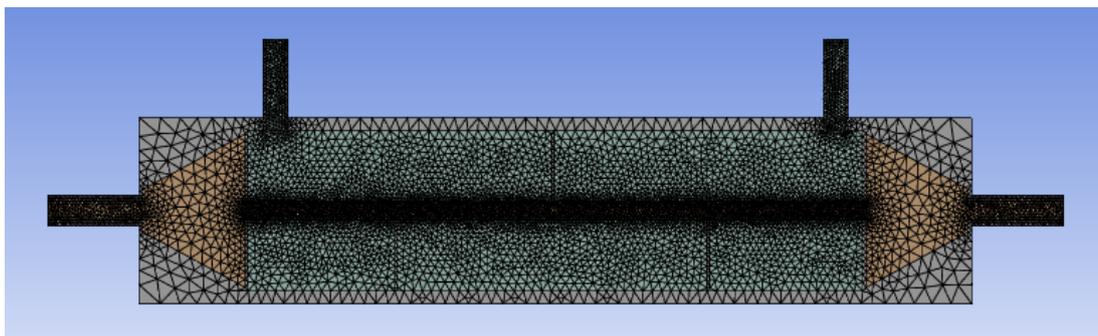


Fonte: AUTOR, 2023.

4.2.2 Malha

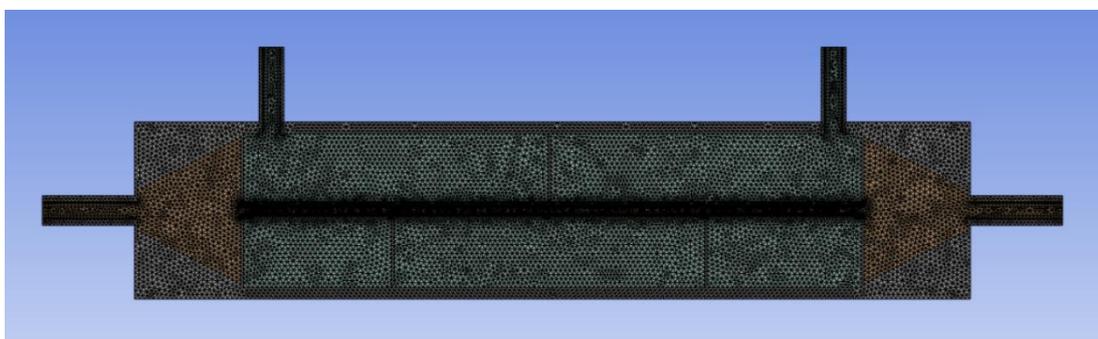
Nesta etapa da simulação, as malhas computacionais que são uma grade numérica que define os volumes de controle e os nós onde os cálculos das variáveis de estudo são resolvidas (SILVA, 2019) foram geradas pelo *Ansys Mesh*. Onde primeiramente, foi criada uma malha grosseira (**Figura 17**), gerada automaticamente pelo próprio software. Em seguida, desenvolvemos uma malha mais refinada (**Figura 18**), com elementos menores, utilizando ferramentas incorporadas do *Ansys Mesh*, como o *Inflation*. Essa ferramenta possibilita a criação de camadas finas em regiões de interesse, sendo frequentemente empregada em áreas com camada limite para algum escoamento. Além disso foi utilizado o *Sizing*, que é outra ferramenta, que gera elementos menores apenas nas regiões definidas, permitindo o refinamento da malha apenas nas áreas que desejamos estudar. Em ambas as malhas foram criados elementos tetraédricos, que é caracterizado por se adequar bem em geometrias mais complexas.

Figura 17. Malha grosseira.



Fonte: AUTOR, 2023.

Figura 18. Malha refinada.



Fonte: AUTOR, 2023.

Na **Tabela 4** e **Tabela 5** é possível ver os parâmetros adotados e os dados de cada malha gerada como o número de elementos e o número de nós:

Tabela 4. Dados da malha Grosseira.

Descrição	Dados
Solver:	CFX
Número de nós:	1937375
Número de elementos:	1432808

Fonte: AUTOR, 2023.

Tabela 5. Dados da malha refinada.

Descrição	Dados
Solver:	CFX
Número de nós:	2918074
Número de elementos:	1901084

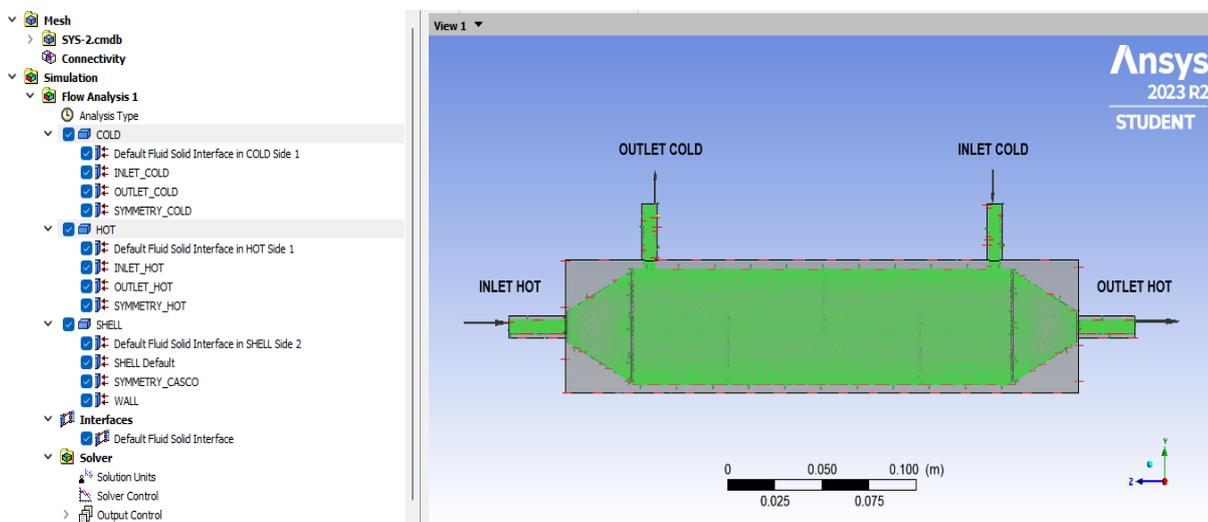
Fonte: AUTOR, 2023.

