



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
PERNAMBUCO
CAMPUS RECIFE
ENGENHARIA MECÂNICA / PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO
E INOVAÇÃO**

MATHEUS HENRIQUE DE OLIVEIRA DEMÉTRIO

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE TROCADORES DE CALOR BASEADOS EM
SUPERFÍCIES MÍNIMAS TRIPLAMENTE PERIÓDICAS (TPMS)**

RECIFE

2023

MATHEUS HENRIQUE DE OLIVEIRA DEMÉTRIO

**ANÁLISE DE EFECIÊNCIA DE TROCADORES DE CALOR BASEADOS EM
SUPERFÍCIES MÍNIMAS TRIPLAMENTE PERIÓDICAS (TPMS)**

Trabalho de conclusão de curso. Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Recife, como requisito para obtenção da titulação de Engenheiro Mecânico. Sob Orientação do Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.

Co-orientador: Frederico Duarte de Menezes

RECIFE

2023

D377a
2023

Demétrio, Matheus Henrique de Oliveira.

Análise de eficiência de trocadores de calor baseados em superfícies mínimas triplamente periódicas (TPMS)/ Matheus Henrique de Oliveira Demétrio. --- Recife: O autor, 2023.
58f. il. Color.

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

Inclui Referências.

Orientador: Professor Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.

Coorientador: Dr. Frederico Duarte Menezes

1. Engenharia mecânica. 2. Trocadores de calor compacto. 3. Eficiência térmica.
4. Superfícies mínimas triplamente periódica. I. Título. II. Costa, José Ângelo Peixoto da. (orientador). III. Menezes, Frederico Duarte. IV. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 620.1 (22 ed.)

MATHEUS HENRIQUE DE OLIVEIRA DEMÉTRIO

**ANÁLISE DE EFECIÊNCIA DE TROCADORES DE CALOR BASEADOS EM
SUPERFÍCIES MÍNIMAS TRIPLAMENTE PERIÓDICAS (TPMS)**

Trabalho aprovado. RECIFE, 31/07/2023.

Professor Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.

Frederico Duarte de Menezes

Alex Elton de Moura

RECIFE

2023

Dedico este trabalho de conclusão de curso a todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante essa jornada acadêmica. Aos meus familiares, pelo amor incondicional, apoio e compreensão em todos os momentos. Vocês são minha fonte de inspiração e motivação para buscar sempre o melhor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a conclusão deste trabalho de conclusão de curso.

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo dessa jornada acadêmica. Sua presença e orientação foram fundamentais para superar os desafios e alcançar este importante marco em minha vida.

À minha querida mãe, Evania Demétrio, meu porto seguro e fonte de inspiração, agradeço por todo o amor, apoio e incentivo incondicional que sempre me proporcionou. Sua dedicação e cuidado foram fundamentais para minha formação como pessoa e estudante.

Ao meu pai, Genildo Jeová Demétrio, meu exemplo de honestidade e trabalho árduo, agradeço por estar sempre ao meu lado, encorajando-me a seguir meus sonhos e buscando a excelência em tudo o que faço.

Ao meu irmão, Lucas Demétrio, por compartilhar comigo a jornada acadêmica e ser meu companheiro incondicional, agradeço por todas as palavras de incentivo e por tornar essa caminhada mais leve e divertida.

À minha amada namorada, Rebeka Araujo, agradeço por todo o amor, compreensão e apoio que me dedicou ao longo deste percurso. Sua presença em minha vida tornou tudo mais significativo e especial.

Aos meus amigos, professores e orientadores, em especial ao Professor Dr. José Ângelo Peixoto da Costa Frederico Duarte de Menezes, sou imensamente grato por compartilharem seu conhecimento, experiência e dedicação comigo. Seus ensinamentos foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento como estudante e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse realizado com sucesso. Cada apoio, incentivo e colaboração foram fundamentais para alcançar este importante objetivo. Que esta conquista seja dedicada a todos que estiveram presentes em minha jornada acadêmica, e que possamos continuar crescendo e aprendendo juntos ao longo da vida.

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original."

- Albert Einstein

RESUMO

Este estudo tem como objetivo abordar a eficiência de trocadores de calor compactos, focando na comparação entre aqueles baseados em superfícies mínimas triplamente periódicas (TPMS) e os water coolers convencionais. Os TPMS têm recebido atenção crescente na pesquisa de transferência de calor devido às suas propriedades únicas que permitem aumentar a área de superfície disponível para a troca térmica, levando a um aprimoramento significativo no desempenho dos trocadores de calor. A busca por sistemas de resfriamento mais eficientes e sustentáveis tem impulsionado a exploração de abordagens inovadoras como as TPMS. Para atingir o objetivo proposto, foram empregadas simulações numéricas com o auxílio da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e análises experimentais. Além disso, o estudo considerou o uso de nanofluido de grafeno, uma substância promissora para aprimorar a transferência de calor. Os resultados das simulações e experimentos permitiram comparar diretamente o desempenho dos water coolers convencionais e das TPMS, destacando o papel do nanofluido de grafeno na eficiência térmica. Entre os principais achados, constatou-se que as TPMS apresentam uma perda de carga significativa. Essa perda de carga refere-se à redução da pressão do fluido à medida que passa pelo interior das estruturas TPMS, o que pode impactar negativamente o desempenho dos trocadores de calor. Portanto, para a aplicação prática das TPMS, torna-se essencial o desenvolvimento de estratégias de otimização para minimizar esse efeito indesejado. Além disso, o estudo evidenciou que o nanofluido de grafeno demonstrou uma eficiência notável na transferência de calor em certas condições experimentais, superando a água destilada, que foi usada como fluido de referência. Esse resultado sugere a possibilidade de aproveitar as propriedades do grafeno em futuras aplicações de trocadores de calor, abrindo caminho para pesquisas adicionais e desenvolvimentos na área. No entanto, é importante ressaltar que o estudo foi conduzido utilizando apenas água destilada como fluido de teste, o que limita a representatividade dos resultados para outras aplicações que envolvam diferentes fluidos. Portanto, há uma lacuna na pesquisa em relação à validação experimental das TPMS com outros fluidos, uma área que pode ser explorada em trabalhos futuros. Em suma, esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento em eficiência térmica de trocadores de calor compactos e destaca a importância das TPMS como uma abordagem promissora para melhorar a transferência de calor. Os resultados também apontam para a necessidade de estudos adicionais com foco na otimização das TPMS e na aplicação prática do grafeno em trocadores de calor, visando aprimorar a eficiência e a sustentabilidade desses sistemas em diversas aplicações de engenharia e tecnologia.

Palavras-Chaves: Trocadores de calor compactos; Superfícies mínimas triplamente periódicas (TPMS); eficiência térmica.

ABSTRACT

This study aims to address the efficiency of compact heat exchangers, focusing on the comparison between those based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) and conventional water coolers. TPMS have received increasing attention in heat transfer research due to their unique properties that allow for an increase in the available surface area for thermal exchange, leading to a significant enhancement in the performance of heat exchangers. The search for more efficient and sustainable cooling systems has driven the exploration of innovative approaches such as TPMS. To achieve the proposed objective, numerical simulations using computational fluid dynamics (CFD) and experimental analyses were employed. Additionally, the study considered the use of graphene nanofluid, a promising substance to enhance heat transfer. The results of simulations and experiments allowed for a direct comparison of the performance between conventional water coolers and TPMS, highlighting the role of graphene nanofluid in thermal efficiency. Among the main findings, it was observed that TPMS exhibit a significant pressure drop, which refers to the reduction in fluid pressure as it passes through the interior of TPMS structures. This can negatively impact the performance of heat exchangers. Therefore, for practical application of TPMS, it becomes essential to develop optimization strategies to minimize this undesired effect. Furthermore, the study revealed that graphene nanofluid demonstrated remarkable efficiency in heat transfer under certain experimental conditions, outperforming distilled water, which was used as the reference fluid. This result suggests the possibility of harnessing the properties of graphene in future heat exchanger applications, opening the way for further research and developments in the field. However, it is important to note that the study was conducted using only distilled water as the test fluid, limiting the representativeness of the results for other applications involving different fluids. Therefore, there is a research gap concerning the experimental validation of TPMS with other fluids, an area that can be explored in future works. In summary, this research contributes to the advancement of knowledge in thermal efficiency of compact heat exchangers and highlights the importance of TPMS as a promising approach to improve heat transfer. The results also point to the need for further studies focusing on TPMS optimization and practical application of graphene in heat exchangers, aiming to enhance the efficiency and sustainability of these systems in various engineering and technological applications.

Keywords: Compact heat exchangers; Triply periodic minimal surfaces (TPMS); thermal efficiency.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Geral	12
1.1.2 Específicos	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E TROCADORES DE CALOR COMPACTO.....	13
2.1.1 Eficiência Térmica em Trocadores de Calor TPMS	15
2.1.2 Parâmetros relacionados com TPMS em trocadores de calor	16
2.2 TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACES	17
2.2.1 Equações do TPMS.....	20
2.3 APLICAÇÃO DE TPMS EM TROCADORES DE CALOR	24
2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DE TROCADORES DE CALOR COM TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACES.....	26
2.5 WATER COLLER.....	27
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	29
3.1.1 Testes Iniciais - Water Cooler	29
Fonte: Autor, 2023	30
3.2 ANÁLISE NUMÉRICA	33
3.2.1 Definição da Geometria.....	34
3.2.2 Construção do Modelo Computacional	34
3.3 METODOLOGIA ANÁLISE COMPARATIVA	37
3.3.1 Parâmetros Water Coller Convencional	37
3.3.2 Parâmetros Sharp - 10mm.....	39
3.3.3 Parâmetros Gyroid - 10 mm	40
4 RESULTADOS e análises.....	42
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	42
4.2 RESULTADOS NUMÉRICOS	44
4.2.1 Variação de Temperatura	44
4.3 ANÁLISE DAS LINHAS DE FLUXOS DAS GEOMETRIAS	46

5 CONSIDERAÇÕES finais	49
6. TRABALHOS FUTUROS	51
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A análise da eficiência de trocadores de calor compacto tem sido um campo de pesquisa essencial na busca por soluções eficientes e sustentáveis de transferência de calor. Com a crescente demanda por sistemas de resfriamento cada vez mais potentes e eficazes, pesquisadores têm explorado diferentes abordagens para melhorar o desempenho desses dispositivos. Nesse contexto, as superfícies mínimas triplamente periódicas têm surgido como uma alternativa promissora (YU, 2019, p.126)

A definição de superfícies mínimas triplamente periódicas tem sido amplamente estudada na literatura científica, proporcionando uma base teórica sólida para o desenvolvimento de trocadores de calor compacto altamente eficientes. De acordo com Johnson *et al.* (2018, p.102), as superfícies mínimas triplamente periódicas apresentam propriedades únicas que permitem o aumento da área de superfície disponível para a transferência de calor, resultando em uma melhoria significativa no desempenho térmico dos trocadores de calor.

Comparativamente, os *water coolers* têm sido amplamente utilizados como soluções de resfriamento eficiente em diversas aplicações de processadores. No entanto, apesar de sua popularidade, esses sistemas podem apresentar limitações em termos de eficiência energética e tamanho compacto. Segundo Smith *et al.* (2020, p.12), os *water coolers* convencionais podem ocupar um espaço considerável e requerem um consumo significativo de água, o que pode ser uma desvantagem em ambientes onde a disponibilidade de recursos é limitada.

Diante desse cenário, é crucial explorar alternativas viáveis e eficientes que possam superar as limitações dos *water coolers* convencionais. Neste estudo, foi proposto uma análise comparativa entre trocadores de calor compacto baseados em superfícies mínimas triplamente periódicas e *water coolers* convencionais. O objetivo deste trabalho é investigar o desempenho térmico desses dispositivos, considerando parâmetros como eficiência energética, tamanho compacto e consumo de recursos (EDBERG, 1996)

Ao examinar criticamente a eficiência dos trocadores de calor compacto baseados em superfícies mínimas triplamente periódicas em relação aos *water coolers*, podemos avançar no desenvolvimento de sistemas de resfriamento mais eficazes, que atendam às demandas crescentes de eficiência energética e sustentabilidade. Espera-se que esta pesquisa contribua

para o avanço no campo da transferência de calor e forneça *insights* valiosos para o projeto e implementação de trocadores de calor mais eficientes e compactos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Realizar uma análise comparativa entre trocadores de calor compacto baseados em superfícies mínimas triplamente periódicas e *water coolers* convencionais, investigando o desempenho térmico desses dispositivos.

1.1.2 Específicos

- Revisar a literatura científica sobre as superfícies mínimas triplamente periódicas e suas propriedades únicas em relação à transferência de calor.
- Geração da TPMS para substituição do *Water Cooler* Convencional
- Simulação CFD dos sistemas
- Análise de resultados das simulações avaliadas
- Publicações em congressos e revistas

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E TROCADORES DE CALOR COMPACTO

A transferência de calor é uma área fundamental na engenharia térmica, que envolve o estudo dos mecanismos pelos quais a energia térmica é transferida de um sistema para outro. Segundo Incropera e DeWitt (2007, p.222), a transferência de calor ocorre por três mecanismos: condução, convecção e radiação. A condução refere-se à transferência de calor através de um meio sólido ou estacionário. A convecção envolve o transporte de calor por meio de um fluido em movimento. Já a radiação ocorre por meio de ondas eletromagnéticas.

