

CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO EM ESCALA LABORATORIAL

Allan Ricardo Silva¹

Guilherme Ferreira Guimarães²

Jeferson Matos Hrenechen³

RESUMO

Os trocadores de calor são essenciais na transferência de calor entre fluidos em diversas aplicações. Este estudo revisa sua evolução, tipos, princípios de operação, vantagens e desafios de manutenção. São destacados os trocadores de placas, casco e tubos, e duplo tubo. O trocador de placas, introduzido nos anos 1930, é eficiente e fácil de higienizar, sendo comum no setor alimentício. O trocador de casco e tubo permite troca térmica eficiente entre fluidos, enquanto o trocador de duplo tubo é simples de manter. A eficiência dos trocadores é influenciada pela área de superfície, diferença de temperatura e velocidade de fluxo. Manutenção regular é crucial para evitar incrustações e manter o desempenho. A escolha dos materiais, como cobre, aço e titânio, é vital para a durabilidade e eficiência. O projeto relatado envolveu a construção de um trocador de calor de casco e tubo para fins educativos na FAE Centro Universitário. A metodologia incluiu análise de vídeos de montagens do trocador, seleção de materiais, montagem e testes. Apesar dos desafios, como vazamentos e ajustes, o projeto foi concluído com sucesso, resultando em um dispositivo funcional para uso didático. Este trabalho contribui para o entendimento prático e teórico dos trocadores de calor, beneficiando estudantes e profissionais.

Palavras-chave: Trocadores de Calor. Eficiência. Manutenção. Materiais. Construção.

¹ Aluno do 10º período do curso de Engenharia Mecânica da FAE Centro Universitário. Bolsista do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2023/2024). *E-mail:* allan.ricardo.silva@mail.fae.edu

² Aluno do 3º período do curso de Engenharia Mecânica da FAE Centro Universitário. Voluntário do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2023/2024). *E-mail:* guilherme.f.guimaraes@mail.fae.edu

³ Orientador da Pesquisa. Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFPR, 2011. Professor da FAE Centro Universitário. *E-mail:* jeferson.matos@fae.edu

INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor são dispositivos essenciais em diversas aplicações industriais e domésticas, permitindo a transferência eficiente de calor entre dois ou mais fluidos. Desde cerca de 20.000 a.C., há registros de métodos rudimentares de troca de calor, mas a modernização desses dispositivos iniciou-se com a criação da máquina a vapor por James Watt em 1763.

Esses dispositivos são cruciais em setores como energia, petroquímica, HVAC, automotivo, entre outros, impactando diretamente a eficiência energética e a sustentabilidade dos processos. Os trocadores de calor mais comuns incluem modelos de placas, tubos concêntricos, casco e tubos, aletados e serpentinas, operando sob diferentes regimes de fluxo, como o fluxo paralelo e o contracorrente, que influenciam a eficiência da transferência de calor.

Trocadores de calor de placas, introduzidos na década de 1930, são conhecidos por sua alta eficiência térmica e facilidade de higienização, especialmente no setor alimentício. Trocadores de casco e tubo, amplamente utilizados, consistem em um casco cilíndrico com tubos internos que facilitam a troca de calor entre os fluidos. Trocadores de calor de duplo tubo, com design em formato de U e dois tubos concêntricos, são reconhecidos pela facilidade de manutenção e higienização.

A evolução tecnológica desses dispositivos busca aumentar sua eficiência e durabilidade. Compreender o funcionamento e as vantagens específicas de cada tipo é essencial para engenheiros e profissionais em projetos que demandam controle térmico preciso e eficiente. Este trabalho explora os princípios fundamentais dos trocadores de calor, suas classificações, métodos de operação e critérios de seleção, além de apresentar a construção e testes de um trocador de calor proposto, que será disponibilizado aos alunos de engenharia da FAE para estudos futuros.

DESENVOLVIMENTO

Este capítulo tem como objetivo apresentar as principais questões quando falamos em trocadores de calor, apontando todos os pontos necessários na fundamentação teórica para o entendimento do conteúdo, por meio de uma linguagem técnica, ilustrando-os com imagens para exemplificar seu entendimento. Após isso, será abordada a metodologia usada para tal estudo, seguido da análise de resultados do projeto.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os trocadores de calor são dispositivos essenciais na transferência de calor entre fluidos em diversas aplicações. Abaixo, apresentamos uma visão abrangente sobre os tipos de trocadores de calor, seus princípios de operação, vantagens e desvantagens, além de fundamentos da transferência de calor, métodos de cálculo e dimensionamento, eficiência térmica, desafios de manutenção, e inovações tecnológicas.

1.1 TIPOS DE TROCADORES DE CALOR

Há vários tipos de trocadores de calor, sendo os principais:

- TROCADOR CASCO E TUBO

Composto por um casco cilíndrico e uma série de tubos paralelos, permite a troca térmica eficiente entre dois fluidos: um fluído dentro dos tubos e outro por fora, entre o casco e os tubos. As placas conhecidas como espelhos acomodam os tubos, enquanto chicanas direcionam o fluído externo, aumentando a eficiência. As principais vantagens incluem alta versatilidade, flexibilidade no diâmetro e espaçamento entre as chicanas, resultando em um alto índice de troca de calor.

FIGURA 1 — Trocador de calor casco e tubo



FONTE: Trocador de Calor (2023)

- TROCADOR DE PLACAS

Consiste em uma série de placas metálicas paralelas que formam canais para os fluidos quente e frio, permitindo a troca térmica indireta em fluxo contracorrente. Introduzido na década de 1930, é amplamente utilizado devido à sua facilidade de

higienização e alta eficiência na transferência de calor. Vantagens incluem fácil acesso à superfície de troca, possibilidade de alterar a área de troca térmica, baixo custo operacional e fácil manutenção.