Numa análise das malhas, observou-se que o ganho de exatidão dos resultados entre a malha mais grosseira e a mais refinada foi abaixo de 1%, o que justifica o uso, para simulações desse modelo de geometria, de uma malha com menos elementos, a fim de reduzir o tempo computacional das simulações.

4.2.3 Configurações

O solver utilizado em todas as simulações deste trabalho foi o *Ansys CFX*, que emprega métodos numéricos, como volumes finitos, para resolver equações que descrevem os comportamentos dos fluidos, como as equações de Navier-Stokes (SILVA, 2019). Com ele, é possível modelar o comportamento de fluidos em sistemas complexos, incluindo escoamentos de fluidos, transferência de calor e reações químicas, graças aos seus recursos avançados, como modelagem de turbulências e interações fluido-estrutura. No setup, foram feitas a seleção dos fluidos utilizados na simulação, assim como adicionado as condições de contorno (**Figura 19**), como temperatura e vazão, as mesmas utilizadas nos testes experimentais realizados na banca TD360. Mediante cálculos analíticos foi determinado que o escoamento no trocador de calor é turbulento.

Figura 19. CFX-pre.



Fonte: AUTOR, 2023.

4.3 Equações governantes

As equações utilizadas nesse trabalho são as de transporte, que incluem conservação de massa, conservação de momento (Navier-Stokes) e conservação de energia, resolvidas com propriedades efetivas.

Neste trabalho, os cálculos foram realizados considerando que os fluidos utilizados são newtonianos, o escoamento é incompressível e permanente, com fluxo contracorrente monofásico turbulento em tubos lisos (sem presença de rugosidade no escoamento). A seguir, estão as equações governantes relevantes para este trabalho em suas formas gerais (BAHIRAEI et al., 2019a):

- Conservação da massa

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

- Conservação do momento

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

- Conservação da energia

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

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;

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

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

p :é pressão estática;

pg :é força gravitacional;

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

4.2.4 Processamento de dados

Para determinar os resultados que o nanofluido entrega em termos de transferência de calor quando aplicado ao trocador de calor casco e tubo, é realizada a análise do coeficiente global de transferência de calor, número de Nusselt, número de Prandtl e sua eficiência.

De acordo com Çengel (2012), a forma de determinarmos a quantidade de calor necessária a ser transferida para que um determinado fluido mude em 1 °C sua temperatura é considerada a taxa de capacidade térmica, onde esse parâmetro pode ser obtido através das equações 7a e 7b.

Após a coleta das temperaturas médias, juntamente com as vazões mássicas de entrada e saída dos fluidos quente e frio nos testes da bancada de trocadores de calor TD360, as equações de vazões mássicas, área de transferência de calor, velocidade média, taxa de capacidade térmica, taxas de transferência de calor, taxa média de transferência de calor e o fluxo de calor são aplicadas. Essas equações podem ser vistas, respectivamente, nas equações 4,5,6,7a,7b,8a,8b,9 e 10.

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

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

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

$$C_{\acute{a}gua} = \dot{m}_{\acute{a}gua} C_{p,\acute{a}gua} \quad (7a)$$

$$C_{nf} = \dot{m}_{nf} C_{p,nf} \quad (7b)$$

$$q_{\acute{a}gua} = \dot{m}_{\acute{a}gua} C_{p,\acute{a}gua} (T_{c2} - T_{c1})_{\acute{a}gua} \quad (8a)$$

$$q_{nf} = \dot{m}_{nf} C_{p,nf} (T_{h1} - T_{h2})_{nf} \quad (8b)$$

$$q_{méd} = \frac{q_{\acute{a}gua} + q_{nf}}{2} \quad (9)$$

$$Q = \frac{q_{méd}}{A} \quad (10)$$

Para determinarmos o valor do coeficiente de transferência de calor para a aplicação do experimento, ele pode ser obtido por meio da equação 11. O cálculo desse parâmetro é indiferente ao tipo de fluido utilizado, mas sim do tipo de experimento realizado, onde fatores como a geometria da superfície, a natureza do movimento do fluido, as propriedades do próprio fluido e a velocidade da massa de fluido influenciam no seu valor (ÇENGEL et al., 2012).

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

A Diferença de Temperaturas Média Logarítmica (LMTD) é um parâmetro frequentemente utilizado em projetos e análises de trocadores de calor tanto nas indústrias como em pesquisas. A LMTD é um parâmetro muito utilizado principalmente em trocadores calor casco e tubo, pois com ele é possível representar efetivamente as diferenças de temperatura em trocadores de calor. Também é possível através da LMTD determinar o desempenho global do trocador de calor, levando em consideração as variações de temperatura ao longo do comprimento do trocador.

Para calcular a LMTD, é necessário realizar os cálculos do ΔT_1 , que é a diferença entre a temperatura de saída do fluido quente e a temperatura de entrada do fluido frio, e ΔT_2 que é a diferença entre a temperatura de entrada do fluido quente e a saída do fluido frio, conforme as equações 12a, 12b e 13:

$$\Delta T_1 = \Delta T_{h2} - \Delta T_{c1} \quad (12a)$$

$$\Delta T_2 = \Delta T_{h1} - \Delta T_{c2} \quad (12b)$$

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

Através da equação 14, é possível realizar o cálculo do Coeficiente Global de Transferência de calor (U). Esse parâmetro é muito importante em várias aplicações, pois com ele é possível determinar o quão eficiente foi a transferência de calor em determinado sistema. Isso indica que quanto maior o coeficiente global, maior é a capacidade de transferir calor.

$$U = \frac{q_{méd}}{\Delta T_{LMTD} A} \quad (14)$$

O número de Reynolds e o número de Prandtl podem ser calculados por meio das equações 15a, 15b e 16, respectivamente. No caso em que $Re \geq 2300$, o escoamento é considerado turbulento. As equações 15a e 15b representam, respectivamente, o número de Reynolds calculado no tubo interno (por onde o nanofluido passa) e na região anular (por onde a água passa).

$$Re_{nf} = \frac{\rho V D_i}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi D_i \mu} \quad (15a)$$

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

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (16)$$

Na investigação da transferência de calor por convecção, é normal considerar à adimensionalização das equações e à combinação de variáveis para reduzir o número total de parâmetros. Ao considerar esse tipo de procedimento, é possível adimensionalizar o coeficiente de transferência de calor (h) por meio do número de Nusselt (Nu), conforme expresso na equação 17. Por isso o número de Nusselt é reconhecido como o coeficiente adimensional de transferência de calor por convecção.