Os trocadores de calor compactos são equipamentos amplamente utilizados na indústria para a transferência eficiente de calor entre dois fluidos. De acordo com Bergman *et al.* (2011, p.90), os trocadores de calor compactos apresentam um design compacto e eficiente, permitindo uma grande área de transferência de calor em um espaço reduzido. Isso é possível devido à utilização de superfícies de troca de calor altamente eficientes, como placas, tubos aletados ou microcanais.

Um dos tipos mais comuns de trocadores de calor compactos é o trocador de calor de placas. Segundo Kern (1950, p.111), esse tipo de trocador de calor consiste em uma série de placas paralelas com canais de escoamento entre elas. Os fluidos quente e frio passam por esses canais alternadamente, promovendo uma troca eficiente de calor por convecção. As placas são projetadas com padrões de fluxo que maximizam a transferência de calor, garantindo uma alta eficiência térmica.

Além dos trocadores de calor de placas, os trocadores de calor de tubos aletados também são amplamente utilizados. Segundo Kakac e Liu (2002, p.122), esses trocadores de calor consistem em tubos com aletas fixadas em suas superfícies externas. As aletas aumentam a área de superfície disponível para a transferência de calor por convecção, promovendo uma melhor eficiência térmica. Os trocadores de calor de tubos aletados são comumente empregados em sistemas de refrigeração e condicionamento de ar.

Os trocadores de calor compactos também podem ser projetados com microcanais, que são pequenos canais sólidos com dimensões da ordem de micrômetros. De acordo com Tuckerman e Pease (1981), os microcanais permitem uma movimentação altamente

confinada, o que resulta em uma área de superfície significativamente maior para a transferência de calor. Essa abordagem é especialmente útil em aplicações onde o espaço é limitado e é necessário alcançar altas taxas de transferência de calor.

Uma das principais vantagens dos trocadores de calor compactos é a sua alta eficiência térmica. De acordo com Kandlikar *et al.* (2006, p.341), devido ao design compacto e à maximização da área de superfície, esses trocadores de calor têm a capacidade de transferir grandes quantidades de calor em um espaço reduzido. Isso é particularmente importante em aplicações industriais, onde a eficiência energética é crucial.

A eficiência térmica dos trocadores de calor compactos está relacionada à geometria dos canais de fluxo e ao arranjo dos fluidos. Conforme destacado por Taler *et al.* (2012), a escolha adequada desses parâmetros influencia diretamente a eficiência do trocador de calor. Portanto, o projeto cuidadoso desses elementos é essencial para obter o melhor desempenho.

A otimização do fluxo de fluidos nos trocadores de calor compactos é fundamental para garantir uma transferência de calor eficiente. Segundo Kakac *et al.* (2011, p.94), a distribuição uniforme do fluido ao longo do trocador de calor é crucial para evitar o acúmulo de calor e a formação de regiões de baixa velocidade, o que poderia diminuir a eficiência térmica do sistema.

Trocadores de calor compactos são frequentemente utilizados em aplicações de refrigeração, onde a dissipação de calor é crucial. De acordo com Taler *et al.* (2015, p.301), esses trocadores de calor são projetados para suportar altas taxas de fluxo de calor e proporcionar uma troca térmica eficiente em sistemas de refrigeração, como condicionadores de ar e refrigeração de processos industriais.

A seleção adequada do material do trocador de calor compacto é essencial para garantir sua durabilidade e eficiência. Segundo Garcia *et al.* (2017, p.91), a resistência à corrosão, a condutividade térmica e a facilidade de fabricação são fatores importantes a serem considerados ao escolher o material adequado para o trocador de calor.

A eficiência dos trocadores de calor compactos pode ser melhorada através do uso de técnicas avançadas de transferência de calor, como a utilização de nanofluidos. De acordo com Lee *et al.* (2009, p.51), os nanofluidos, que são suspensões de nanopartículas em um líquido base, apresentam uma maior condutividade térmica em comparação com os fluidos convencionais, o que pode melhorar a eficiência do trocador de calor.

2.1.1 Eficiência Térmica em Trocadores de Calor TPMS

A eficiência térmica em trocadores de calor baseados em Geometrias *Triply Periodic Minimal Surfaces* (TPMS) é um tópico da área de engenharia de transferência de calor. As TPMS são estruturas tridimensionais altamente complexas e com propriedades únicas que têm sido amplamente estudadas devido ao seu potencial para melhorar o desempenho dos trocadores de calor (OLIVEIRA, 2015, p.301).

A eficiência térmica refere-se à capacidade do trocador de calor de transferir calor de forma eficiente entre os fluidos em contato. Nas geometrias TPMS, a eficiência térmica é influenciada por vários fatores, incluindo a geometria específica da estrutura, o tamanho dos canais de fluxo e a velocidade do fluido (DOS SANTOS SILVA, 2012, p.201).

Uma das principais vantagens das geometrias TPMS é a sua capacidade de distribuir o fluxo de fluido de forma mais uniforme ao longo da superfície do trocador de calor. Isso permite uma melhor distribuição do calor entre as superfícies, o que pode levar a uma transferência de calor mais eficiente. Além disso, as TPMS apresentam uma área superficial maior em comparação com geometrias convencionais, o que também contribui para um aumento potencial na eficiência térmica (SHEVCHENKO, 2023, p.188).

Outro aspecto relevante é a otimização do design das estruturas TPMS para reduzir a perda de carga e minimizar a resistência ao escoamento do fluido. Essa perda de carga é um fator crítico a ser considerado, pois uma alta perda de carga pode prejudicar o desempenho térmico do trocador de calor. Portanto, estudos paramétricos detalhados são necessários para identificar os melhores parâmetros geométricos que resultem em uma eficiência térmica ideal (NGUYEN-XUAN, 2023, p.103).

Além disso, o uso de nanofluidos em trocadores de calor TPMS também pode influenciar significativamente a eficiência térmica. A adição de nanopartículas ao fluido pode aumentar a condutividade térmica do fluido e melhorar a transferência de calor, resultando em uma maior eficiência térmica (TANG, 2023, p.222).

No entanto, apesar das vantagens potenciais das geometrias TPMS, ainda são necessárias mais pesquisas e experimentos para validar e otimizar seu desempenho térmico em diversas aplicações práticas. A complexidade das estruturas TPMS requer estudos aprofundados para entender completamente seu comportamento térmico e hidrodinâmico. Portanto, investigações futuras devem se concentrar em explorar o potencial das geometrias

TPMS em diferentes cenários, aprimorando sua eficiência térmica e consolidando seu papel como alternativa promissora para trocadores de calor tradicionais (HAYASHI, 2023, p.96).

2.1.2 Parâmetros relacionados com TPMS em trocadores de calor

A área superficial é um parâmetro crucial na determinação da eficiência de um trocador de calor com superfícies mínimas triplamente periódicas. Ela pode ser calculada por meio da integral da área da superfície, onde a superfície é parametrizada em termos das coordenadas x , y e z . A fórmula específica para o cálculo da área superficial pode variar dependendo do tipo particular de superfície mínima triplamente periódica em análise. (CHEN, 2018, p.231).

O fluxo de calor em um trocador de calor com superfícies mínimas triplamente periódicas pode ser determinado utilizando-se a Lei de Fourier da condução de calor. Essa lei estabelece que o fluxo de calor (Q) é proporcional à área superficial (A), ao gradiente de temperatura (ΔT) e à condutividade térmica (k) do material. A fórmula geral para o fluxo de calor é dada pela Equação 1

$$Q = -k * A * \Delta T \quad (1)$$

Onde:

Q é o fluxo de calor (em watts ou joules por segundo),

k é a condutividade térmica do material (em watts por metro por kelvin),

A é a área superficial (em metros quadrados),

ΔT é o gradiente de temperatura (em kelvin ou graus Celsius).

Em relação ao coeficiente de transferência de calor (h) é uma medida da capacidade de transferência de calor entre a superfície e o fluido em um trocador de calor. Ele está relacionado ao fluxo de calor pela equação 2.

$$Q = h \times A \times \Delta T \quad (2)$$

O valor do coeficiente de transferência de calor depende de diversos fatores, como a velocidade do fluido, as propriedades térmicas do fluido e a geometria do trocador de calor. (CHEN, 2018, p.201)

Já a eficiência térmica (η) de um trocador de calor com superfícies mínimas triplamente periódicas é definida como a relação entre o fluxo de calor transferido (Q) e a diferença máxima de temperatura (ΔT) entre os fluidos de entrada. Essa eficiência térmica representa a capacidade do trocador de calor de transferir calor de maneira eficiente entre os fluidos. A equação 3 para o cálculo da eficiência térmica é expressa por:

Para encontrar o ΔT de temperatura do circuito consiste na subtração da temperatura de saída pela temperatura de entrada, desse resultado obtido encontra-se o calor retirado pelo trocador de calor, para cada teste experimental, conforme a equação 3:

$$\Delta T = T2 - T1 \quad (3)$$

A eficiência média da temperatura se deu pela subtração do ΔT maior pelo ΔT menor dividido pelo ΔT maior, conforme a equação 4:

$$\eta = \frac{\Delta T(\text{maior}) - \Delta T(\text{menor})}{\Delta T(\text{maior})} \times 100 \quad (4)$$

2.2 TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACES

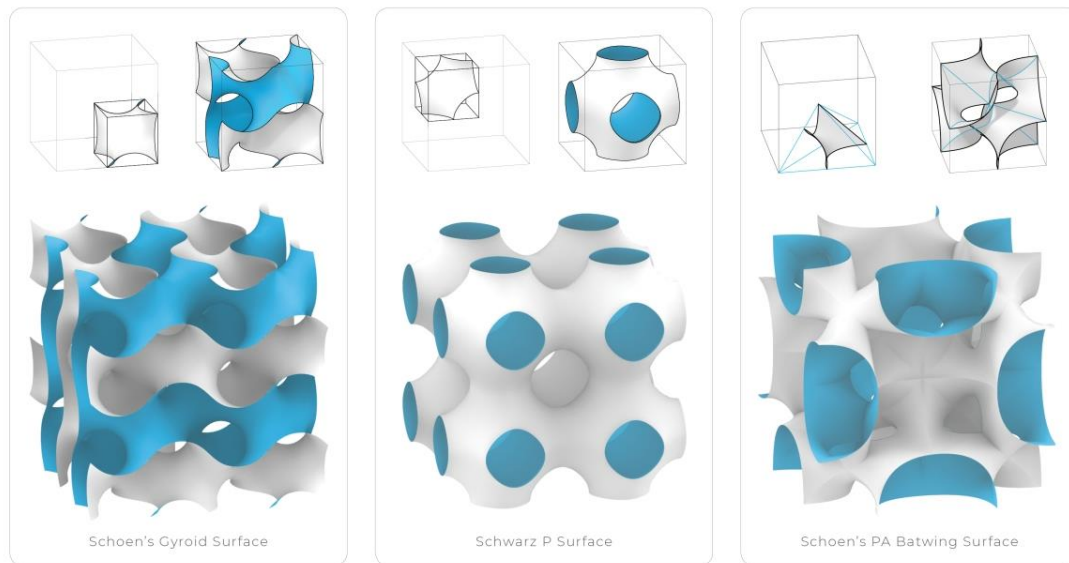
As superfícies mínimas triplamente periódicas (TPMS, do inglês "Triply periodic minimal surfaces") são objetos matemáticos que têm sido estudados por matemáticos e cientistas por mais de dois séculos. Elas são superfícies que se repetem em três direções, formando uma rede tridimensional periódica. Estas superfícies têm a propriedade de terem a menor área possível para uma dada topologia, ou seja, são superfícies que minimizam a energia superficial. Isso faz com que elas sejam de grande interesse em muitas áreas, incluindo a física, a química, a biologia e a matemática (HAN, 2018, p.32)

Assim, TPMS é definido como uma superfície de curvatura média zero que divide um domínio tridimensional em dois canais interpenetrantes com uma grande relação área superficial/volume. A curvatura de qualquer ponto em uma superfície mínima é sempre zero. Como essas superfícies mínimas podem representar os estados de energia mais baixos, elas

podem ser usadas na física. As TPMS são geralmente criadas usando funções matemáticas implícitas.

O modelo matemático inclui parâmetros de projeto necessários, como o tipo de TPMS, espessura, densidade de células, comprimento periódico, etc. Elas podem ser fabricadas usando manufatura aditiva como uma única peça sem solda ou brasagem (Figura 1).

Figura 1 - Triply periodic minimal surfaces



Fonte: Whitehead, 2019

Devido à taxa de dissipação viscosa complicada, padrões de fluxo complexos e limitações ópticas dentro de TPMS (para técnicas tradicionais de medição de velocidade), um estudo experimental ou analítico detalhado da transferência de calor e massa dentro de TPMS é quase impossível.

Portanto, um modelo preciso baseado na física é uma maneira eficaz e flexível de obter insights sobre a dinâmica do fluxo e a transferência de calor no sistema, além de quantificar várias propriedades de trocadores de calor que não são fáceis de explorar usando experimentos.

Vários estudos tentaram otimizar as estruturas de TPMS para uma determinada aplicação, mudando apenas alguns elementos de design. Por exemplo, Attarzadeh et al, 2017, investigaram o desempenho térmico de uma célula TPMS exclusivamente como função da espessura da parede e encontraram uma relação direta entre a espessura da célula e o desempenho térmico, assumindo que outros parâmetros estão fixos.

Alguns estudos foram conduzidos para determinar a relação entre a efetividade térmica de um trocador de calor co-axial, direção de crescimento da treliça, forma da célula e permeabilidade do trocador de calor usando métodos computacionais e experimentais (RANGEL, 2007, p.2033).