FIGURA 2 — Trocador de calor de placas

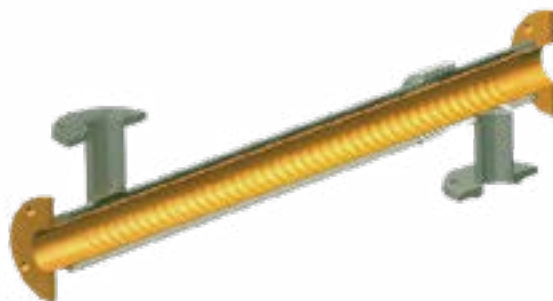


FONTE: Trocador de Calor (2024)

- TROCADOR DUPLO TUBO OU TUBULAR

Com diversas variações geométricas, o exemplo mais simples é o condensador de Liebig, usado em destilações laboratoriais. Em aplicações industriais, a configuração mais comum é a de “grampo” (hairpin), que facilita a montagem e manutenção. Vantagens incluem a eficiente troca de calor na parede do tubo interno e a possibilidade de incluir múltiplos tubos com aletas.

FIGURA 3 — Trocador de Calor duplo tubo ou tubular



FONTE: Trocador de Calor (2024)

1.2 FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O calor é transferido de três maneiras principais: condução, convecção e radiação. Na condução, a energia térmica é transferida de molécula para molécula através de um meio estacionário. A convecção envolve a movimentação de um fluido sobre uma superfície, podendo ser forçada por bombas ou ventiladores. A radiação térmica é a transferência de energia na forma de ondas eletromagnéticas e não requer um meio material. Compreender esses fundamentos é essencial para o projeto e operação eficientes dos trocadores de calor.

1.3 EFICIÊNCIA DOS TROCADORES DE CALOR

A eficiência de um trocador de calor é medida pela quantidade de calor transferida em comparação com a quantidade disponível no fluido quente (equação 1). Fatores que influenciam a eficiência incluem a área de superfície, a diferença de temperatura entre os fluidos, a velocidade do fluxo dos fluidos e as propriedades dos fluidos. A manutenção regular para evitar incrustações e sujeira nas superfícies do trocador é crucial para manter a eficiência.

$$\text{Grau de Eficiência} = \frac{\text{Calor Transferido}}{\text{Calor Disponível}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (2)$$

1.4 MÉTODOS DE CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO

O cálculo da superfície de troca térmica baseia-se na diferença de temperatura média logarítmica (DTML) e no coeficiente de transferência de calor (K) (equação 2). Este é um método eficaz para minimizar as divergências de resultados devido às variações de temperaturas ao longo dos tubos no trocador de calor. Também é importante considerar a perda de carga no trocador, que afeta a eficiência energética e os custos operacionais. A eficiência é determinada pela quantidade de energia transferida entre os fluidos e as temperaturas de entrada e saída dos mesmos.

1.5 PERDAS DE CARGA

As perdas de carga, ou quedas de pressão, impactam a eficiência energética e os custos operacionais dos trocadores de calor. Elas ocorrem devido ao atrito entre o fluido e as superfícies internas, mudanças na direção do fluxo, obstruções e restrições internas, e as propriedades dos fluidos, como viscosidade e densidade.

Os principais fatores incluem:

- **Fricção:** Resistência ao fluxo nas superfícies internas;
- **Mudanças na Direção:** Aumentam a perda de carga em trocadores com múltiplas passagens;
- **Componentes Internos:** Tubos e aletas que obstruem o fluxo;
- **Propriedades dos Fluidos:** Viscosidade e densidade influenciam as perdas.

Para minimizar as perdas, é essencial otimizar o design, selecionar materiais adequados, realizar manutenção regular e operar dentro da faixa de fluxo recomendada. Transições suaves e um design bem planejado reduzem significativamente as perdas de carga, melhorando a eficiência do sistema.

1.6 MATERIAIS E CONSTRUÇÃO

Os trocadores de calor são construídos com materiais que variam conforme a aplicação, temperatura e pressão requeridas. Tubos de cobre, alumínio, aço e titânio são comuns devido à sua excelente condução térmica e resistência à corrosão, podendo ser revestidos com alumínio ou zinco para maior durabilidade. O casco é geralmente feito de aço carbono ou aço inoxidável, com opções como Hastelloy ou Inconel para ambientes altamente corrosivos. A escolha dos materiais leva em conta o tipo de fluido, as condições de operação e os requisitos de manutenção, influenciando diretamente o desempenho e a longevidade do trocador de calor.

As perdas de carga, causadas pelo atrito do fluido com as superfícies internas, mudanças de direção e obstruções, impactam a eficiência energética e os custos operacionais em trocadores de calor em escala industrial. Minimizar essas perdas envolve otimizar o design, selecionar materiais adequados e realizar manutenção regular. A evolução tecnológica, com destaque para modelos compactos como os trocadores de placas, e a incorporação de materiais avançados como tântalo, carbetos de silício e titânio, refletem as tendências de mercado e os esforços da indústria para inovar e enfrentar a concorrência global, mantendo a relevância e a competitividade. Vale destacar que o trocador de calor utilizado neste trabalho apresenta dimensões muito inferiores comparados aos equipamentos industriais, logo, as perdas de carga foram desprezadas.

1.7 APLICAÇÕES DOS TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são amplamente utilizados em sistemas de aquecimento urbano, refrigeração de processos industriais, aquecimento de água de torneira, controle de temperatura em pisciculturas, e resfriamento de óleos de diferentes viscosidades. Eles oferecem soluções confiáveis e eficazes para uma variedade de necessidades térmicas, operando em condições desafiadoras.