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (17)$$

O número de Nusselt é uma grandeza adimensional que expressa os resultados convectivos em relação à condução em um mesmo fluido, representando,

assim, o aumento na transferência de calor através de uma camada do fluido. Isso implica que, à medida que o valor do número de Nusselt aumenta, a eficácia da convecção também se intensifica (ÇENGEL, 2009).

Para escoamentos laminares em tubos cujo $Re < 2300$, é expressa pela correlação proposta por Schlunder onde a equação é:

$$\overline{Nu} = \sqrt[3]{3,66^3 + 1,61^3 Re Pr \left(\frac{D_i}{L}\right)} \quad (18)$$

Para escoamentos turbulentos, ou seja, $Re > 2300$ é possível utilizar a correlação empírica para escoamentos turbulentos em tubos circulares de Gnielinski. Essa correlação é uma das mais utilizadas na literatura com erros abaixo de 10%. Segue a equação 18 e 19 e as faixas referente aonde é possível aplicar essa correlação:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad \begin{array}{l} 3000 < Re < 5 \times 10^6 \\ 0,5 \leq Pr < 2000 \\ \frac{L}{D} > 10 \end{array} \quad (19)$$

$$f = (0,790 \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad Re < 5 \times 10^6 \quad (20)$$

Para calcular a efetividade da transferência de calor (ε) em um trocador de calor casco e tubo, é necessário calcular o valor de q_{max} , que representa a taxa de transferência de calor máxima possível conforme a Equação 19, e C_{min} , que é o menor valor da capacidade térmica entre as Equações 7a e 7b.

$$q_{max} = C_{min}(T_{h1} - T_{c1}) \quad (21)$$

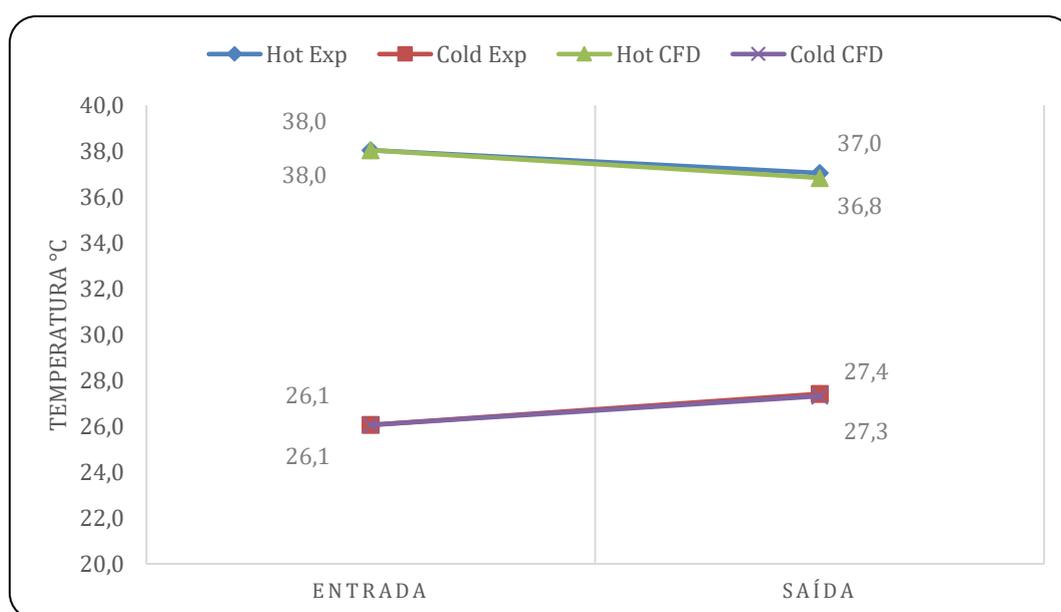
$$\varepsilon = \frac{q_{méd}}{q_{max}} \quad (22)$$

5 RESULTADOS

Neste capítulo, serão abordados os resultados obtidos tanto experimentalmente quanto numericamente. Os resultados serão apresentados por meio de gráficos, nos quais analisaremos e compararemos parâmetros essenciais para avaliação do desempenho do trocador de calor casco e tubo utilizando apenas água, e também água e nanofluido. Em todos os gráficos os resultados foram obtidos variando as temperaturas entre 40, 50 e 60°C, junto com a variação das vazões, conforme a **Tabela 2**.

No **Gráfico 1. Gráfico das temperaturas de entrada e saída do teste experimental e do modelo computacional** a seguir pode-se observar as temperaturas de entrada e saída do fluido quente e frio para o modelo de simulação utilizado nesse trabalho e dos experimentos realizados na bancada de trocadores TD360. As variações máximas e mínimas de temperatura das simulações em relação ao experimental foram de 1,27 e 0,01°C respectivamente. As maiores variações aconteceram no fluido frio, uma possível causa disso pode ser devido à complexidade da geometria na região de escoamento do casco.

Gráfico 1. Gráfico das temperaturas de entrada e saída do teste experimental e do modelo computacional.