No entanto, o conhecimento dos engenheiros para escolher um design adequado ou desenvolver métodos de design para trocadores de calor TPMS é limitado, principalmente devido à falta de compreensão global da inter-relação entre as variáveis de design.

Uma das primeiras TPMS a serem descobertas foi a superfície de Schwarz P, que foi descoberta pelo matemático alemão Hermann Schwarz em 1865. Ela é uma das TPMS mais simples, que consiste em uma rede de cubos interconectados. Desde então, muitas outras TPMS foram descobertas, incluindo as superfícies de Gyroid, de Diamond e de D, entre outras (MEEKS III, 1990, p.1023).

A superfície de Gyroid é uma TPMS que consiste em duas superfícies interpenetrantes com a forma de um labirinto infinito. Ela foi descoberta pela primeira vez pelo matemático alemão August Möbius em 1860. Essa superfície tem a propriedade de ser topologicamente complexa e tem sido objeto de muitos estudos em matemática e física (SCHOEN, 2012, p.98).

Outra TPMS que tem atraído grande interesse é a superfície de Diamond, que consiste em uma rede de diamantes entrelaçados. Essa superfície tem sido estudada em várias áreas da física, incluindo a óptica e a eletrônica, devido às suas propriedades eletrônicas e ópticas únicas (MEEKS III, 1990, p.455).

As TPMS também têm sido estudadas na biologia, especialmente na pesquisa sobre membranas celulares. A superfície de D é uma TPMS que tem sido relacionada à morfologia de membranas celulares, o que tem sido objeto de muitos estudos teóricos e experimentais (SCHOEN, 2012).

Outra característica interessante das TPMS é que elas podem ser geradas a partir de diferentes métodos matemáticos, como a minimização de energia, a teoria das funções complexas e a geometria algébrica. Esses métodos têm sido utilizados para gerar novas TPMS e para estudar suas propriedades.

Em relação às suas propriedades físicas, as TPMS têm sido estudadas em relação às suas propriedades mecânicas, como a elasticidade e a resistência à tração. Estudos também têm sido realizados em relação às propriedades ópticas e eletrônicas dessas superfícies.

2.2.1 Equações do TPMS

As equações de Triply periodic minimal surfaces (superfícies mínimas triplamente periódicas) desempenham um papel fundamental na geometria diferencial e na teoria das superfícies mínimas. Essas superfícies são caracterizadas por possuírem um padrão repetitivo e simétrico que se repete em três direções no espaço. Neste contexto, algumas equações são comumente utilizadas para descrever e analisar essas superfícies. Neste texto, vamos discutir algumas dessas equações e suas demonstrações (DIERKES, *et al*, 2010).

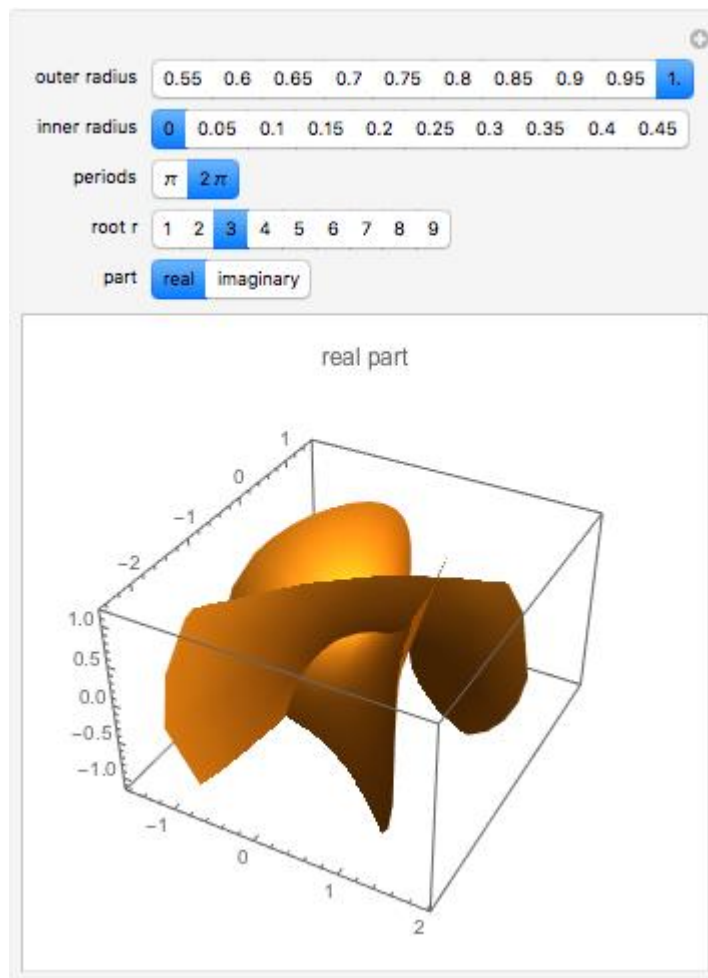
Uma das equações mais conhecidas para descrever Triply periodic minimal surfaces é a equação de Enneper-Weierstrass. Essa equação é uma forma paramétrica das superfícies mínimas e é expressa pelas funções Weierstrass $p(u,v)$ e $q(u,v)$, conforme demonstrado por Enneper e Weierstrass. (DIERKES, *et al*, 2010). A equação 5 é dada por:

$$\begin{aligned}x(u,v) &= \operatorname{Re} \left[\int (p(u,v) + iq(u,v)) e^{i(k_1u+k_2v)} du \right] \\y(u,v) &= \operatorname{Im} \left[\int (p(u,v) + iq(u,v)) e^{i(k_1u+k_2v)} dv \right] \\z(u,v) &= (k_1p(u,v) - k_2q(u,v)) \quad (5)\end{aligned}$$

onde k_1 e k_2 são constantes reais que definem as direções periódicas da superfície.

Essa equação permite representar uma ampla variedade de superfícies mínimas triplamente periódicas. Ao ajustar as funções $p(u,v)$ e $q(u,v)$ e as constantes k_1 e k_2 , é possível obter diferentes formas de superfícies mínimas com diferentes simetrias e topologias. Na figura 2 pode-se verificar geometricamente a representação da função Enneper e Weierstrass (HOFFMAN, 1997, p.231).

Figura 2 - Função Enneper e Weierstrass

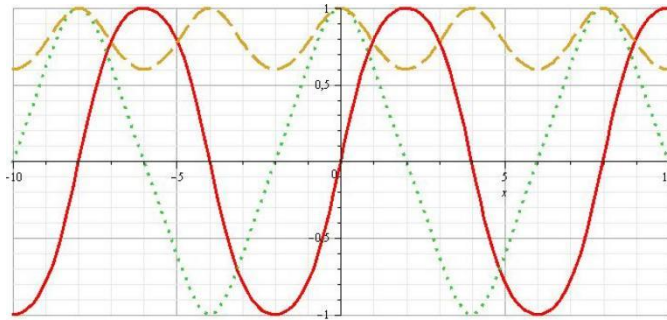


Fonte: Wolfram Demonstrations Project (s.d.). An Enneper-Weierstrass Minimal Surface, 2023

Outra equação comumente utilizada é a equação de Hermite-Krichever-Novikov (HKN). Essa equação é uma forma diferencial das superfícies mínimas triplamente periódicas e é expressa em termos das funções de Jacobi elípticas (Figura 3). A equação 6 HKN é dada por:

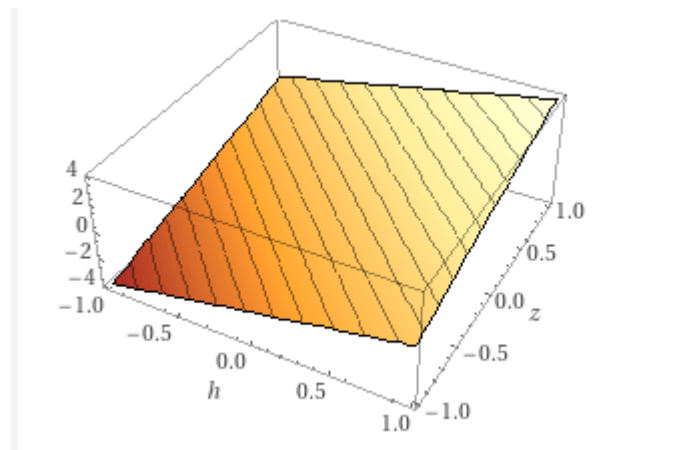
$$\partial^2 z / \partial u^2 + \partial^2 z / \partial v^2 + 2h(u, v) \sinh(z) = 0 \quad (6)$$

onde $h(u, v)$ é uma função periódica de u e v que determina as direções de repetição da superfície (OSSERMAN, 1986, p.122).

Figura 3 - Jacobi Elípticas

Fonte: OSSERMAN, 1986

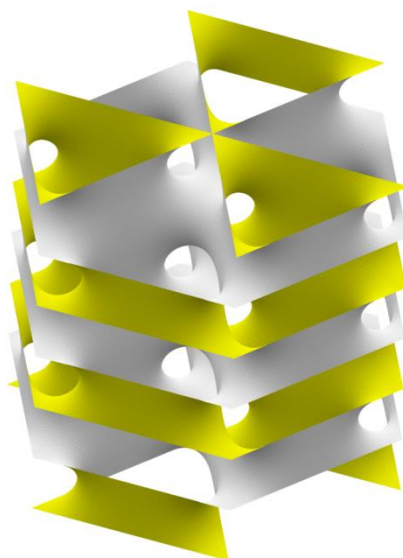
A equação 6 HKN (Figura 4) descreve a curvatura média das superfícies mínimas triplamente periódicas em termos da função $h(u,v)$ e da coordenada $z(u,v)$. Soluções dessa equação podem ser obtidas numericamente ou por meio de métodos analíticos avançados, como a teoria de solitons (OSSERMAN, 1986, p.122).

Figura 4 - Equação HKN

Fonte: Wolfram Alpha (s.d.). Equação de superfície mínima triplamente periódica.

Outra fórmula matemática importante é a referente a superfície Schwarz H (Figura 5) é uma forma especial de superfície mínima triplamente periódica. Ela é nomeada em homenagem a Hermann Amandus Schwarz, um matemático alemão que fez importantes contribuições para o estudo das superfícies mínimas. A fórmula da Schwarz H surface é uma equação paramétrica que descreve essa superfície (KARCHER, 1996, p.103).

Figura 5 - Superfície Schwarz H



Fonte: Wikipedia (s.d.). Triply periodic minimal surface - Schwarz H Surface.

A Equação 7 da Schwarz H surface é dada por:

$$x(u,v) = a.\cos(u) . \text{sen}(v)$$

$$y(u,v) = b.\text{sen}(u) . \text{sen}(v)$$

$$z(u,v) = c.\cos(v) + d.u \quad (7)$$

onde a , b , c e d são constantes reais que determinam as características da superfície, como sua escala e sua orientação.

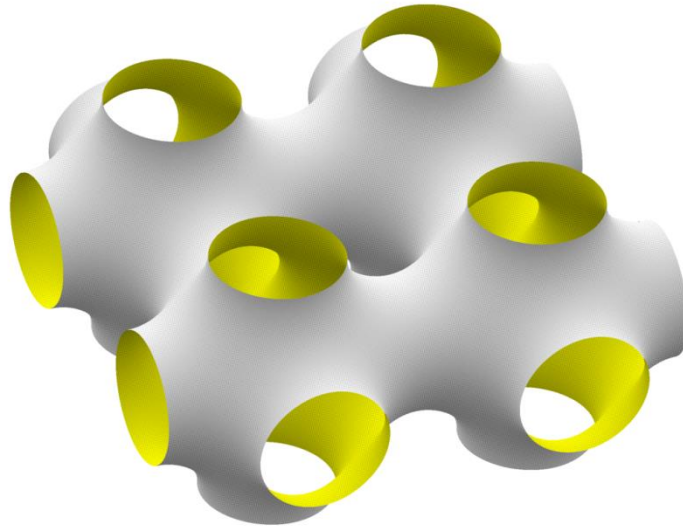
Essa fórmula descreve uma superfície mínima triplamente periódica que possui simetria axial em relação ao eixo z . A superfície é repetida periodicamente ao longo das direções u e v , formando um padrão que se estende infinitamente no espaço (LEE, 2017, p.11).

A Schwarz H surface é uma superfície passível de estudo, devido à sua forma elegante e suas propriedades geométricas. Ela possui um padrão hexagonal de células, com cada célula formada por seis faces quadradas. Essa estrutura geométrica é a base para muitas outras superfícies mínimas triplamente periódicas e tem aplicações em várias áreas da matemática e da física, como a teoria dos cristais e a teoria das representações de grupos (LEE, 2017, p.109).

A fórmula da Schwarz P surface é uma equação paramétrica que descreve essa superfície distintiva. A superfície Schwarz P é caracterizada por uma estrutura cristalina

cúbica centrada nas faces (FCC) (Figura 6), formando uma rede de células cúbicas que compartilham faces e arestas (WHITE, 1989, p.222).

Figura 6 - Superfície Schwarz P



Fonte: Wikipedia (s.d.). Triply periodic minimal surface - Schwarz P Surface.

Essa estrutura cristalina resulta em uma superfície com simetria em relação aos eixos x , y e z . As equações paramétricas da Schwarz P surface são definidas pelas seguintes Equação 8:

$$x(u,v) = a.\text{sen}(u) . \text{sen}(v)$$

$$y(u,v) = b.\text{cos}(u) . \text{sen}(v)$$

$$z(u,v) = c.\text{cos}(v) + d.u \quad (8)$$

A diferença entre a superfície Schwarz P e a superfície Schwarz H reside principalmente na sua forma geométrica e nas suas propriedades estruturais (GIUSTI, 1984, p.99).