1.8 AVANÇOS TECNOLÓGICOS E TENDÊNCIAS FUTURAS

Os trocadores de calor estão evoluindo rapidamente devido a avanços tecnológicos e novas demandas do mercado. Aqui estão os principais avanços tecnológicos e tendências futuras para esses equipamentos:

Avanços Tecnológicos:

- **Trocadores de Calor de Microcanais:** Utilizam canais extremamente pequenos, aumentando a área de superfície disponível para a troca de calor em um espaço compacto, essencial em sistemas de refrigeração e ar condicionado;
- **Trocadores de Calor de Placas Soldadas:** Apresentam placas com canais corrugados soldados, oferecendo maior eficiência na transferência de calor e facilidade de limpeza;
- **Trocadores de Calor de Tubos Aletados:** Possuem tubos com aletas externas que aumentam a área de superfície para a transferência de calor, ideais para sistemas de vaporização e condensação;
- **Trocadores de Calor de Duplo Tubo Compacto:** Design compacto e eficiente para espaços limitados, amplamente usados em processos industriais que exigem eficiência energética;
- **Trocadores de Calor de Grafeno:** Utilizam grafeno, um material altamente eficiente na condução de calor, aumentando significativamente a capacidade de transferência de calor.

Tendências Futuras:

- **Crescimento do Mercado:** O mercado de trocadores de calor está projetado para crescer de US\$ 16,73 bilhões em 2023 para US\$ 21,42 bilhões até 2029, com um CAGR de 5,07%. Este crescimento é impulsionado por novas aplicações industriais e desenvolvimento de usinas, especialmente na Ásia-Pacífico;

- **Domínio da Geração de Energia:** Espera-se que o segmento de geração de energia continue dominando o mercado, impulsionado pela crescente demanda por eletricidade em residências e operações industriais;
- **Expansão na Ásia-Pacífico:** A região da Ásia-Pacífico deve dominar o mercado devido a inúmeros projetos de energia em construção, especialmente na China e Índia, onde a industrialização e urbanização estão em alta;
- **Impacto das Energias Renováveis:** Embora o crescimento das energias renováveis, que raramente requerem trocadores de calor, possa ter um impacto negativo, a necessidade de geração de energia nos países em desenvolvimento criará novas oportunidades;
- **Manutenção e Atualização:** A reforma e retubagem de trocadores de calor antigos serão essenciais para prolongar a vida útil dos equipamentos, melhorar a eficiência e incorporar as mais recentes tecnologias.

Esses avanços e tendências indicam um futuro promissor para os trocadores de calor, com inovações tecnológicas e um mercado em expansão, particularmente na geração de energia e nas regiões em desenvolvimento.

1.9 NORMAS E REGULAMENTAÇÕES

A ABNT NBR 12555 de 12/1991 é a principal norma brasileira que determina os parâmetros e termos empregados em trocadores de calor de casco e tubo, duplo tubo, placas e resfriado a ar. A NR-13 estabelece os requisitos mínimos para a inspeção de trocadores de calor no Brasil, visando garantir a segurança dos trabalhadores, equipamentos e instalações.

2 METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizado um estudo das possíveis maneiras de se construir um trocador de calor casco e tubo em pequena escala. Esse estudo se deu através de artigos publicados e vídeos do youtube, os quais mostravam que materiais eram utilizados em cada equipamento e como era feito todo o processo. Abaixo temos a listagem de alguns vídeos escolhidos:

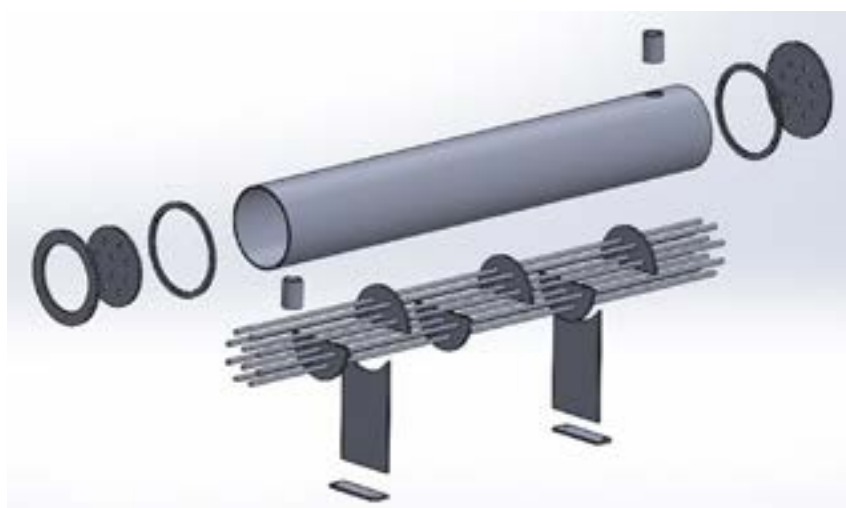
1. Elaboración de un intercambiador de calor (casero);
2. Diseño de Intercambiador de coraza y tubos;
3. Diseño de intercambiador de calor de tubos y coraza;
4. Fabricacion de un Intercambiador de calor tubular.

O projeto base escolhido foi um mesclado dos números 2 e 3, visto que a construção apresentada em cada vídeo tinha pontos positivos e negativos. O projeto 1 não foi escolhido, porque o mesmo tinha uma construção simples com tubos de PVC, o qual não é possível acompanhar o fluxo de água dentro do trocador. Já o projeto 4 é mais do segmento industrial, e o mesmo torna-se inviável de se produzir na faculdade.

Este projeto proposto no PAIC, visa o entendimento de todos os processos que ocorrem no trocador de calor, sendo assim, os vídeos 2 e 3 se encaixam perfeitamente nessa ideia, visto que são apresentados cascos de acrílico nos projetos, e estes facilitam o entendimento sobre o assunto, desse modo é possível ver toda a passagem de água no equipamento.

Após a escolha do design do trocador, foi realizado o desenho de cada uma das peças que iam compor o equipamento, e essas podem ser vistas na imagem abaixo.

FIGURA 4 — Peças do trocador de calor casco e tubo



FONTE: Os autores (2024)

Depois de esboçado, foi levantado o material necessário para a construção do instrumento conforme a tabela abaixo. A mesma já apresenta todos valores gastos em cada utensílio.