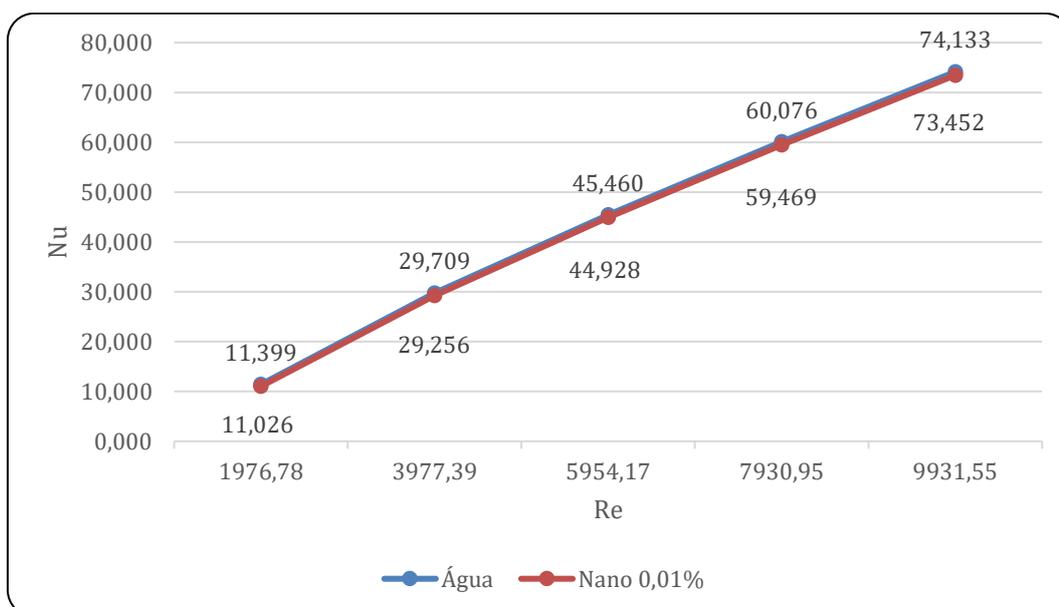


Fonte: AUTOR, 2023.

No **Gráfico 2**, podemos observar que o número de Nusselt da água foi um pouco maior do que a do nanofluido em todos os pontos do número de Reynolds. Isso mostra que, mesmo sendo uma diferença pequena para um nanofluido com concentração de 0,01%, a água mostrou ter um Nusselt maior.

Como o número de Nusselt é proporcional ao número de Reynolds e ao número de Prandtl, e inversamente proporcional ao fator de atrito, para a correlação de Gnielinski, o nanofluido por ter um fator de atrito maior faz com que implique em um número de Nusselt menor.

Gráfico 2. Número de Nusselt x número de Reynolds.



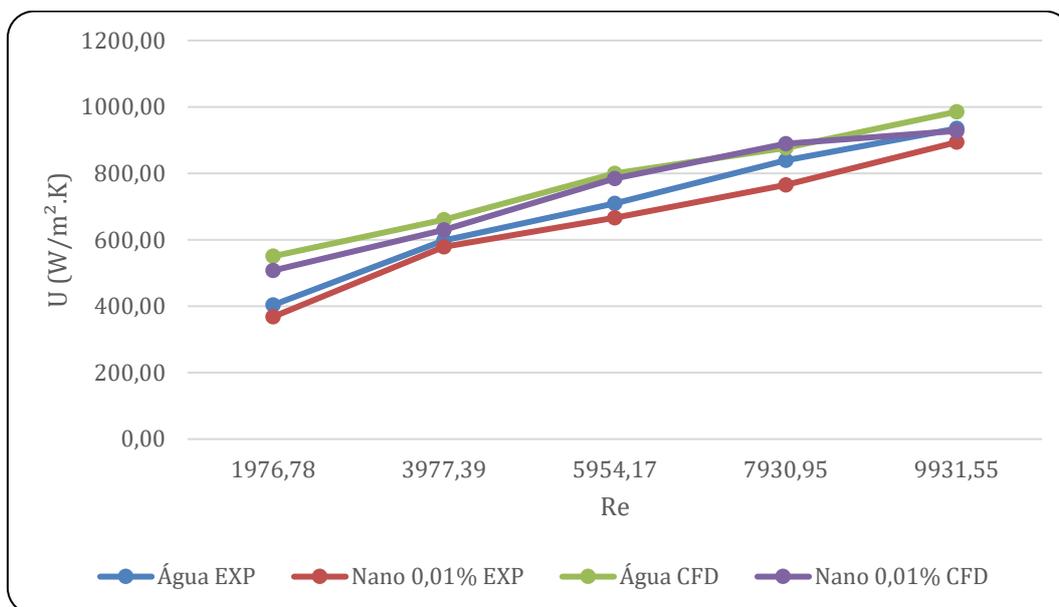
Fonte: AUTOR, 2023.

O coeficiente global de transferência de calor representa um valor que indica o quão eficiente é o sistema em transferir calor, dependendo de fatores como as propriedades dos materiais, ou seja, a resistência térmica dos materiais. Nos **Gráfico 3** **Gráfico 4** **Gráfico 5** podemos observar que, para todas as temperaturas, o comportamento do coeficiente global de transferência de calor é semelhante. Também é possível observar que para todas as temperaturas, tanto os resultados experimentais quanto nos resultados da simulação computacional, a água mostrou ter um coeficiente global de transferência maior do que o nanofluido. Algumas possíveis

explicações para isso podem ser atribuídas ao fato de que o nanofluido utilizado possui baixa concentração. Outra explicação é que para números de Reynolds baixos, a água tende a ter um coeficiente global de transferência maior em comparação ao nanofluido.