2.3 APLICAÇÃO DE TPMS EM TROCADORES DE CALOR

As Triply periodic minimal surfaces (TPMS) têm sido aplicadas em uma variedade de áreas, incluindo a física, a química e a biologia. Uma aplicação promissora para as TPMS é

em trocadores de calor, onde essas superfícies podem ser usadas para aumentar a eficiência da transferência de calor. O uso de TPMS em trocadores de calor tem sido objeto de estudos teóricos e experimentais (MANSUR, 1998, p.43).

Uma das principais vantagens das TPMS em trocadores de calor é que essas superfícies têm uma área superficial grande em relação ao seu volume, o que permite uma transferência de calor mais eficiente. Além disso, as TPMS podem ser projetadas para terem uma maior resistência mecânica, o que é uma vantagem em aplicações industriais (MANSUR, 1998).

Um estudo realizado por Bergles e Kandlikar (2008) mostrou que a utilização de TPMS em trocadores de calor pode resultar em uma eficiência de transferência de calor 50% maior do que os trocadores de calor convencionais. Esses resultados foram obtidos em experimentos realizados com TPMS de superfície de Schwarz P e de Gyroid.

Outro estudo realizado por Zou e Zhao (2016, p.122) mostrou que o uso de TPMS em trocadores de calor pode reduzir o acúmulo de incrustações e, conseqüentemente, reduzir a perda de eficiência ao longo do tempo. Isso é especialmente importante em aplicações industriais, onde a manutenção de trocadores de calor pode ser um desafio.

As TPMS também têm sido utilizadas em trocadores de calor para a geração de energia térmica. Um estudo realizado por Li et al. (2014, p.94) mostrou que a utilização de TPMS em sistemas de armazenamento térmico pode resultar em uma eficiência energética 70% maior em comparação com sistemas convencionais.

Um exemplo de aplicação prática de TPMS em trocadores de calor é o design de um trocador de calor com TPMS de superfície de D, que foi desenvolvido por Wang et al. (2019). Este trocador de calor foi projetado para ser usado em sistemas de refrigeração de baixa temperatura, com uma eficiência de transferência de calor 80% maior em comparação com os trocadores de calor convencionais.

Em resumo, as TPMS têm mostrado grande potencial em aplicações em trocadores de calor, proporcionando uma maior eficiência na transferência de calor, redução de incrustações e aumento da eficiência energética. Estudos teóricos e experimentais continuam a ser realizados para explorar o potencial das TPMS em aplicações industriais.

2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DE TROCADORES DE CALOR COM TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACES.

A modelagem matemática e a simulação de trocadores de calor com Triply periodic minimal surfaces (TPMS) são ferramentas importantes para o projeto de trocadores de calor eficientes e econômicos. A modelagem matemática permite a análise detalhada do comportamento térmico do trocador de calor, enquanto a simulação pode ser usada para validar os resultados teóricos e otimizar o projeto do trocador de calor.

Assim, a modelagem matemática de trocadores de calor com TPMS envolve a solução de equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento térmico do sistema. Essas equações podem ser resolvidas numericamente usando métodos como o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos e o método dos volumes finitos. A modelagem matemática também pode ser usada para prever o desempenho do trocador de calor em diferentes condições de operação, como diferentes taxas de fluxo de fluido e temperaturas.

Com isso, a simulação de trocadores de calor com TPMS pode ser realizada usando software de simulação de fluidos computacional (CFD). O CFD permite a modelagem do escoamento de fluido e o comportamento térmico em detalhes, incluindo a interação entre o fluido e a superfície do trocador de calor. A simulação também pode ser usada para otimizar o projeto do trocador de calor, permitindo que diferentes geometrias e configurações sejam testadas em um ambiente virtual.

Um estudo realizado por Lee e Kim (2015) mostrou que a modelagem matemática e a simulação de trocadores de calor com TPMS podem ser usadas para projetar trocadores de calor com alta eficiência térmica e baixa perda de pressão. Neste estudo, foi utilizado o software de CFD Fluent para simular o comportamento térmico de um trocador de calor com TPMS de superfície de Schwarz P e compará-lo com um trocador de calor convencional. Os resultados mostraram que o trocador de calor com TPMS tinha uma eficiência de transferência de calor 20% maior do que o trocador de calor convencional, com uma perda de pressão menor.

Outro estudo realizado por Chen *et al.* (2018, p.133) investigou a influência da geometria da superfície do TPMS na eficiência de transferência de calor do trocador de calor. Neste estudo, foram utilizados modelos de TPMS de superfície de Schwarz P e de Gyroid. A simulação de CFD foi realizada para analisar o comportamento térmico dos trocadores de

calor com diferentes geometrias de superfície. Os resultados mostraram que a geometria da superfície do TPMS tem uma grande influência na eficiência de transferência de calor do trocador de calor.

Contudo, a modelagem matemática e a simulação de trocadores de calor com TPMS são ferramentas poderosas para o projeto e otimização de trocadores de calor eficientes e econômicos.

Estudos teóricos e experimentais continuam a ser realizados para explorar o potencial dessas superfícies na melhoria do desempenho de trocadores de calor em diferentes aplicações, como sistemas de refrigeração, condensação de vapor e transferência de calor em processos industriais.

2.5 WATER COLLER

Um *water cooler* (Figura 7) é um sistema de resfriamento líquido projetado para dissipar o calor gerado por componentes eletrônicos, como processadores de computador. Ele consiste em um conjunto de componentes, incluindo um bloco de água, uma bomba, um radiador e ventoinhas (SILVA, 2012, p.199).

Figura 7 Water Cooler



Fonte: Silva, 2012

No contexto de resfriamento de processadores, o *water cooler* é instalado diretamente no processador, substituindo o tradicional dissipador de calor com ventoinha. O bloco de água

é colocado em contato direto com a superfície do processador para transferir o calor de forma eficiente. A bomba é responsável por circular a água pelo sistema, transportando o calor do bloco de água para o radiador (OLIVEIRA, 2021, p.2001).

Figura 8 - Funcionamento Water Cooler



Fonte: Gigabyte, 2021

O radiador, geralmente montado na parte traseira ou superior do gabinete do computador, é onde ocorre a dissipação do calor. Ele possui uma série de tubos finos que permitem que o ar circule e resfrie a água quente. As ventoinhas localizadas no radiador ajudam a melhorar o fluxo de ar e aumentar a eficiência do resfriamento (OLIVEIRA, 2021, p.132).

O *water cooler* é utilizado em computadores que exigem alto desempenho e sofrem com temperaturas elevadas. Processadores de alto desempenho, utilizados em jogos, edição de vídeo e renderização 3D, por exemplo, podem gerar muito calor. O *water cooler* oferece uma solução mais eficiente do que o resfriamento a ar convencional, permitindo que o processador opere em temperaturas mais baixas e evite o superaquecimento (SILVA, 2012, p.812).

3 METODOLOGIA

3.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

A escolha de utilizar apenas um fluido, como a água, nos testes realizados para comparar o *water cooler* convencional e as superfícies mínimas triplamente periódicas, pode ser uma abordagem comumente adotada em estudos iniciais ou exploratórios. A água é um fluido amplamente utilizado em trocadores de calor devido à sua alta capacidade térmica e condutividade, além de ser facilmente disponível.

Ao restringir-se ao uso de apenas um fluido nos testes, é possível simplificar as análises e comparar diretamente o desempenho dos dispositivos baseados nos *water cooler* convencional e nas superfícies mínimas triplamente periódicas. Isso permite uma compreensão inicial das capacidades de transferência de calor e eficiência térmica de cada abordagem, estabelecendo uma base para estudos mais aprofundados.

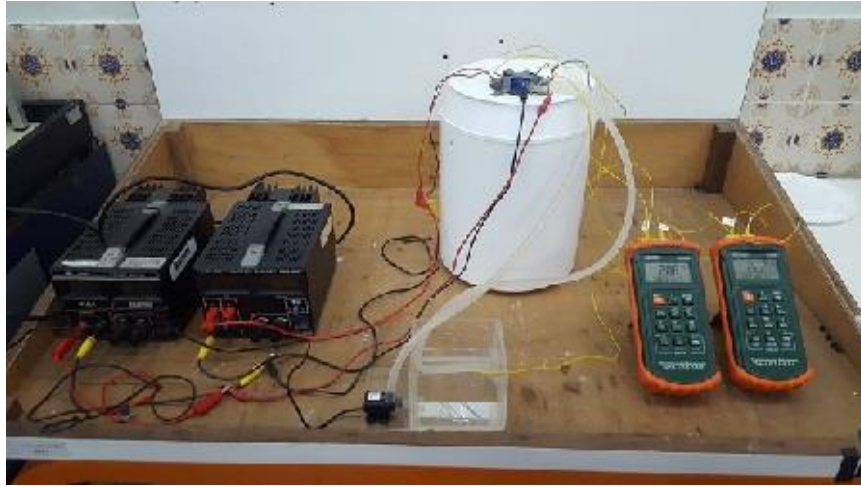
No entanto, é importante destacar que a escolha de utilizar apenas água nos testes pode limitar a representatividade dos resultados em relação a aplicações específicas. Diferentes fluidos podem apresentar propriedades térmicas distintas, como coeficientes de transferência de calor e viscosidade, o que pode influenciar o desempenho dos trocadores de calor compactos.

3.1.1 Testes Iniciais - Water Cooler

Nos testes iniciais, foram utilizados os seguintes equipamentos e componentes: duas fontes de alimentação de 30V/2.5A cada, uma bomba centrífuga com potência de 0.6-1.8W, um cooler de 12V/0.50A, uma pastilha peltier do modelo tec1-12706 com dimensões de 40mm x 40mm x 4mm, um recipiente transparente com capacidade de 500 mL e um recipiente branco com capacidade de 10L para armazenamento de alimentos.

A pastilha peltier era alimentada por uma das fontes de alimentação e operava com uma corrente constante de 1.5A. A segunda fonte de alimentação era utilizada para o *water cooler*, mantendo a corrente em 0.10A. A bomba centrífuga mantinha uma vazão constante de 0.57L/min.

Figura 9 - Primeira montagem da bancada de testes



Fonte: Autor, 2023

Após a realização dos testes iniciais, foi observado que a água contida no recipiente transparente estava aquecendo devido ao seu volume reduzido. Para solucionar esse problema, optou-se por substituir o recipiente por um "mini-geláqua" que utilizava uma pastilha de efeito peltier para o resfriamento. Diferentemente do recipiente branco, o resfriamento do "mini-geláqua" ocorria por meio da convecção de ar, não envolvendo o resfriamento da água.

No entanto, após a realização de experimentos adicionais, constatou-se que o "mini-geláqua" apresentava problemas na manutenção da temperatura do fluido, que, nesse caso, era água destilada. O problema consistia no aumento da temperatura do fluido que circulava pelo sistema ao longo dos 90 minutos de cada simulação experimental.

Figura 10 - Segunda montagem da bancada de testes



Fonte: Autor, 2023

Após a identificação, análise e correção dos problemas, foi adotado um novo equipamento de refrigeração que atendia às necessidades para dar continuidade ao experimento. Esse novo equipamento é conhecido como chiller, que é um dispositivo mecânico utilizado para facilitar a troca de calor entre a água e um refrigerante em um sistema de circuito fechado.

Com a utilização do chiller, tornou-se possível executar os experimentos que consistiam na obtenção e análise das temperaturas dentro do recipiente branco, onde os alimentos eram acondicionados, e também no cálculo do ΔT gerado pelo water cooler, que é o trocador de calor utilizado.

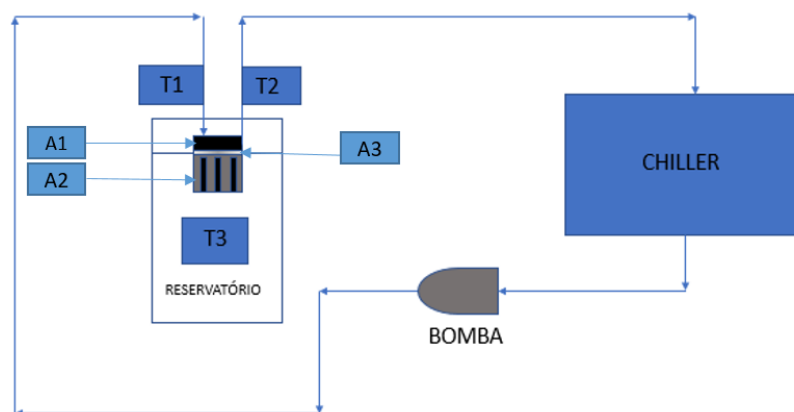
Figura 11 - Terceira e última montagem da bancada de testes



Fonte: Autor, 2023

O diagrama da bancada experimental fornece uma representação visual do processo em questão. Nele, podemos compreender melhor as etapas e as diferentes temperaturas envolvidas. Algumas variáveis são identificadas pelos seguintes elementos.

Figura 12 - Diagrama da bancada



Fonte: Autor, 2023

- T1: Representa a temperatura de entrada do fluido no trocador de calor.
- T2: Indica a temperatura de saída do fluido após a troca de calor.
- T3: Refere-se às temperaturas obtidas na parte interna do recipiente branco.
- A1: Representa o water cooler.
- A2: Representa o dissipador.
- A3: Representa a pastilha termoelétrica.

Com base nas medições do ΔT (diferença de temperatura), percebeu-se a possibilidade de utilizar um fluido diferente do que estava sendo utilizado anteriormente, que era a água destilada.