FIGURA 5 — Material utilizado no trocador de calor

LISTA DE MATERIAIS – TROCADOR CASCO-TUBO					
COMPRA INICIAL					
	QTDE	UN	DESCRIÇÃO	OBSERVAÇÃO	VALOR
1 - ACRÍLICO	1	PÇ	Tubo de acrílico 150x3,0x1000 EXTR-I		R\$ 373,20
	2	PÇ	FLANGE EXTERIOR / Acrílico Cristal 5mm		R\$ 44,00
	1	PÇ	FLANGE INTERIOR / Acrílico Cristal 5mm		R\$ 22,00
	6	PÇ	CHICANA / Acrílico Cristal 5mm		R\$ 90,00
	2	PÇ	PE SUPERIOR / Acrílico Cristal 5mm		R\$ 40,00
	2	PÇ	PE INFERIOR / Acrílico Cristal 5mm		R\$ 20,00
2 - TUBO	15	M	Tubo alumínio 9,53x1mmx3000mm		R\$ 75,00
3 – MANGUEIRAS E ACESSÓRIOS	3	M	Mangueira silicone 6,0mm x 1,0 mm		R\$ 66,00
	20	PÇ	Conexão reta macho 1/4" x 10mm		R\$ 110,00
	0,5	M	Langol 1/16x1000x5L		R\$ 43,50
	5	M	Mangueira cristal comum 1"x2,0mm		R\$ 52,50
	3	PÇ	Espigão fixo macho 1"x 1"		R\$ 38,97
	3	PÇ	Abraçadeira aço carbono 14mm		R\$ 15,60
4 – FIXADOR E CONEX. PVC	1	PÇ	Adesivo anidite - Rápido 5mln 23g		R\$ 26,83
	1	PÇ	Durepoxi branco 50g	(TEM NA FAE, NÃO COMPRAR)	R\$ -
	1	PÇ	Cola PVC 17g	(TEM NA FAE, NÃO COMPRAR)	R\$ -
	1	PÇ	Veda rosca 18mm x 10m	(TEM NA FAE, NÃO COMPRAR)	R\$ -
	3	PÇ	Luva 32mmx1" sold		R\$ 62,70
5 - PARAFUSOS	12	PÇ	Parafuso sextavado M6x16		R\$ 3,36
	12	PÇ	Porca auto travante zincada M6		R\$ 1,80
	12	PÇ	Arruela lisa M6		R\$ 3,12
TOTAL					R\$ 1.088,58
COMPRA COMPLEMENTAR					
	QTDE	UN	DESCRIÇÃO	OBSERVAÇÃO	VALOR
1 - ACRÍLICO	2	PÇ	FLANGE EXTERIOR 12 FURDS		R\$ 40,00
	1	PÇ	FLANGE EXTERIOR 24 FURDS		R\$ 20,00
	4	PÇ	MÃO FRANCESA	SUPORTE PARA BASE	R\$ 30,00
3 – MANGUEIRAS E ACESSÓRIOS	5	M	mangueira 10x1,5 azul		R\$ 30,00
4 – FIXADOR E CONEX. PVC	1	PÇ	Luva 32mmx1" sold		R\$ 6,99
	2	PÇ	Durepoxi branco 50g		R\$ 19,80
	3	PÇ	Luva PVC 1" branca		R\$ 7,50
	1	PÇ	Joelho 90° PVC		R\$ 3,09
	1	PÇ	União tigre 32mm		R\$ 19,29
5 - PARAFUSOS	36	PÇ	Parafuso M6x25 inox		R\$ 32,48
	36	PÇ	porca auto travante M6 inox		R\$ 25,20
	36	PÇ	arruela M6 inox		R\$ 12,60
6 – AQUECIMENTO DE ÁGUA	1	PÇ	Resistência para torneira 220V - 5500W		R\$ 44,00
TOTAL					R\$ 291,15
TOTAL GERAL					R\$ 1.379,73

FONTE: Os autores (2024)

Observação: A tabela acima contempla tanto os valores gastos no início do projeto, os quais foram passados ao setor financeiro da FAE Centro Universitário para a compra prévia, como os valores gastos durante a construção do projeto, que foram comprados pelos alunos visando a resolução de cada dificuldade enfrentada ao longo da montagem do trocador.

Depois da definição do material, aguardou-se a compra destes, e assim que chegaram no campus da FAE Centro Universitário, deu-se início a montagem. Para

começar, foram encaixados os tubos de alumínio nas chicanas, fazendo uma intercalação nos espaços existentes dos tubos. Logo após, os tubos de alumínio foram introduzidos no tubo de acrílico, e em seguida as flanges foram fixadas nas duas extremidades do acrílico. Os suportes foram colados (formando os apoios para o trocador de calor) com Super Bonder e Durepoxi, o qual apresentou uma boa resistência em sua fixação.

FIGURA 6 — Chicanas encaixadas nos tubos de alumínio



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 7 — Apoio do trocador de calor



FONTE: Os autores (2024)

Em seguida, foi realizado um corte no tubo de acrílico, pois um dos cantos não estava plano, e lixar não seria uma boa opção, então a opção que se tinha era utilizar uma serra para executar o serviço, mas ocorreu um imprevisto e o canto cortado acabou se quebrando. Imediatamente, o corte foi refeito com mais cuidado atrás da linha da quebra.