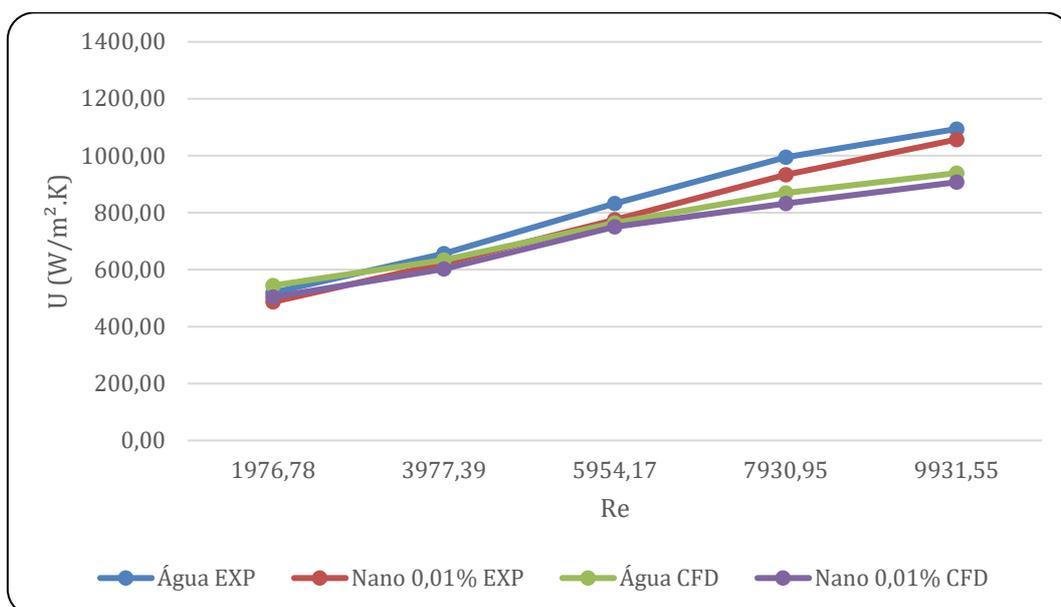
Nos testes experimentais é visto que, para números de Reynolds maiores, o coeficiente global de transferência tende a aumentar. Isso ocorre porque, quanto maior o número de Reynolds, maior é a velocidade do escoamento do fluido. Conseqüentemente, com uma velocidade maior, o escoamento tende a ser mais turbulento aumentando assim a transferência de calor.

Gráfico 3. Gráfico do U Exp. X CFD para a água e nanofluido 40°C.



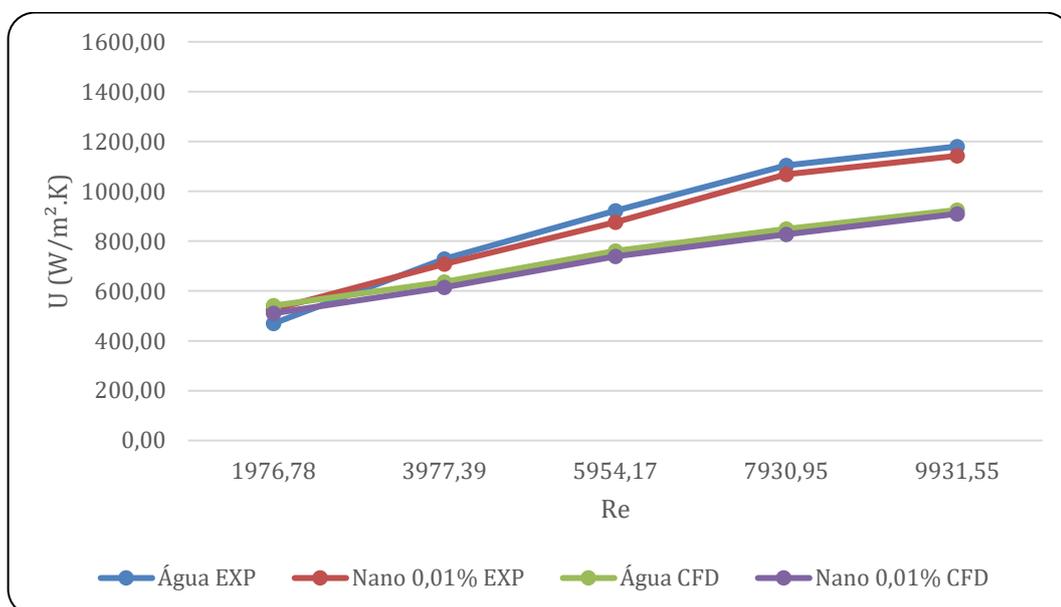
Fonte: AUTOR, 2023.

Gráfico 4. Gráfico do U Exp. X CFD para a água e nanofluido 50°C.



Fonte: AUTOR, 2023.

Gráfico 5. Gráfico do U Exp. X CFD para a água e nanofluido 60°C.



Fonte: AUTOR, 2023.

A efetividade é o valor que quantifica o desempenho real de um trocador de calor em comparação com o desempenho teórico ideal. Esse parâmetro é muito importante, pois ele fornece informações cruciais para entender o quão eficiente o

trocador de calor está operando em determinada condição. Os valores referentes a efetividade vão de 0 a 1, onde 1 seria um trocador ideal.

Nos **Gráfico 6, Gráfico 7, Gráfico 8** a efetividade, tanto no EXP quanto na simulação CFD, mostra o mesmo padrão de comportamento, onde com o aumento do número de Reynolds, a efetividade tende a diminuir.

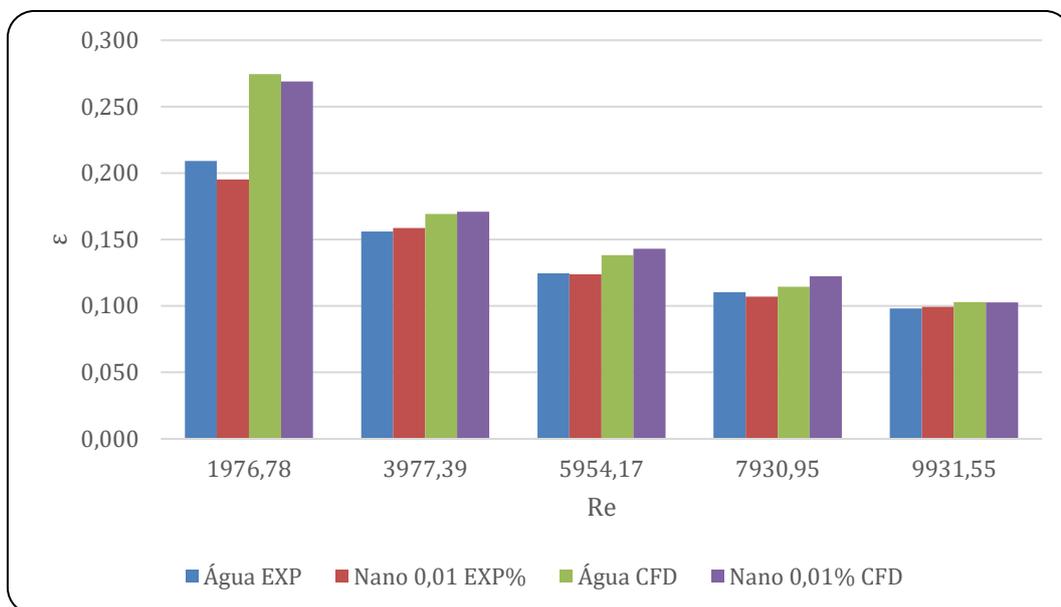
No gráfico 6, que representa a efetividade para temperatura de 40°C, pode-se observar que no experimento, para o número de Reynolds de 3977,39 e 9931,55, o nanofluido teve um desempenho um pouco melhor do que a água. Onde o nanofluido apresentou uma efetividade de 15,9% e 9,9%, enquanto a água teve efetividade de 15,6% e 9,8%, respectivamente. Nos resultados da simulação CFD, o nanofluido superou a água nos valores de Reynolds de 3977,39, 5954,17 e 7930,95. O nanofluido registrou uma efetividade de 17,1%, 14,3% e 12,2%, enquanto a água apresentou 16,9%, 13,8% e 11,5%, respectivamente.