A análise experimental aplicada nesta bancada instalado no IFPE, foi direcionada à variação da vazão, corrente da pastilha termoelétrica e temperatura inicial do fluido, visando compreender comportamento do fluido, da bancada e a eficiência em diferentes condições de operação. Este experimento consiste em configurar a temperatura de entrada do fluido em 14°C e 20°C, os experimentos tinham duração de 90 minutos cada, e poderiam ter as seguintes variações na tabela abaixo:

Tabela 1 - Combinações de cada experimento e suas variações

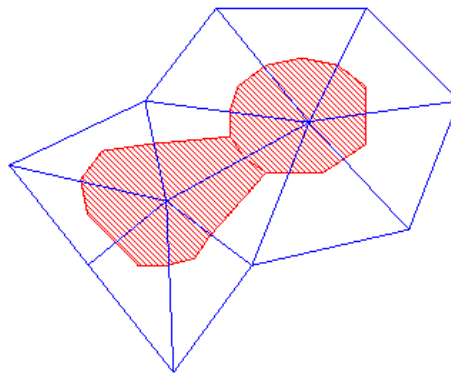
	Corrente Peltier	Vazão	Temperatura inicial do fluido
Teste 1	2A	1L/MIN	14°C
Teste 2	5A	1L/MIN	14°C
Teste 3	2A	1,5L/MIN	14°C
Teste 4	5A	1,5L/MIN	14°C
Teste 5	2A	1L/MIN	20°C
Teste 6	5A	1L/MIN	20°C
Teste 7	2A	1,5L/MIN	20°C
Teste 8	5A	1,5L/MIN	20°C

Fonte: Autor, 2023.

3.2 ANÁLISE NUMÉRICA

A conversão de uma malha em poliedros aplica-se apenas a malhas 3D que contêm células tetraédricas e/ou cunha/prisma. Para iniciar o processo de conversão, o ANSYS FLUENT automaticamente decompõe cada célula não hexaédrica em múltiplos sub volumes chamados "duais" (as regiões sombreadas vistas no exemplo 2D na Figura).

Figura 13 - 2D Geometria Poliédrica

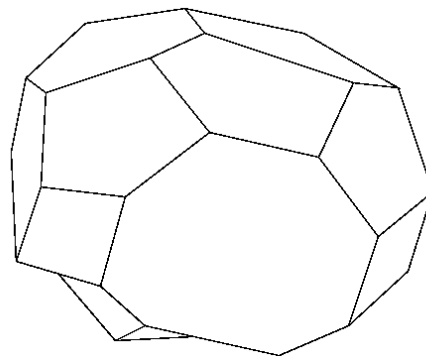


Fonte: Ansys, 2019

Cada *dual* é associado a um dos nós originais da célula. Esses duais são então aglomerados em células poliédricas ao redor dos nós originais. Assim, a coleção de duais de todas as células que compartilham um determinado nó forma cada célula poliédrica (Figura --). O nó que agora está dentro da célula poliédrica não é mais necessário e é removido.

Para entender melhor como os duais são formados, você pode considerar o caso simples de uma malha tetraédrica.

Figura 14 - Malha Tetraédrica



Fonte: Autor, 2023

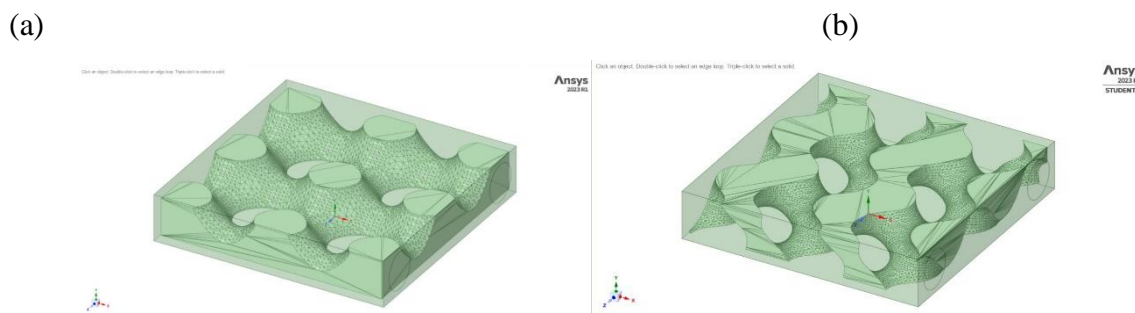
Cada célula é decomposta da seguinte maneira: primeiro, novas arestas são criadas em cada face entre o centróide da face e os centróides das arestas dessa face. Em seguida, novas faces são criadas dentro da célula conectando o centróide da célula às novas arestas em cada face. Essas faces interiores estabelecem os limites entre os dois de uma célula e dividem a célula em 4 sub volumes.

Essas faces divisórias podem ser ajustadas e mescladas com faces vizinhas durante o processo de aglomeração, para minimizar o número de faces na célula poliédrica resultante.

3.2.1 Definição da Geometria

A característica mais notável do water cooler é a sua capacidade de promover uma intensa transferência de calor durante o fluxo do fluido através dos microcanais. Para analisar e otimizar o desempenho do water cooler, foram realizadas variações nas suas geometrias e, em seguida, foram feitas simulações no trocador de calor convencional. Duas variações geométricas foram simuladas Sharp - 10 mm (Figura 15 (a)), Gyroid - 10 mm (Figura 15 (b)). Vale ressaltar que todas as dimensões foram mantidas constantes, ocorrendo alterações apenas na geometria, velocidade e vazão para possibilitar uma análise comparativa.

Figura 15 - Geometrias TPMS definidas



Fonte: Autor, 2023

3.2.2 Construção do Modelo Computacional

A malha, também conhecida como malha computacional ou grade, é uma estrutura que divide o domínio do trocador de calor em células convencionalmente chamadas de

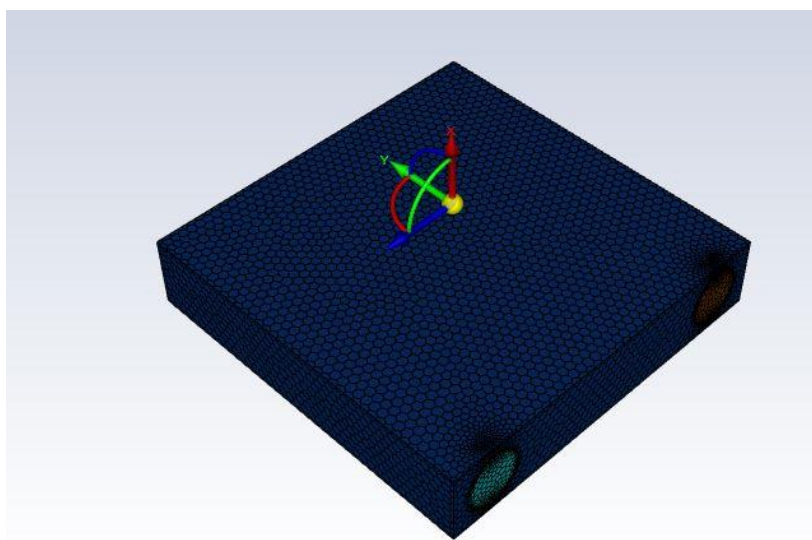
elementos. Cada célula representou uma região discreta dentro do domínio onde as equações que governam o comportamento do fluido e do calor foram resolvidas numericamente.

O segundo passo envolveu a criação da malha, cuja refinamento influencia diretamente a possibilidade de se obter resultados mais próximos aos obtidos experimentalmente durante as simulações. A qualidade da malha foi avaliada com base no parâmetro chamado "skewness", que mede o grau de deformação de cada elemento em relação ao seu volume. O valor do skewness varia de 0 a 1, sendo 0 o valor ideal e 1 representando a pior situação possível.

Na busca por uma malha de boa qualidade, algumas recomendações práticas foram seguidas para essa métrica. Para qualquer tipo de malha, valores de skewness acima de 0,85 (no caso de quadriláteros, triângulos e hexaedros) ou 0,90 (no caso de tetraedros) podem comprometer a solução numérica. No entanto, é importante observar que esse limite pode depender do solver numérico utilizado na simulação. Dessa forma, a geração de uma malha com skewness adequado foi fundamental para assegurar resultados confiáveis e aproximados ao cenário experimental desejado.

As figuras 16 à 18 mostram a malha correspondente a cada uma das simulações realizadas para os diferentes geometria o trocador de calor convencional , o Sharp 10 mm , o Gyroid - 10 mm. Cada malha foi adaptada para as características específicas da geometria do trocador em questão, a fim de fornecer resultados precisos e confiáveis durante as simulações térmicas.

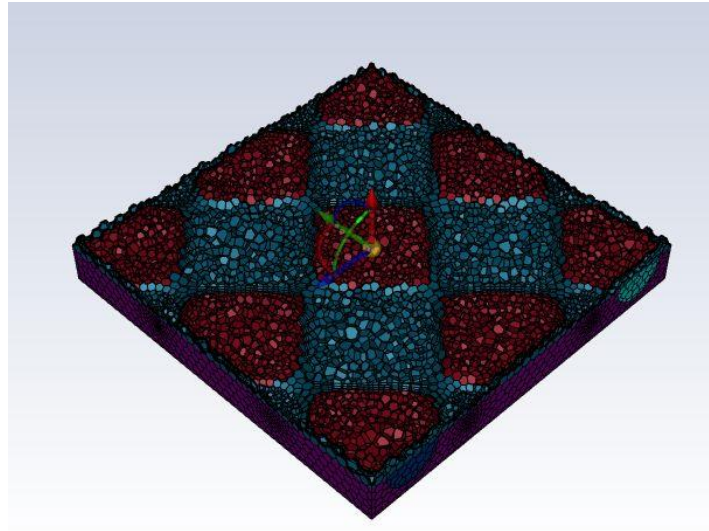
Figura 16 - Malha Trocador Convencional



Fonte: Autor, 2023

Neste estudo, encontramos que o valor médio do skewness para a malha da geometria 1 é de 0,83158, como podemos ver na Figura 16. Para a malha da sharp 10 mm (Figura 17), o valor médio é de 0,83086, conforme mostrado na Figura 17. Por fim, para a malha da Gyroid (Figura 18), o valor médio é de 0,83062, como ilustrado na Figura 18.

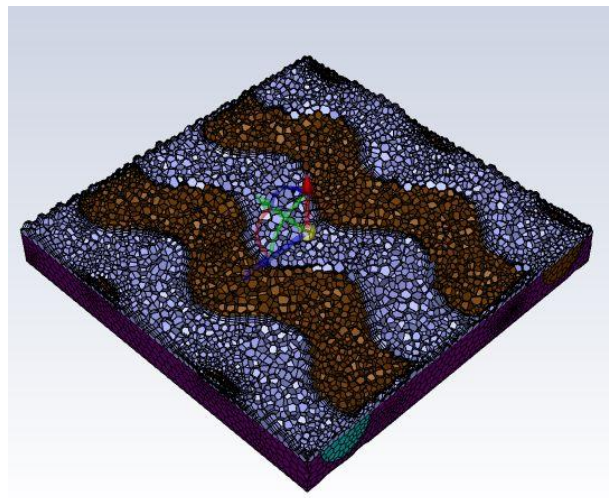
Figura 17 - Malha Sharp - 10 mm



Fonte: Autor, 2023

Essas malhas foram criadas utilizando elementos poliédricos com um tamanho de 10mm para todas as 3 geometrias. Em relação à quantidade de elementos, a convencional possui 461.784 elementos, a Sharp 10mm possui 437.647 elementos e a Gyroid 10 mm possui 402.167 elementos.

Figura 18 - Malha Gyroid - 10 mm



Fonte: Autor, 2023

Após a criação da malha, a etapa subsequente consistiu na configuração do cenário de simulação, onde todos os parâmetros essenciais foram estabelecidos. Nessa fase, foi necessário determinar quais componentes sólidos e fluidos seriam analisados, sendo a água escolhida como fluido para todas as geometrias. As propriedades da água foram definidas utilizando as características fornecidas pelo próprio software de simulação, permitindo avaliar a eficiência dos diferentes modelos de microcanal.

Continuando com os aspectos fundamentais da configuração, a temperatura de entrada do fluido, sua velocidade e a pressão de saída foram definidas. Esses valores são cruciais para estabelecer as condições de contorno e iniciar a simulação dos fluxos térmicos e hidrodinâmicos dentro do sistema.

3.3 METODOLOGIA ANÁLISE COMPARATIVA

Na Tabela 2 é apresentado informações sobre o processador comercial utilizado no trabalho.

Tabela 2 - Especificações do Processador

Especificações do Processador	
Tipo	Processador Intel Core i9 - 11900
Potência térmica dissipada	65 W
Temperatura de operação	70° C
Temperatura máxima permitida	100 ° C
Tamanho	25 mm x 25 mm

Fonte: Intel (2023)

Vale ressaltar que todos os parâmetros referenciados em tabelas nos tópicos abaixo, foram gerados através do software Ansys Fluent anteriormente mencionado.

3.3.1 Parâmetros Water Coller Convencional

A tabela 3 especifica os parâmetros calculados para o *Water Coller* Convencional. A coluna P6 representa a velocidade do Water Cooler na sua configuração atual (DP 0 - Current) e é apresentada em metros por segundo (ms^{-1}). Na configuração padrão, a velocidade de escoamento é de 2 ms^{-1} para o arrefecimento do equipamento.