FIGURA 8 — Fixação e corte do tubo de acrílico



FONTE: Os autores (2024)

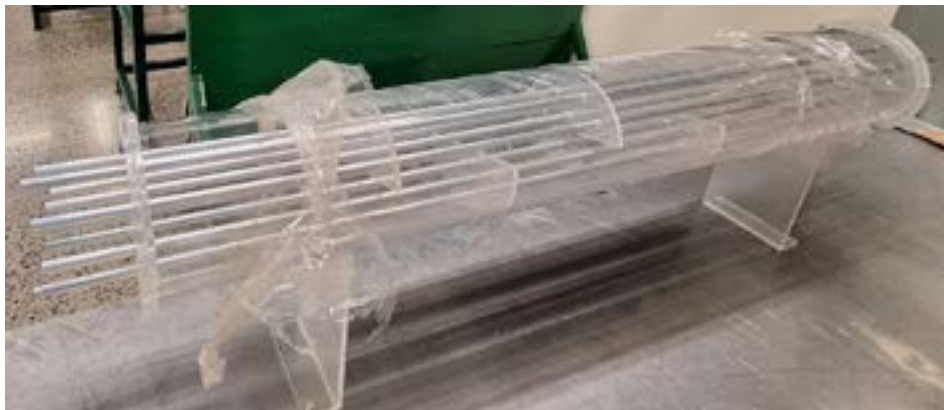
FIGURA 9 — Resultado final da retirada da parte quebrada do tubo acrílico



FONTE: Os autores (2024)

Depois do passo anterior, as flanges foram fixadas novamente, as bases abaixo do trocador também foram coladas e o resultado ficou conforme a imagem a seguir.

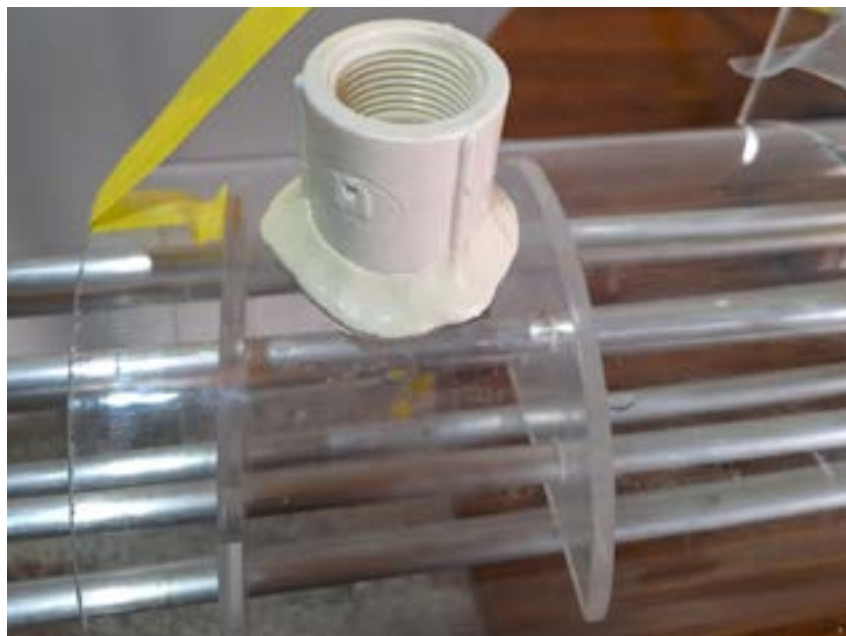
FIGURA 10 — Trocador de calor previamente montado



FONTE: Os autores (2024)

Dois furos, um em cada canto, foram feitos no acrílico, com o intuito de fazer a passagem de água entre as chicanas. Depois dos furos, foram encaixados dois conexões de PVC, os quais irão fazer a condução da água para dentro do trocador, estes foram fixados com cola de PVC e Durepoxi, após uma desbastada no local da colagem com a retífica e a lixa (para dar mais aderência na hora da colagem). O resultado deste passo é exposto pela figura seguinte.

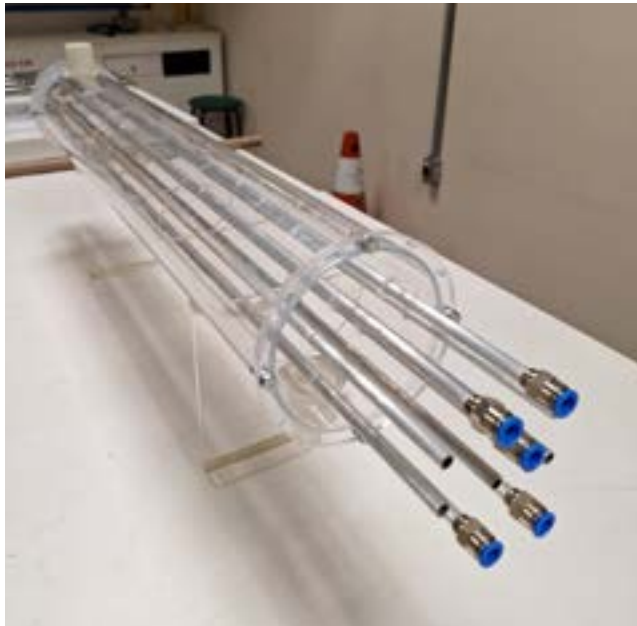
FIGURA 11 — Conexão de PVC fixada



FONTE: Os autores (2024)

Prontamente, foram fixados nos tubos de alumínio conexões retas, e estas têm o objetivo de possibilitar que o trocador tenha suas entradas de circulação de líquidos intercambiáveis, sua fixação pode ser vista abaixo.

FIGURA 12 — Conexões retas conectadas aos tubos de alumínio



FONTE: Os autores (2024)

Posteriormente, foram refeitas as flanges do trocador, pois a flange inicial possuía 6 furos em seu entorno, sendo adicionados mais 6, totalizando em 12 o número de furos. Isto foi feito com o intuito de evitar grandes vazamentos em seu entorno, visto que cada parafuso prende uma certa área quando recebe o aperto, apenas aqueles 6 parafusos não seriam necessários em questão da área de contato. Então as novas flanges que foram fixadas no trocador, ficaram neste formato abaixo. Esse item foi fixado no trocador com uma borracha de vedação, para evitar a saída de água pela peça.