No gráfico 7, que representa a efetividade para temperatura de 50°C, os testes feitos experimentalmente, o nanofluido apresentou uma efetividade maior do que a da água nos valores Reynolds de 3977,39 e 9931,55. Onde a efetividade do nanofluido foi de 16,9% e 11,6%, enquanto a água registrou 16,8% e 11,3%, respectivamente. Já na simulação, essa diferença do nanofluido em relação a água foi observada nos valores de Reynolds de 3977,39, 5954,17, 7930,95 e 9931,55, onde o nanofluido alcançou a efetividade de 16,4%, 13,8%, 11,5% e 10,1%, enquanto a água registrou 16,3%, 13,2%, 11,4% e 9,9%, respectivamente.

No gráfico 8, que representa a efetividade para temperatura de 60°C, nos testes experimentais o nanofluido superou a água em todos os números de Reynolds. Os valores de efetividade do nanofluido foram 27,1%, 19%, 15,8%, 14,4% e 12,4%, enquanto os da água foram 21,1%, 18,5%, 15,7%, 14,1% e 12,1%, respectivamente. Na simulação, o nanofluido também apresentou uma efetividade superior à da água, sendo para o nanofluido a efetividade de 16,7%, 13,5%, 11,5% e 10,1%, e água de 16,4%, 13,2%, 11,1% e 9,7%, respectivamente, sendo inferior apenas no número de Reynolds de 1976,78.

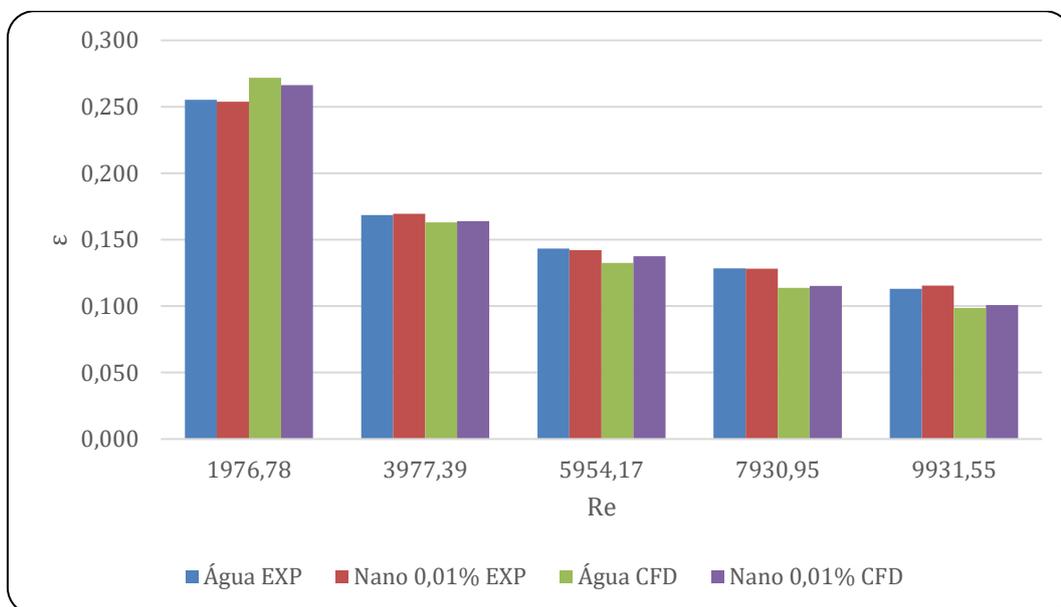
Através desses dados, pode-se compreender que, com um aumento da temperatura mesmo para uma concentração pequena de grafeno, o nanofluido tendo a performar melhor que da água.

Gráfico 6. Gráfico da efetividade EXP e CFD para a água e nanofluido a 40°C.



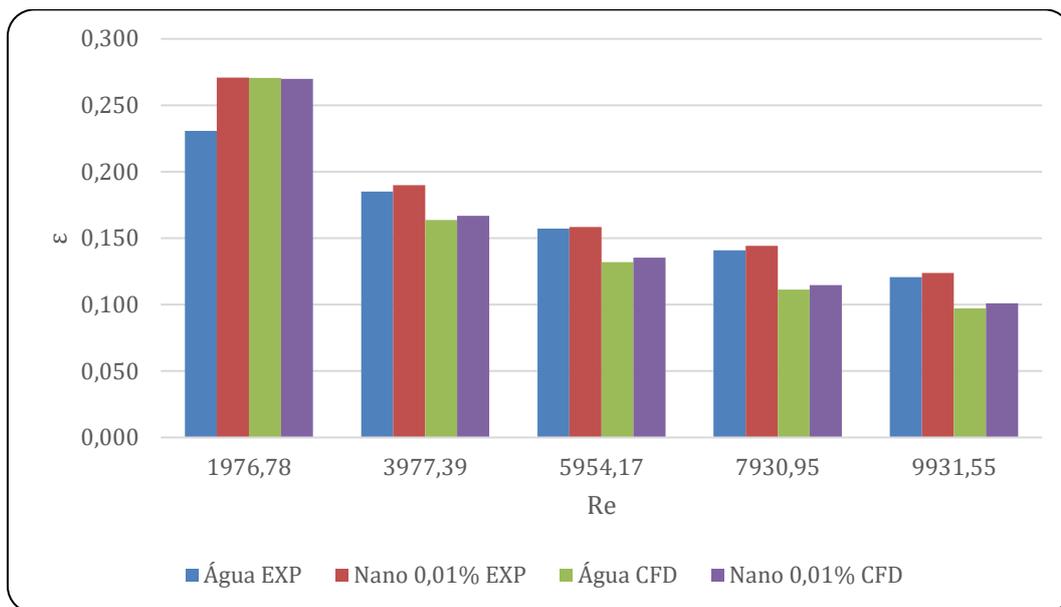
Fonte: AUTOR, 2023.