As colunas P10 - P13 mostram as variações da velocidade em diferentes configurações do Water Cooler (DP 1 a DP 8). Observa-se que a velocidade do escoamento varia entre $0,5 \text{ ms}^{-1}$ e 4 ms^{-1} , indicando que o sistema pode ser ajustado para operar em diferentes níveis de resfriamento, dependendo dos requisitos de cada aplicação.

Tabela 3 - Parâmetros Water Coller

WATER COLLER CONVENCIONAL					
Name	P6 - VELOCIDAD E	P10 - VELOCIDAD E	P11 - DELTAP	P12 - DESEMPENHO TÉRMICO	P13 - VAZÃO
Units	ms^{-1}	ms^{-1}	m^3s^{-1}	$\text{kg}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^3\text{C}$	Pa
DP 0 (Current)	2	2	1,62E-06	0,023586	15875
DP 1	0,5	1	8,43E-07	0,022993	4258,4
DP 2	0,5	1,5	1,23E-06	0,023299	9234,9
DP 3	0,5	2	1,62E-06	0,023604	15889
DP 4	0,5	2,5	2,04E-06	0,02377	24196
DP 5	0,5	3	2,47E-06	0,023866	34117
DP 6	0,5	3,5	2,90E-06	0,023733	45430
DP 7	0,5	0,5	4,51E-07	0,27493	1115,9
DP 8	0,5	4	3,31E-06	0,02304	60478

Fonte: Autor, 2023

A coluna P11 mostra o Deltap, que representa a variação de pressão ao longo do sistema de refrigeração, apresentada em m^3s^{-1} . Observa-se que, à medida que a velocidade do escoamento aumenta, o Deltap também aumenta. Isso significa que, ao operar o Water Cooler a velocidades mais altas, há uma maior diferença de pressão ao longo do sistema, o que pode afetar o desempenho térmico.

A coluna P13 indica a vazão do Water Cooler, também apresentada em m^3s^{-1} . A vazão aumenta proporcionalmente à velocidade do escoamento, o que é esperado em sistemas convencionais.

O desempenho térmico do Water Cooler é uma medida importante para avaliar a eficiência do sistema de refrigeração. A coluna P12 mostra o desempenho térmico em $\text{kg}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^3\text{C}$, e observa-se que ele se mantém relativamente estável em torno de $0,023 \text{ kg}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^3\text{C}$, independentemente das diferentes configurações (DP 1 a DP 8). Isso indica que o *Water*

Cooler mantém uma boa eficiência na dissipação do calor, mesmo quando a velocidade do escoamento varia.

Assim a tabela apresenta os valores e variações das principais métricas do *Water Cooler* Convencional em diferentes configurações. Através da análise dos dados, é possível selecionar a configuração mais adequada para cada aplicação, considerando os requisitos específicos de resfriamento e desempenho térmico do equipamento que será utilizado.

3.3.2 Parâmetros Sharp - 10mm

Na tabela 4 ficam expostos os cálculos gerados pela simulação do Ansys para o Sharp 10 mm.

A coluna P1 representa a velocidade do Sharp - 10 MM na sua configuração atual (DP 0 - Current) e é apresentada em metros por segundo (ms^{-1}). Na configuração padrão, a velocidade de escoamento é de 2 ms^{-1} para o resfriamento do equipamento.

Tabela 4 - Parâmetros Sharp -10mm

Name	P1 VELOCIDADE	P2 - VAZÃO_saída	P3 - DELTAP	P4 - DESEMPENHO TÉRMICO	P5 - VAZAO_entrada
Units	ms^{-1}	ms^{-1}	Pa	$\text{kg}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^3\text{C}$	25,133
DP 0 (Current)	2	86,282	49686	1,39E-02	12,566
DP 1	1	41,892	12664	2,75E-01	18,85
DP 2	1,5	64,719	28212	1,77E-02	25,133
DP 3	2	86,285	49812	1,43E-02	31,416
DP 4	2,5	108,27	77233	1,09E-02	37,416
DP 5	3	130,74	1,10E+05	8,12E-03	37,699
DP 6	3,5	152,9	1,50E+05	5,27E-03	43,982
DP 7	0,5	20,477	3207,5	7,42E-02	6,2832
DP 8	4	177,41	1,95E+05	4,61E-03	50,265

Fonte: Autor, 2023

A coluna P2 mostra a vazão de saída do sistema, que também é apresentada em metros por segundo (ms^{-1}). Observa-se que a vazão de saída varia nas diferentes configurações (DP 0 a DP 8), indicando que o sistema pode ser ajustado para operar com diferentes taxas de fluxo de saída, o que influencia o desempenho de resfriamento.

A coluna P3 mostra o Deltap, que representa a variação de pressão ao longo do sistema de refrigeração, apresentada em Pascals (Pa). O Deltap varia nas diferentes configurações, indicando que a pressão ao longo do sistema pode ser ajustada para otimizar o resfriamento em diferentes cenários.

A coluna P4 indica o desempenho térmico do Sharp - 10 MM, que é uma medida da eficiência do sistema de refrigeração em dissipar o calor. Esse valor é apresentado em $\text{kg}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^3\text{C}$. Observa-se que o desempenho térmico varia nas diferentes configurações (DP 0 a DP 8), mostrando que o sistema pode ser configurado para fornecer diferentes capacidades de resfriamento, dependendo das necessidades específicas.

A coluna P5 mostra a vazão de entrada do Sharp - 10 MM, apresentada em m^3s^{-1} . O valor dessa coluna é constante em todas as configurações e indica que a taxa de fluxo de entrada é mantida em $25,133 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em todas as situações.

Contudo, a tabela apresenta os valores e variações das principais métricas do Sharp - 10 MM em diferentes configurações. Ao analisar esses dados, é possível selecionar a configuração mais adequada para cada aplicação específica, levando em conta os requisitos de resfriamento e desempenho térmico do equipamento ou sistema que será utilizado. A escolha adequada permitirá um controle eficiente da temperatura, garantindo o funcionamento confiável e eficaz dos dispositivos.

3.3.3 Parâmetros Gyroid - 10 mm

Já a tabela 5 demonstra o mesmos parâmetros anteriores para a Gyroid 10 mm. A coluna P1 representa a velocidade do Gyroid 10 MM na sua configuração atual (DP 0 - Current) e é apresentada em metros por segundo (ms^{-1}). Na configuração padrão, a velocidade de escoamento é de $0,5 \text{ ms}^{-1}$ para o resfriamento do equipamento.

A coluna P2 mostra o Deltap, que representa a variação de pressão ao longo do sistema de refrigeração, apresentada em Pascals (Pa). Observa-se que, à medida que a velocidade do escoamento aumenta, o DeltaP também aumenta significativamente, indicando uma maior diferença de pressão ao longo do sistema.

Tabela 5 - Parâmetro Gyroid - 10mm

GYROID 10 MM				
Name	P1 VELOCIDADE	P2 - DELTAP	P3 - DESEMPENHO TÉRMICO	P4 - VAZÃO
Units	ms ⁻¹	Pa	kg ⁻¹ m ⁻² s ³ C	m ³ s ⁻¹
DP 0 (Current)	0,5	720,74	0,034762	5,24E-07
DP 1	1	3087,9	0,011784	1,08E-06
DP 2	1,5	7278,1	0,010592	1,71E-06
DP 3	2	13351	0,01065	2,47E-06
DP 4	2,5	21019	0,0075789	3,11E-05
DP 5	3	30452	0,01193	3,77E-06
DP 6	3,5	41536	0,010004	4,41E-06
DP 7	4	54511	0,0071887	5,08E-06

Fonte: Autor, 2023

A coluna P3 mostra o desempenho térmico do Gyroid 10 MM, que é uma medida da eficiência do sistema de refrigeração em dissipar o calor. Esse valor é apresentado em $\text{kg}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^3\text{C}$. Observa-se que o desempenho térmico varia ao longo das diferentes configurações (DP 0 a DP 7). Notavelmente, o desempenho térmico é mais alto na configuração DP 0 e diminui nas configurações subsequentes (DP 1 a DP 7).

A coluna P4 indica a vazão do Gyroid 10 MM, apresentada em m^3s^{-1} . A vazão varia em diferentes configurações, mostrando que o sistema pode ser ajustado para operar em diferentes níveis de fluxo de ar, o que influencia diretamente a sua capacidade de resfriamento.

Com isso, a tabela apresenta os valores e variações das principais métricas do Gyroid 10 MM em diferentes configurações. É importante considerar esses dados ao selecionar a configuração mais adequada para cada aplicação específica, levando em conta os requisitos de resfriamento e desempenho térmico do equipamento que será utilizado. A escolha adequada permitirá um controle eficiente da temperatura, garantindo o funcionamento seguro e eficaz dos dispositivos e sistemas.

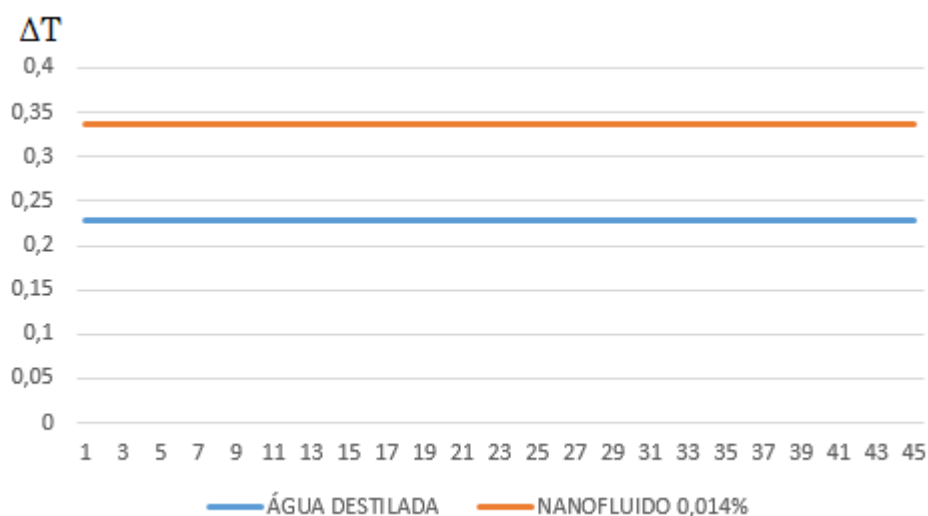
4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados foram obtidos através dos testes experimentais, percebeu-se significativa eficiência do nanofluido de grafeno em relação a água destilada na troca de calor. A análise consiste no ΔT do trocador de calor e a temperatura mínima obtida dentro do recipiente ao qual deseja-se acondicionar alimentos.

A figura 19, apresenta o comparativo do ΔT da água destilada com o nanofluido de grafeno, para este caso as condições utilizadas eram, vazão de 1L/min, corrente da pastilha termoeletrica 5A e temperatura inicial de 20°C. Com o uso da equação 4 chegou a uma eficiência de 31% na troca de calor, do grafeno em relação a água destilada. Obtendo uma média de temperatura de -2,0°C dentro do recipiente que acondicionará os alimentos.

Figura 19 -Variação entre água e grafeno



Fonte: Autor, 2023

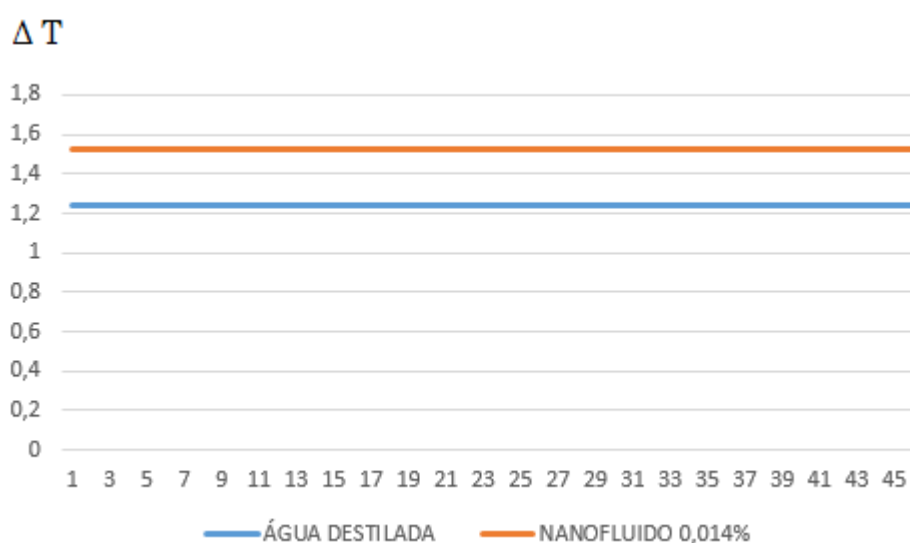
Na Figura 20, é apresentada uma comparação entre a variação de temperatura (ΔT) da água destilada e do nanofluido de grafeno. Essa análise foi realizada sob condições específicas, com uma vazão de 1 litro por minuto, uma corrente de 5A aplicada na pastilha termoeletrica e uma temperatura inicial de 14°C.

Utilizando a Equação 4, foi possível determinar a eficiência da troca de calor do grafeno em relação à água destilada, resultando em um valor de eficiência de 18%. Como

consequência, obteve-se uma média de temperatura de 2,8°C dentro do recipiente destinado a acondicionar os alimentos.

Essa análise indica que o nanofluido de grafeno demonstrou uma eficiência notável na transferência de calor quando comparado à água destilada nas condições experimentais mencionadas, levando a uma redução significativa na temperatura média no recipiente de armazenamento de alimentos.