FIGURA 13 — Flange com 12 furos



FONTE: Os autores (2024)

Tendo tudo isto montado, foi realizado o primeiro teste, para verificar se não havia vazamentos em suas flanges. O trocador foi ligado a um tanque de água através de uma mangueira em sua entrada do casco, e o mesmo foi enchendo e esvaziando após alguns minutos. Seu resultado não foi tão satisfatório, uma vez que ocorreram alguns vazamentos localizados conforme imagens abaixo.

FIGURA 14 — Vazamento no trocador de calor



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 15 — Vazamento no trocador de calor



FONTE: Os autores (2024)

Para resolver o problema do vazamento, foram construídas novas flanges, com 24 furos, 12 furos nos extremidades e 12 furos perto do tubo acrílico, isso foi realizado para se ter uma melhor vedação. Sua furação e encaixe no trocador podem ser observadas nas figuras abaixo.

FIGURA 16 — Nova flange exterior



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 17 — Encaixe da nova flange e anel de vedação no trocador de calor



FONTE: Os autores (2024)

Antes da construção das novas flanges com 24 furos, foi realizada uma tentativa de adaptação da flange com 12 furos através da inserção de novos furos na mesma, mas não teve-se sucesso, pois a peça de acrílico acabou rachando em algumas partes, conforme foto abaixo.

FIGURA 18 — Falha na tentativa de adaptação da flange exterior



FONTE: Os autores (2024)

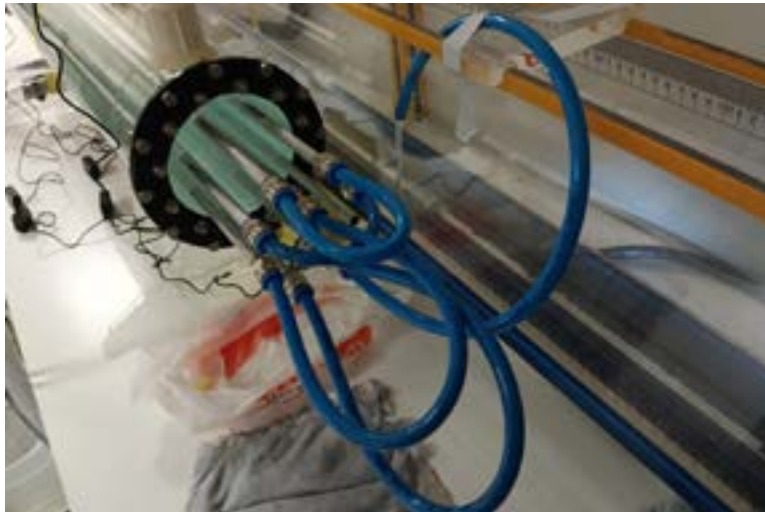
Após o encaixe da nova flange, o trocador foi submetido ao segundo teste, o qual apresentou uma boa vedação de seu casco. Após executado o teste do casco, os tubos de alumínio foram preparados para o teste de vedação e temperatura. Iniciou-se com a conexão entre os tubos de alumínio, criando multipasses no trocador, e deixando apenas uma entrada e uma saída.

FIGURA 19 — Entrada e multipasses do trocador



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 20 — Saída e multipasses do trocador



FONTE: Os autores (2024)

A entrada do tubo de alumínio foi conectada a uma torneira, a qual tem a finalidade de aquecer a água do tubo de alumínio e realizar a troca de calor com a água do casco (que estará a temperatura ambiente). E para realizar a alimentação da

torneira, a mesma foi conectada a um tubulação de água próxima, toda a extensão do fornecimento até a torneira foi feita com uma mangueira de jardim e seus adaptadores.

FIGURA 21 — Torneira utilizada para o aumento de temperatura



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 22 — Fornecimento e passagem d'água para a torneira de aquecimento



FONTE: Os autores (2024)

Em seguida, a bancada hidráulica da FAE Centro Universitário foi adaptada para que fosse possível o fornecimento de água para o casco, então uma parte em específico da bancada foi desconectada do circuito adjacente, e conectada ao casco do trocador de calor, através de uma mangueira transparente com alguns fixadores. Já a saída do casco do trocador de calor foi conectada a caixa d'água da bancada (a qual fica na parte de trás do equipamento).

FIGURA 23 — Adaptação para fornecimento de água ao casco



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 24 — Ponto de saída da água do casco trocador de calor



FONTE: Os autores (2024)

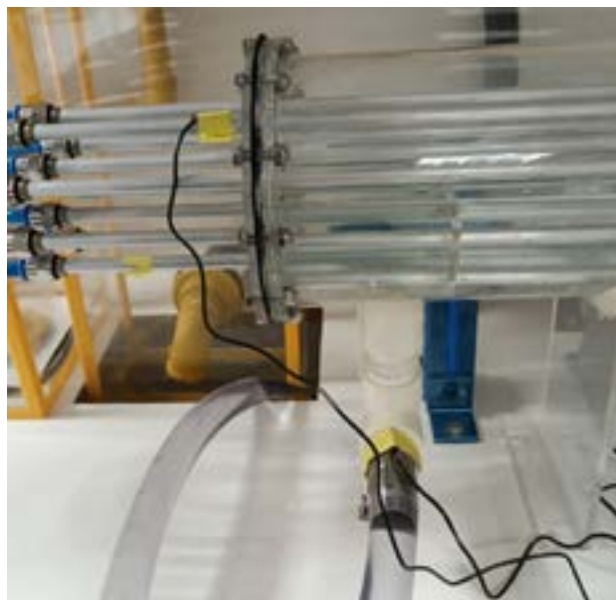
Com todas as conexões realizadas, foram inseridos no sistema alguns medidores de temperatura, os quais têm por finalidade mostrar a entrada de cada local e suas respectivas saídas, deixando visível a variação de temperatura ao longo do sistema.