Gráfico 7. Gráfico da efetividade EXP e CFD para a água e nanofluido a 50°C.



Fonte: AUTOR, 2023.

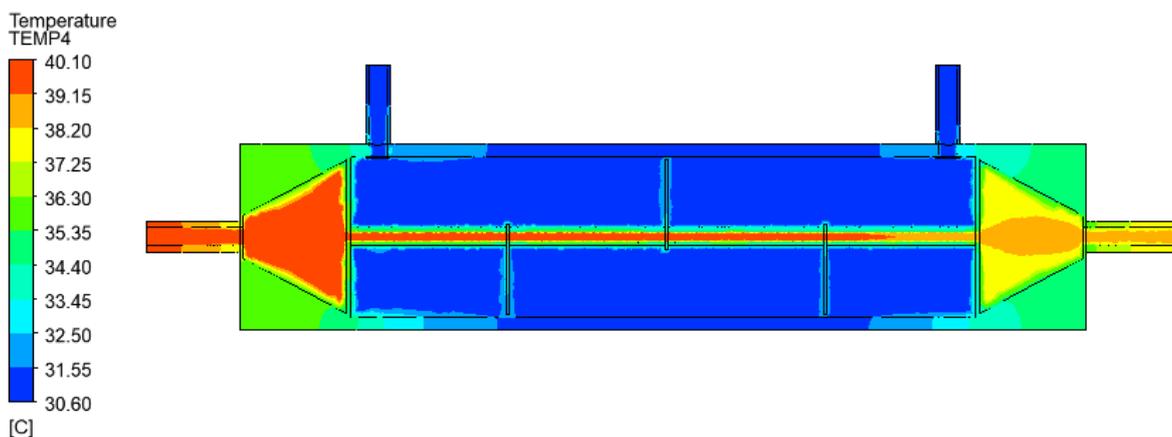
Gráfico 8. Gráfico da efetividade EXP e CFD para a água e nanofluido a 60°C.



Fonte: AUTOR, 2023.

Na **Figura 20** pode-se observar o comportamento da temperatura interna de ambos os fluidos no trocador de calor casco e tubo no modelo CFD. Onde é possível observar toda variação de temperatura que acontece no decorrer do trocador de calor. No lado esquerdo da imagem pode-se observar as paletas de cores referente as temperaturas dos fluidos, que vai do vermelho ao azul, indicando a temperatura máxima e mínima. Onde percebe-se a queda gradual de temperatura ao longo do escoamento dentro dos tubos internos do fluido quente.

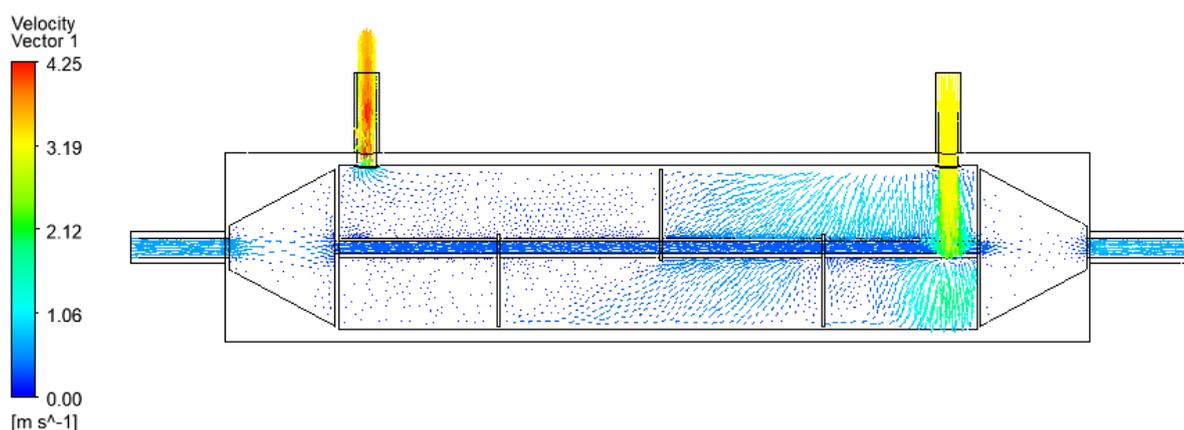
Figura 20. Troca térmica no trocador de calor casco e tubo.



Fonte: AUTOR, 2023.

Na **Figura 21**, é possível observar, por meio de vetores, a velocidade dos fluidos no trocador de calor casco e tubo. Nota-se que a velocidade dentro dos tubos internos diminui um pouco, pois a área da secção transversal somada é maior do que a área da secção de entrada no trocador de calor. Portanto, com uma área maior, a velocidade diminui. Já no fluido que escoava dentro do casco, percebe-se que a velocidade diminui ao longo do casco devido às chicanas, que fazem com que o fluido percorra por mais tempo ao longo do casco. A velocidade só aumenta na saída do casco, pois, com a área da seção de saída menor, essa velocidade tende a aumentar.

Figura 21. Velocidade dos fluidos no trocador de calor casco e tubo.



Fonte: AUTOR, 2023.