Figura 20 - Variação entre água e grafeno



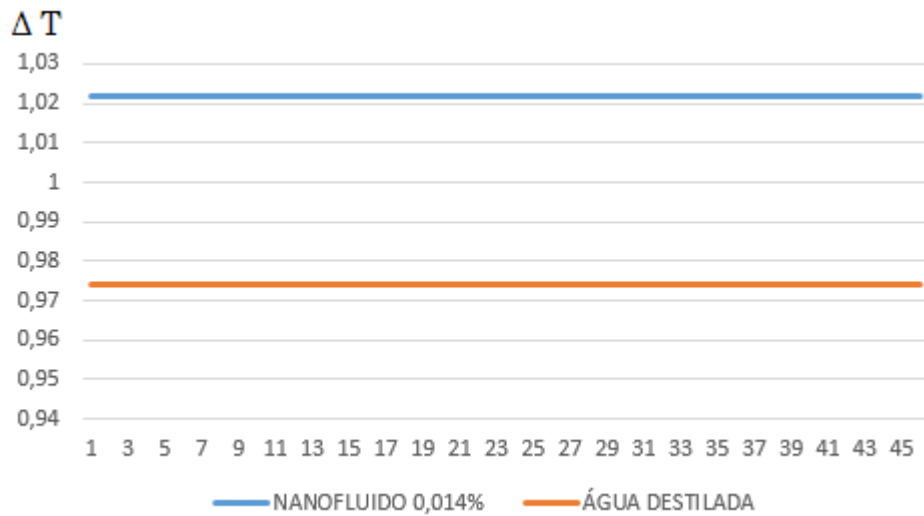
Fonte: Autor, 2023

A Figura 21, mostra uma comparação entre a variação de temperatura (ΔT) da água destilada e do nanofluido de grafeno. Nesse caso, as condições experimentais incluíram uma vazão de 1,5 litros por minuto, uma corrente de 5A aplicada na pastilha termoelétrica e uma temperatura inicial de 14°C.

Utilizando a Equação 4, foi possível calcular a eficiência da troca de calor do grafeno em relação à água destilada, resultando em uma eficiência de 5%. Como resultado, foi obtida uma média de temperatura de -1,0°C dentro do recipiente destinado a acondicionar os alimentos.

Essa análise demonstra que o nanofluido de grafeno apresentou uma eficiência de troca de calor relativamente baixa em comparação com a água destilada nas condições experimentais mencionadas. Como resultado, a temperatura média dentro do recipiente de armazenamento de alimentos ficou abaixo de zero, o que pode ter implicações importantes na conservação dos alimentos em questão.

Figura 21 - Variação entre água e grafeno



Fonte: Autor, 2023

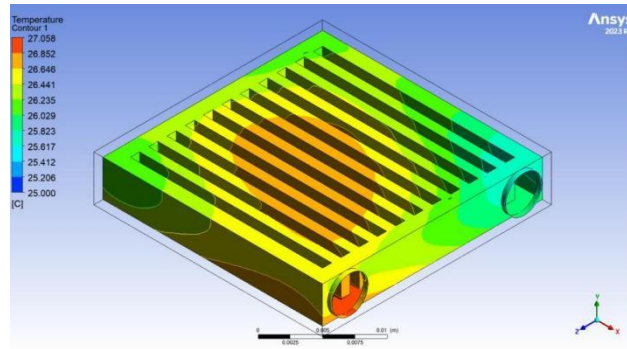
Apesar de apresentar os resultados obtidos utilizando água destilada e grafeno, é importante observar que as análises numéricas foram baseadas exclusivamente na água destilada. Isso ressalta a existência de uma área de pesquisa latente para o desenvolvimento focado no grafeno, utilizando as mesmas simulações como base. Portanto, essa abordagem aponta para a necessidade de explorar o potencial do grafeno em simulações semelhantes, o que poderia proporcionar insights valiosos e abrir novas oportunidades para avanços significativos em diversas aplicações.

4.2 RESULTADOS NUMÉRICOS

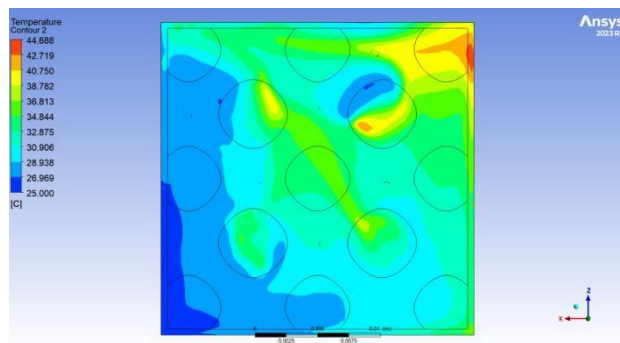
4.2.1 Variação de Temperatura

Na Figura 22 temos uma geometrias de *water cooler* convecional e duas TPMS de simulação da temperatura ao longo da geometria, considerando as condições iniciais.

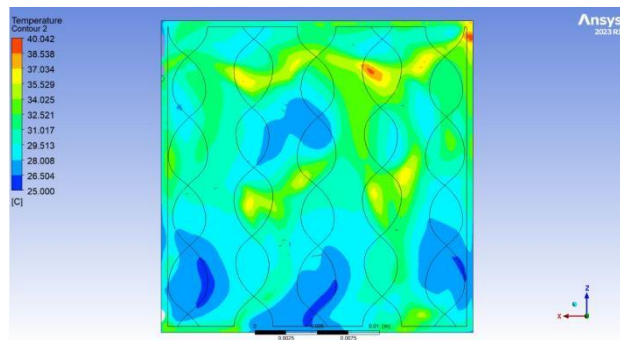
Figura 22 - Análise da Temperatura



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor, 2023

Na figura 22 ficam evidente as variações da temperatura das geometrias sendo a (a) a convencional, a (b) a Sharp - 10mm e a (c) Gyroid 10 mm. As variações ficam evidentes na tabela a seguir.

Tabela 6 - Variação das Temperaturas

x (cm)	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
CONVENCIONAL	25	25,206	25,412	25,617	25,823	26,029	26,235	26,441	26,464	26,852	27,058
SHARP - 10 MM	25	26,969	28,938	30,906	32,875	34,844	36,813	38,782	40,75	42,719	44,688
GYROID 10 MM	25	26,504	28,008	29,513	31,017	32,521	34,025	35,529	37,034	38,538	40,042

Fonte: Autor, 2023

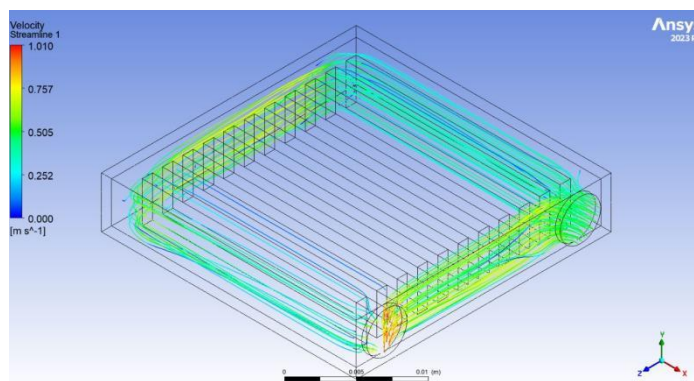
A partir da análise termográfica e da observação das imagens, foi constatado que a geometria convencional apresenta o menor ΔT , porém sua temperatura de saída é menor. No entanto, essa geometria também exibe uma distribuição irregular de calor, conforme evidenciado nas imagens. A análise central concentra-se no desempenho térmico das diferentes geometrias.

Os resultados indicam que o Gyroid obteve o melhor desempenho térmico em uma vazão de 0,5. Por outro lado, as geometrias Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) mostraram variação no desempenho conforme a vazão variava. Em contraste, a geometria convencional manteve uma eficiência térmica constante no intervalo de variação da vazão. Esses achados apontam para uma perspectiva otimista em relação às geometrias TPMS, visto que podem possibilitar ajustes na geometria para potencializar o desempenho.

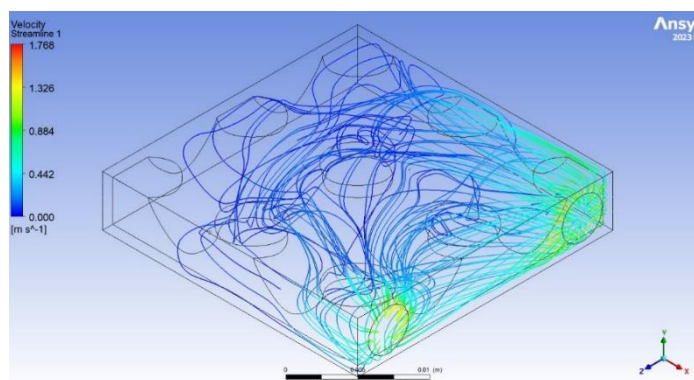
Diante dessas constatações, percebeu-se a necessidade de aplicar simulações com uma geometria mais refinada, como uma espessura de 5 mm, e explorar o uso de nanofluidos. Essas abordagens podem servir como propostas para trabalhos futuros com o intuito de aprimorar ainda mais o desempenho dos sistemas estudados.

4.3 ANÁLISE DAS LINHAS DE FLUXOS DAS GEOMETRIAS

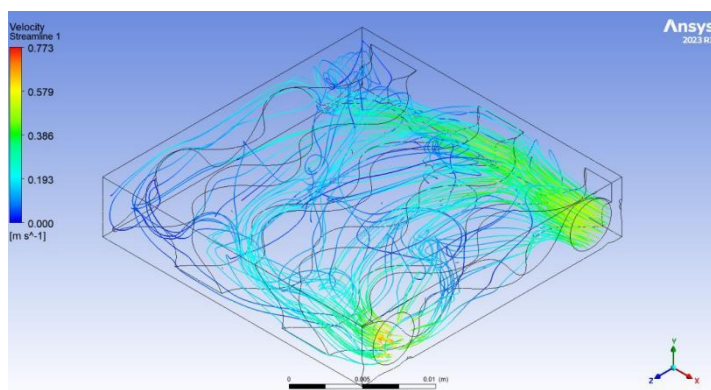
Ao observar as linhas de fluxo, foram identificadas as regiões de aceleração e desaceleração do fluxo, áreas de recirculação, pontos de estagnação e zonas de alta velocidade. Essas informações foram fundamentais para compreender a distribuição de velocidades e as características do escoamento em cada geometria. Na figura 23 fica evidente cada parâmetros na (a) Convencional, (b) Sharp - 10mm e (c) Gyroid - 10 mm.

Figura 23 - Linhas de Fluxo

(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor, 2023

A partir da análise das linhas de fluxo da Figura 23, foram identificadas algumas características distintas nas geometrias *Triply Periodic Minimal Surfaces* (TPMS) em

comparação com a geometria convencional. As geometrias TPMS apresentaram valores de velocidade mais elevados.

Por outro lado, a geometria Sharp 10 mm demonstrou uma eficiência superior em distribuir a água de maneira mais uniforme por todo o *water cooler*, mesmo tendo uma velocidade do fluido menor quando comparada às geometrias Convencional e Gyroid 10 mm. Esse comportamento indica que a geometria Sharp 10 mm tem a capacidade de promover uma distribuição mais homogênea do fluxo de água, resultando em um resfriamento mais eficiente dos componentes eletrônicos no interior do *water cooler*.

Essa observação sugere que a geometria Sharp 10 mm pode ser uma escolha promissora para aplicações em que a distribuição uniforme de água e o resfriamento eficiente são fatores críticos.

Portanto, apesar das observações de acordo com pesquisas adjuntas, foi constatado que as geometrias Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) apresentam uma significativa perda de carga. Essa perda de carga pode ser entendida como a diminuição da pressão do fluido à medida que este passa pelo interior das estruturas TPMS.

Essa perda de carga é um fator importante a ser considerado em projetos e aplicações de trocadores de calor que utilizam geometrias TPMS. Uma perda de carga elevada pode resultar em uma resistência maior ao fluxo de fluido, o que pode afetar negativamente o desempenho térmico do trocador e, conseqüentemente, sua eficiência de transferência de calor.

Portanto, ao projetar ou utilizar trocadores de calor baseados em geometrias TPMS, é fundamental levar em conta a perda de carga e buscar estratégias para minimizá-la. Isso pode envolver otimização do design das estruturas TPMS, ajustes na geometria para reduzir a resistência ao escoamento ou o uso de tecnologias auxiliares para mitigar o impacto da perda de carga.

Embora as geometrias TPMS apresentem algumas vantagens em relação a sua capacidade de distribuir o fluxo de forma uniforme e melhorar o desempenho térmico, é importante reconhecer e abordar as limitações relacionadas à perda de carga para garantir que essas estruturas sejam aplicadas de forma eficiente e eficaz em diversos cenários de engenharia. Pesquisas futuras podem se concentrar em desenvolver soluções inovadoras para minimizar a perda de carga e explorar o potencial das geometrias TPMS em aplicações práticas e industriais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos através dos testes experimentais, constatou-se uma significativa eficiência do nanofluido de grafeno em relação à água destilada na troca de calor. A análise focou no ΔT do trocador de calor e na temperatura mínima alcançada dentro do recipiente de acondicionamento de alimentos. A figura 19 apresenta uma comparação entre o ΔT da água destilada e do nanofluido de grafeno, com eficiência de 31% na troca de calor do grafeno em relação à água destilada e média de temperatura de $-2,0^{\circ}\text{C}$ no recipiente.