FIGURA 25 — Dispositivo de medição de temperatura



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 26 — Conexão dos dispositivos no trocador de calor



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 27 — Conexão dos dispositivos no trocador de calor



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 28 — Dispositivos antes do teste



FONTE: Os autores (2024)

Imediatamente, foi ligado um inversor de frequência 1 da bancada hidráulica na faixa de 40 Hz (Hertz), o qual já acionou a bomba 1 em que estava conectado, liberando a água para o casco. Juntamente com a bomba, foi acionado o sistema de fornecimento de água da torneira de aquecimento (figura 19), com tudo isto pronto, deu-se início ao terceiro teste.

FIGURA 29 — Inversores de frequência da bancada hidráulica



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 30 — Bombas da bancada hidráulica



FONTE: Os autores (2024)

Acionado o sistema, o trocador de calor começou a circular água tanto pelo casco, como pelo tubo de alumínio, e após alguns minutos, o sistema já estava cheio de água com uma boa circulação. A partir dos termômetros, pode-se perceber as variações de temperatura dos fluidos, sendo que a água que circula pelos tubos entra a $48,2^{\circ}\text{C}$ e sai a $22,0^{\circ}\text{C}$ enquanto a água do casco entra no sistema a $20,6^{\circ}\text{C}$ e sai a $21,1^{\circ}\text{C}$. Assim, é possível concluir que o trocador de calor atendeu a sua função de resfriamento da água quente por meio da convecção térmica.

FIGURA 31 — Sistema em funcionamento



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 32 — Variação da temperatura entre sua entrada e saída



FONTE: Os autores (2024)

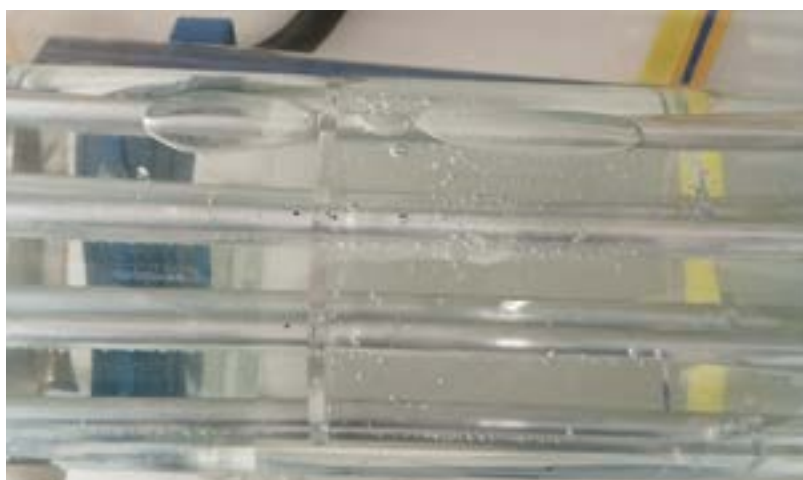
Por fim, identificou-se dentro do casco do trocador a formação de algumas bolhas de ar no início e no centro do dispositivo, isso acontece porque o ar que está na parte superior não consegue acompanhar a trajetória que a água faz pelas chicanas do trocador. Este ponto em específico, não atrapalha o funcionamento e desempenho do aparelho.

FIGURA 33 — Bolhas de ar na entrada do trocador



FONTE: Os autores (2024)

FIGURA 34 — Bolhas de ar no centro do trocador



FONTE: Os autores (2024)

2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste projeto do trocador de calor casco e tubo foram encontradas algumas dificuldades quanto a sua construção, como o isolamento de alguns pontos localizados, pois possuíam vazamentos d'água, devido ao mau aperto e mau encaixe das peças. Outra adversidade identificada foi as adaptações feitas ao longo do processo, como o corte do tubo e a furação das flanges, mas tanto esta como a citada anteriormente foram resolvidas com sucesso e o trocador de calor ficou com uma isolação muito boa, suas peças alinhadas e bem encaixadas no sistema.

Após cada teste realizado, foi possível identificar cada erro dentro do equipamento construído, permitindo realizar as correções necessárias para a adequação do mesmo, e isso possibilitou um entendimento prático de como é realizado tal planejamento, enriquecendo o aprendizado dos envolvidos no projeto.

Em suma, essa proposta feita pelo PAIC de 2023/24 foi concluída com sucesso, visto que será realizada a entrega a FAE Centro Universitário de um trocador de casco e tubo funcional, para que os alunos das áreas correlatas tenham uma experiência prática do assunto em questão. Este relatório servirá também como base para os profissionais que estejam começando no ramo, ou entusiastas da área, pois possui os assuntos necessários quando fala-se sobre trocadores de calor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto do trocador de calor de casco e tubo na FAE Centro Universitário foi bem-sucedido, alcançando os objetivos de design e funcionalidade, além de oferecer uma valiosa experiência prática aos estudantes. O dispositivo demonstrou eficiência e adequação para fins educacionais, permitindo a compreensão prática dos princípios de transferência de calor.

Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros:

1. Exploração de Materiais e Configurações Diferentes: Investigar novos materiais e configurações para aumentar a eficiência e durabilidade do trocador de calor;
2. Incorporação de Sensores e Monitoramento: Implementar sensores e sistemas de monitoramento em tempo real para melhorar a análise de desempenho e o processo de ensino;
3. Estudo de Variáveis Operacionais: Realizar estudos sobre o impacto de diferentes variáveis operacionais, como vazão e temperatura, no desempenho do trocador de calor.

Essas recomendações podem contribuir para a evolução do projeto e fornecer insights valiosos para futuros desenvolvimentos na área de engenharia térmica.

REFERÊNCIAS

ALFA LAVAL. **Trocador de calor**: definição, funcionamento, tipos e aplicações. Disponível em: <https://www.alfalaval.com.br/produtos/transferencia-de-calor/trocadores-de-calor-a-placa/trocador-de-calor/>. Acesso em: 11 jun. 2024.