6 CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível observar a aplicação prática, por meio de testes experimentais, do nanofluido à base de grafeno em um equipamento utilizado em diversos setores industriais, que é o trocador de calor casco e tubo. Foi observado, em vários testes, que mesmo para uma baixa concentração de grafeno, o nanofluido apresentou bons resultados. A simulação CFD também demonstrou bons resultados, com boa concordância com os dados experimentais, o que evidencia a qualidade do modelo utilizado para as simulações.

Os parâmetros utilizados neste trabalho para estudar o comportamento do trocador de calor casco e tubo utilizando água e nanofluido, como o número de Reynolds, número de Nusselt, coeficiente global de transferência de calor e efetividade, mostraram-se extremamente importantes para se obter um melhor entendimento do desempenho do trocador de calor.

Nesse trabalho observou-se que, o nanofluido teve uma efetividade maior do que a água em diversos testes, e que a diferença na efetividade do trocador utilizando esses fluidos tende a aumentar com o aumento da temperatura, sendo a maior diferença de 6% a mais para o nanofluido em relação à água, quando a temperatura foi de 60°C.

Visto que, para uma baixa concentração de grafeno no nanofluido, não foi observada uma grande diferença de desempenho no trocador de calor em comparação com a água. Para futuros trabalhos, os testes experimentais e numéricos podem ser realizados com nanofluidos que contenham concentrações mais elevadas de grafeno e com outras configurações, como, por exemplo, utilizando o nanofluido com fluido frio em vez de fluido quente. Juntamente com esses testes também é válido realizar uma análise termohidráulica, afim de verificar os efeitos da perda de carga no desempenho térmico do trocador de calor.

REFERENCIAS

ABD, A. A.; KAREEM, M. Q.; NAJI, S. Z. Performance analysis of shell and tube heat exchanger: Parametric study. **Case Studies in Thermal Engineering**, 2018.

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.

ANDRZEJCZYK, R.; MUSZYNSKI, T. Thermodynamic and geometrical characteristics of mixed convection heat transfer in the shell and coil tube heat exchanger with baffles. **Applied Thermal Engineering**, 2017.

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

ARSHAD, A.; JABBAL, M.; YAN, Y.; REAY, D.; A Review on Graphene based Nanofluids: Preparation, Characterization and Applications. **Journal of Molecular Liquids**, v 279, p. 444-484, 2019a.

BATISTA, J. N. M. **Análise da fluidodinâmica e da transferência de calor em leito de jorro operando com sementes de sorgo utilizando CFD**. 2017. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós- graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

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.

BIZERRA, A. M. C. O impacto ambiental dos combustíveis fósseis e dos biocombustíveis: as concepções de estudantes do ensino médio sobre o tema. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (Revbea)**, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 299-315, 2018.

BOEHM, H. P.; STUMPP, E. Citation errors concerning the first report on exfoliated graphite. **Carbon**, v. 45, n. 7, p. 1381-1383, 2007.

CARVALHO, P. R. F. **Termometria, calorimetria e transmissão de calor**. Petrobrás - Unicenp, 2002.

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, A. YUNGUS.; GHAJAR, J. Afshin. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals and applications**. 4. ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2011.

ÇENGEL, A. YUNGUS.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicações**. 4. ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2012.

EDWARDS, John E. Design and rating shell and tube heat exchangers. **P & I Design Ltd**, Teesside, v. 1, n. 29, p.1-30, 2008.

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.

EPE. **Balanco Energético Nacional**, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 17 nov. 2023

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.

GOUVEIA, Rosimar. **Calorimetria**. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/calorimetria/>. Acesso em: 7 dez. 2023

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.

HASSAN, N. M; MARION, B. D. G. Grafeno: Inovações, Aplicações e sua Comercialização. **Revista Interfaces Científicas**, v.2, n.1, 2006.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KAKAÇ, S. et al. **Heat exchangers: selection, rating, and thermal design**. 3 ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. **Princípios de Transferência de calor**. 7 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2018.

NOVOSELOV, K. S.; FALKO, V. I.; COLOMBO, L.; GELLERT, P. R.; SCHWAB, M. G.; KIM, K. A roadmap for graphene. **Nature**, v. 492, p. 192-200, 2012.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MENDONÇA, Leonardo Henrique Paiva. **Grafeno e a sua Produção a Partir da Grafita Natural**. 2018. 47 f. TCC (Graduação) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2018.

MARQUES, S.; HADDAD, J.; MARTINS, S. **Eficiência energética**. 1 ed. Itajubá: FUPAI, 2007.

ÖZERİNÇ, S., KAKAÇ, S., & YAZICIOĞLU, A. G. Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review. **Microfluidics and Nanofluidics**. v. 8, n. 2, p. 145-170, 2010.

PAL, E. et al. CFD simulations of shell-side flow in a shell-and-tube type heat exchanger with and without baffles. **Chemical Engineering Science**, v. 143, p. 314 – 340, 2016.

P. MARTÍNEZ-MERINO, P. ESTELLÉ, R. ALCÁNTARA, I. CARRILLO BERDUGO, J. NAVAS Thermal performance of nanofluids based on tungsten disulphide nanosheets as heat transfer fluids in parabolic trough solar collectors. **Solar Energy Materials and solar cells**, v. 247, 2022.

RICARDO BORDIGNON. Desempenho tribológico de Grafeno funcionalizado como aditivo em óleo lubrificante de baixa viscosidade. 2018. 80f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2018.

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.

SHAH, K. Ramesh.; SEKULIĆ, Dusan. P. **Fundamentals of heat exchangers design**. 1 ed, Wiley: New Jersey, 2003.

SIDIK, N. A. C., MOHAMMED, H. A., ALAWI, O. A., & SAMION, S. A review on preparation methods and challenges of nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 1, p. 115 - 125, 2014.

SILVA, CRISTIANO VITORINO. **Introdução ao Ansys CFX**. 2019. Apostila, 45 f.

SOUZA, Monique Silveira. **ANÁLISE TÉRMICA DE UM TROCADOR DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBOS PARA RESFRIAMENTO DO RESÍDUO DE UMA UNIDADE DE DESTILAÇÃO ATMOSFÉRICA**. 2013. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

TU, J.; YEOH, G.; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach**. 2 ed. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2013. 441 p.