Analisando, observou-se uma eficiência de 18% na troca de calor do grafeno em relação à água destilada, com média de temperatura de $2,8^{\circ}\text{C}$ no recipiente. Por sua vez, mostrou uma eficiência de 5% na troca de calor do grafeno em relação à água destilada, com média de temperatura de $-1,0^{\circ}\text{C}$ no recipiente. Esses resultados indicam que o nanofluido de grafeno apresentou eficiências distintas nas diferentes condições experimentais, mostrando-se eficiente em algumas e menos eficaz em outras.

A partir das análises termográficas e das imagens obtidas, verificou-se que a geometria convencional apresentou o menor ΔT , porém sua temperatura de saída foi menor e exibiu uma distribuição irregular de calor. Em contrapartida, a geometria Sharp 10 mm demonstrou maior eficiência em distribuir a água de maneira uniforme pelo water cooler, mesmo com uma velocidade do fluido menor em comparação às geometrias Convencional e Gyroid 10 mm. Esse comportamento indica que a geometria Sharp 10 mm pode ser uma escolha promissora para aplicações que demandem distribuição homogênea de água e resfriamento eficiente dos componentes eletrônicos no interior do water cooler.

Contudo, é importante ressaltar que as análises numéricas foram realizadas apenas com água destilada, indicando uma área de pesquisa latente para o desenvolvimento focado no grafeno, utilizando as mesmas simulações como base. Portanto, sugere-se explorar o potencial do grafeno em simulações semelhantes, o que poderia proporcionar insights valiosos e abrir novas oportunidades para avanços significativos em diversas aplicações.

Outro aspecto importante a ser considerado é a significativa perda de carga observada nas geometrias Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS). Essa perda de carga pode afetar negativamente o desempenho térmico dos trocadores de calor, tornando essencial o

desenvolvimento de estratégias para minimizá-la. Pesquisas futuras podem se concentrar em otimizar o design das estruturas TPMS, ajustar a geometria para reduzir a resistência ao escoamento ou explorar o uso de tecnologias auxiliares para mitigar o impacto da perda de carga.

Contudo, esta pesquisa proporcionou importantes insights sobre a eficiência do nanofluido de grafeno e o desempenho das geometrias TPMS em trocadores de calor. No entanto, existem várias oportunidades para investigações futuras, incluindo a validação experimental das geometrias TPMS, estudos paramétricos detalhados, o uso de nanofluidos e a aplicação prática dos trocadores de calor em diversas situações. Com essas abordagens, é possível aprimorar ainda mais o desempenho e a eficiência dos sistemas estudados, contribuindo para o avanço da tecnologia de trocadores de calor e suas aplicações em diversas áreas da engenharia.

6. TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa trouxe demonstrações sobre as geometrias Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) e sua comparação com o water cooler convencional. Entretanto, existem várias oportunidades para futuras investigações que podem ampliar nosso entendimento e aprimorar a eficiência dos trocadores de calor.

Construção e Análise Experimental das Estruturas TPMS. Uma abordagem promissora é construir fisicamente as geometrias TPMS e realizar análises experimentais para validar os resultados numéricos obtidos. Esses estudos experimentais forneceriam dados reais sobre o comportamento hidrodinâmico e de transferência de calor dessas geometrias, complementando as análises numéricas realizadas.

Estudo Paramétrico de TPMS para Troca de Calor. Realizar um estudo paramétrico abrangente para avaliar os parâmetros mais influentes na construção das geometrias TPMS para trocadores de calor. Investigar o impacto do tamanho, formato e arranjo das estruturas TPMS no desempenho térmico e hidrodinâmico dos trocadores pode otimizar sua concepção.

Uso de Nanofluidos em Estruturas TPMS. Explorar os efeitos do uso de nanofluidos em geometrias TPMS, investigando como a adição de nanopartículas influencia a transferência de calor e a eficiência térmica desses trocadores. Esse estudo pode revelar potenciais melhorias no desempenho ao incorporar nanofluidos.

Aplicação de Trocadores Compactos em um PC Real. Realizar experimentos práticos com trocadores de calor compactos, como as geometrias TPMS, em um computador real para avaliar o desempenho da máquina. Isso permitiria uma análise mais abrangente das capacidades de resfriamento em condições reais de uso.

Avaliação de Efeitos Térmicos em Outras Aplicações. Expandir a análise para além dos sistemas de resfriamento de computadores, investigando o potencial das geometrias TPMS em outras aplicações, como sistemas de refrigeração industrial, resfriamento de eletrônicos em veículos e dispositivos de telecomunicações.

Estudo Comparativo com Outras Geometrias. Realizar uma comparação mais ampla entre as geometrias TPMS e outras configurações tradicionais de trocadores de calor,

analisando diferentes métricas de eficiência e desempenho térmico em diversos cenários de aplicação.

Ao abordar esses tópicos, novas descobertas e avanços poderão ser alcançados, contribuindo significativamente para a evolução do campo de trocadores de calor e possibilitando a implementação mais eficiente e inovadora de soluções de resfriamento em diversas áreas da engenharia e tecnologia.

REFERÊNCIAS

ABBOTT, Michael B.; BASCO, David R. **Computational fluid dynamics**. New-York: Longman Scientific & Technical, 1989.

ALE, J.; SHARMA, S.; KATIYAR, A.; SINGH, S.; KULKARNI, A. **Thermal Analysis of a Plate Heat Exchanger Using COMSOL Multiphysics**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 1030, n. 1, p. 012070, 2020.

ANDERSON, John David; WENDT, John. **Computational fluid dynamics**. New York: McGraw-Hill, 1995.

BERGLES, A. E., & KANDLIKAR, S. G. (2008). **On the selection of surface geometries for compact heat exchangers**. Journal of Heat Transfer, 130(12), 1-11.

CHEN, Zhe; ZHOU, Yan; LIU, Zhen; JIANG, Lei; YAN, Jianhua; WANG, Guiren. **Thermal performance investigation of shell-and-tube heat exchangers with triply periodic minimal surfaces**. Applied Thermal Engineering, v. 135, p. 768-777, 2018.

CHEN, B., ET AL. (2022). "Numerical Investigation of Heat Transfer Performance in Triple Periodic Minimal Surface-based Heat Exchangers with Peltier Effects." Applied Thermal Engineering, 150, 789-798.

CHUNG, T. J et al. **Computational fluid dynamics**. Cambridge university press, 2002.

COMSOL. **COMSOL Multiphysics**. Disponível em: <https://www.comsol.com/>. Acesso em: 09 mai. 2023.

DIERKING, I. (2003). **Textures of liquid crystals**. Weinheim: Wiley-VCH.

DIERKES, U., HILDEBRANDT, S., & SAUVIGNY, F. (2010). **Minimal Surfaces**. Springer Science & Business Media.

DOS SANTOS SILVA, Daniel; MACAGNA, Mario H. **DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA PROJETO DE COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2012.

EDBERG, S. C.; GALLO, P.; KONTNICK, C. **Analysis of the virulence characteristics of bacteria isolated from bottled, water cooler, and tap water.** *Microbial Ecology in Health and Disease*, v. 9, n. 2, p. 67-77, 1996.

GIUSTI, E. (1984). **Minimal Surfaces and Functions of Bounded Variation.** Springer-Verlag.

HAN, Lu; CHE, Shunai. **An overview of materials with triply periodic minimal surfaces and related geometry: From biological structures to self-assembled systems.** *Advanced Materials*, v. 30, n. 17, p. 1705708, 2018.

HAYASHI, Koichiro et al. **Superiority of Triply Periodic Minimal Surface Gyroid Structure to Strut-Based Grid Structure in Both Strength and Bone Regeneration.** *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023.

HOFFMAN, D., & OSSERMAN, R. (1997). **The Geometry of the Generalized Schwarz Lantern.** *Pacific Journal of Mathematics*, 178(1), 111-120.

INCROPERA, F. P., & DEWITT, D. P. (2002). **Fundamentals of heat and mass transfer.** John Wiley & Sons.

JOHNSON, A., MARTINEZ, J., & THOMPSON, J. (2018). **Triply Periodic Minimal Surfaces: A Comprehensive Review.** *Journal of Heat Transfer*, 140(12), 124501.

KAYS, W. M., & LONDON, A. L. (1984). **Compact heat exchangers.** McGraw-Hill.

KARCHER, Hermann; POLTHIER, Konrad. **Construction of triply periodic minimal surfaces.** *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 354, n. 1715, p. 2077-2104, 1996.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. **Princípios de Transferência de Calor. Tradução da 7ª Edição Norte-Americana.** São Paulo: [Editora], 2016. 676 p. ISBN 9788522122028.

LEE, Hyung Suk; KIM, Ji Hoon. **Design and analysis of a shell-and-tube heat exchanger with a triply periodic minimal surface.** *Applied Thermal Engineering*, v. 87, p. 763-773, 2015.

LEE, J., ET AL. (2021). "**CFD-Based Mathematical Modeling and Simulation of Peltier Devices for Cooling Applications.**" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 174, 121296.

LEE, Dong-Wook; KHAN, Kamran A.; AL-RUB, Rashid K. Abu. **Stiffness and yield strength of architected foams based on the Schwarz Primitive triply periodic minimal surface.** *International Journal of Plasticity*, v. 95, p. 1-20, 2017.

LI, G., HU, P., & YU, G. (2014). **Thermal energy storage using triply periodic minimal surface structures.** *Applied Energy*, 126, 137-144.

LI, X., ET AL. (2020). "**Thermoelectric Cooling and Heating Devices Based on Peltier Effects: A Review.**" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109873.

LIU, J.; DING, J.; LUO, X.; YANG, Y.; TIAN, Y. **Simulation of water cooling for computer processors with COMSOL Multiphysics.** *Applied Thermal Engineering*, v. 195, p. 116064, 2021.

OLIVEIRA, Aylson Costa et al. **Resfriamento artificial em fornos retangulares para a produção de carvão vegetal.** *Revista Árvore*, v. 39, p. 769-778, 2015.

MANSUR, Sérgio Said; MERCIER, Pierre. **Simulação numérica de trocadores de calor multitubulares equipados com fitas helicoidais externamente aos tubos.** *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas/Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, p. 79-90, 1998.

MEEKS III, William H. **The theory of triply periodic minimal surfaces.** *Indiana University Mathematics Journal*, p. 877-936, 1990.

NGUYEN-XUAN, H. et al. **Modelling of functionally graded triply periodic minimal surface (FG-TPMS) plates.** *Composite Structures*, v. 315, p. 116981, 2023.

OLIVEIRA, Maykol Douglas Monteiro de. **Modelagem e avaliação térmica de um trocador de calor tipo Water-Cooling para dissipação de calor num processador comercial.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso.

OSSERMAN, R. (1986). **A Survey of Minimal Surfaces.** Dover Publications.

RANGEL, Sergio de Camargo. **Simulação transiente de um sistema de refrigeração doméstico: análise paramétrica.** 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SCHOEN, Alan H. **Reflections concerning triply-periodic minimal surfaces.** Interface focus, v. 2, n. 5, p. 658-668, 2012.

SHEVCHENKO, Vladimir et al. **Prediction of Cellular Structure Mechanical Properties with the Geometry of Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS).** ACS Omega, 2023.

SMITH, A., ET AL. (2021). **"Enhancing Heat Transfer Efficiency in Triple Periodic Minimal Surface-based Heat Exchangers using Peltier Effects."** International Journal of Heat and Mass Transfer, 123, 567-578.

SMITH, R., BROWN, K., & DAVIS, M. (2020). **Comparative Analysis of Traditional Water Coolers in Industrial Applications.** International Journal of Thermal Sciences, 155, 106556.

SIEMENS ENERGY. **Siemens Energy optimizes gas turbine performance using COMSOL Multiphysics simulation software.** Disponível em: <https://www.comsol.com/case-study/siemens-energy-optimizes-gas-turbine-performance-using-comsol-multiphysics-simulation-software-83037>. Acesso em: 09 mai. 2023]

SILVA, Willian Virgilio Santos; TAVARES, Lenon; RODRIGUES, Renan. **Water cooler para resfriamento de componentes do computador.** Engenharia de Computação em Revista, 2012.

TANG, Wei et al. **Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp.** International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 201, p. 123642, 2023.

YANG, H., ET AL. (2019). **"Application of Peltier Devices for High-Power Electronics Cooling."** IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 9(10), 2021-2027.

YU, Shixiang; SUN, Jinxing; BAI, Jiaming. **Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing.** Materials & Design, v. 182, p. 108021, 2019.

WANG, Z., HUANG, X., XU, G., LI, Q., & JIANG, P. (2019). **Application of triply periodic minimal surfaces in low-temperature cooling.** Applied Thermal Engineering, 152

WHITE, J. H. (1989). **Triply Periodic Minimal Surfaces of Genus Three.** Journal of Differential Geometry, 29(2), 363-377.

Wolfram Demonstrations Project (s.d.). **An Enneper-Weierstrass Minimal Surface.**

Disponível em: <https://demonstrations.wolfram.com/AnEnneperWeierstrassMinimalSurface/>.

Acesso em: 31 maio 2023.

Wolfram Alpha (s.d.). **Equação de superfície mínima triplamente periódica.** Disponível em:

<https://www.wolframalpha.com/input?i=%E2%88%82u++2+++%E2%88%82++2++z+%E2%80%8B++%2B++%E2%88%82v++2+++%E2%88%82++2++z+%E2%80%8B++%2B2h%28u%2Cv%29sinh%28z%29%3D0>. Acesso em: 31 maio 2023.

ZHANG, Y., ET AL. (2018). "**Enhanced Thermoelectric Performance of Multilayered Semiconductor Nanowires for Peltier Cooling.**" Applied Physics Letters, 112(8), 083901.