AWP ENGENHARIA. **Inspeção em trocador de calor**. Disponível em: <https://www.awpengenharia.com.br/inspecao-trocador-calor#:~:text=O%20projeto%20do%20trocador%20de,inspe%C3%A7%C3%A3o%20em%20trocador%20de%20calor>. Acesso em: 11 jun. 2024.

BARRIQUAND. **Como projetar um trocador de calor?** Disponível em: <https://www.barriquand.com/pt/como-projetar-um-trocador-calor/>. Acesso em: 12 jun. 2024.

BELTRAN, D. C. Elaboración de un intercambiador de calor (casero). **YouTube**, 6 dez. 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=irVI0ryAwI8>. Acesso em: 28 de ago. 2023.

BUENO FIGUEIREDO, F. A.; VALARELLI, I. D.; SCALON, V. L. Análise da eficiência de dois tipos de trocadores de calor de aquecimento indireto, para a secagem de grãos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2., 2002, João Pessoa. **Anais [...]**, João Pessoa, 2002. p. 1-10. Disponível em: <https://abcm.org.br/anais/conem/2002/trabalhos/tema18/CPB1074.PDF>. Acesso em: 12 jun. 2024.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**: uma abordagem prática. 4. ed. [s.l.]: McGrall-Hill, 2012.

GLOBAL TROCADORES DE CALOR. **Manutenção de trocadores de calor**. Disponível em: <https://www.globaltrocadores.com.br/manutencao-trocadores-calor>. Acesso em: 11 jun. 2024.

HELERBROCK, R. Condução térmica. **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/conducao-termica.htm>. Acesso em: 13 jun. 2024.

INTEL SERVICE. **O que é**: grau de eficiência do trocador de calor? Disponível em: <https://instel-pmoc.com.br/glossario/o-que-e-grau-de-eficiencia-do-trocador-de-calor/>. Acesso em: 12 jun. 2024.

JORNAL MONTES CLAROS. **Inovações tecnológicas em trocadores de calor**. Disponível em: <https://jornalmontesclaros.com.br/2023/09/29/inovacoes-tecnologicas-em-trocadores-de-calor/>. Acesso em: 11 jun. 2024.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para a engenharia**. 6. ed. [s.l.]: LTC, 2008.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado de trocadores de calor e análise de ações**: tendências e previsões de crescimento (2024 - 2029). Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/heat-exchanger-market>. Acesso em: 11 jun. 2024.

PROPEQ. **Trocadores de calor**: quais os tipos e por que são importantes? Disponível em: <https://propeq.com/trocadores-de-calor/>. Acesso em: 11 jun. 2024.

RODRIGUEZ, M. A. L. Diseño de Intercambiador de coraza y tubos. **YouTube**, 10 nov. 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=oG0bwmUcvFc>. Acesso em: 28 ago. 2023.

ROMERO, M. R. G. Diseño de intercambiador de calor de tubos y coraza. **YouTube**, 25 nov. 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=b7Lar3XXpX4>. Acesso em: 28 ago. 2023.

SANTOMAURO, A. C. Trocadores de calor: materiais avançados e economia de energia comandam o mercado. **Química.com.br**, 2014. Disponível em: <https://www.quimica.com.br/trocadores-de-calor-materiais-avancados-e-economia-de-energia-comandam-o-mercado/>. Acesso em: 12 jun. 2024.

SANTOS, F. G. **Cálculo Mecânico de um trocador de calor de tipo casco e tubo (shell and tube)**. 2019. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2019. Disponível em: https://www.ufrb.edu.br/engenhariamecanica/images/TCC/TCC_FERNANDA_GON%C3%87ALVES_SANTOS_-_REVISADO.pdf. Acesso em: 12 jun. 2024.

SUICALSA. Fabricacion de un intercambiador de calor tubular. **YouTube**, 14 fev. 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=hE4iaMQ8OBU>. Acesso em: 28 ago. 2023.

TARGET NORMAS. **NBR12555 de 12/1991**: Trocadores de calor - Terminologia. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/8312/nbr12555-trocadores-de-calor-terminologia#:~:text=NBR12555%20DE%2012%2F1991>. Acesso em: 11 jun. 2024.

TERMO-TEK. **Manutenção de trocadores de calor**. Disponível em: <https://www.termotek.com.br/manutencao-trocadores-calor>. Acesso em: 11 jun. 2024.

TRETA PAK. **Cinco dicas de solução de problemas para trocadores de calor tubulares**. Disponível em: <https://www.tetrapak.com/pt-br/insights/cases-articles/troubleshooting-tips-for-tubular-heat-exchangers>. Acesso em: 11 jun. 2024.

TROCADOR DE CALOR. **Trocador de calor casco e tubo**. Trocador de calor, 2023. Disponível em: <https://www.trocadordec calor.com.br/trocador-de-calor-casco-e-tubo>. Acesso em: 15 nov. 2023.

TROCADOR DE CALOR. **Trocador de calor**. Disponível em: <https://www.trocadordec calor.com.br/trocador-de-calor>. Acesso em: 11 jun. 2024.

VRCOOLER. **Quais materiais são normalmente usados para construir um trocador de calor de casco e tubo?** Disponível em: <http://pt.vrcoolerru.com/news/what-materials-are-typically-used-to-construct-67995039.html#:~:text=Os%20materiais%20usados%20%E2%80%8B%E2%80%8B,calor%20e%20resistentes%20%C3%A0%20corros%C3%A3o>. Acesso em: 12 jun. 2024.

VRCOOLER. **Quais são alguns procedimentos comuns de manutenção para trocadores de calor de casco e tubos?** Disponível em: <http://pt.vrcoolerru.com/news/what-are-some-common-maintenance-procedures-fo-68002740.html>. Acesso em: 11 jun. 2024.