



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBOS

MODELING, SIMULATION AND IMPLEMENTATION OF SHELL AND TUBES HEAT EXCHANGER

¹AYRES, Camilla da Silva; ²TESTA, Thales Vinicius; ³COELHO, Filipe Alves;

¹Estudante do curso de Engenharia Mecânica; ²Estudante do curso de Engenharia Química; ³Professor do Curso de Engenharia Química da Universidade São Francisco;

¹camilla.ayres@mail.usf.edu.br; ²thales.testa@mail.usf.edu.br

RESUMO. Os trocadores de calor são equipamentos amplamente utilizados industrialmente em operações de troca térmica, seja aquecendo ou resfriando diferentes tipos de fluidos. Dentre os diversos tipos de trocadores de calor, um dos mais utilizados é o casco e tubos. Este, por sua forma construtiva, pode ser compacto ou ser de grandes dimensões. Este trabalho tem como objetivo a modelagem, simulação e implementação de um trocador de calor casco e tubos 1-2 (um passe no caso e dois passes no tubo), para fins didáticos, utilizando materiais recicláveis e de baixo custo, além da instrumentação com sensores de temperatura e de vazão. Para isso, foi utilizada uma planilha de cálculos interativa, possibilitando prever o comportamento térmico do trocador com base nas geometrias dos materiais usados. Foi observado que o trocador foi efetivo na troca de calor entre água fria e água em temperatura ambiente e que o modelo matemático apresentou erro percentual médio na estimativa das temperaturas de saída dos tubos e do casco de 13% e 5%, respectivamente.

Palavras-chave: trocador de calor; casco e tubos; bancada didática.

ABSTRACT. Heat exchangers are equipment widely used industrially in thermal exchange operations, heating or cooling different types of fluids. Among the different types of heat exchangers, one of the most used is the shell and tubes. Due to its constructive form, it can be compact or large. This article aims to model, simulate and implement a 1-2 shell and tube heat exchanger (one pass in the shell and two passes in the tube), for didactic purposes, using recyclable and low-cost materials, in addition to instrumentation with temperature and flow sensors. For this, an interactive calculation spreadsheet was used, making it possible to predict the thermal behavior of the exchanger based on the geometries of the selected materials. It was observed that the heat exchanger was effective with refrigerated/room temperature water and its mathematical model predicted the outlet temperatures of hot and cold streams with 13% and 5% average error, respectively.

Keywords: heat exchanger; shell and tubes; teaching bench.



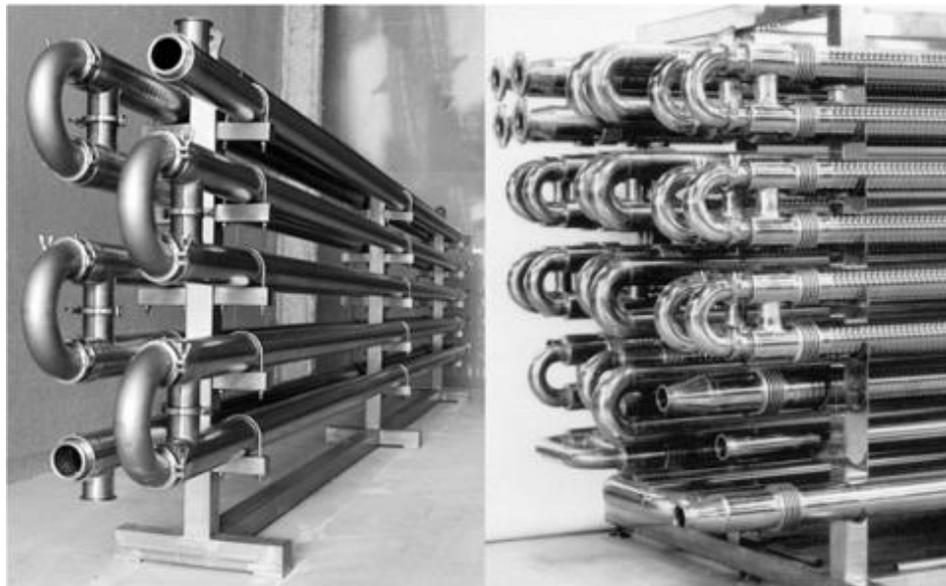
TRABALHO DE GRADUAÇÃO

INTRODUÇÃO

Trocadores de calor

Segundo Incropera e De Witt (2002), um processo de troca térmica ocorre entre dois fluidos que estão a diferentes temperaturas e separados por uma parede sólida. O equipamento utilizado para efetuar esta troca é denominado trocador de calor, e pode ser utilizado no aquecimento e resfriamento de ambientes, bem como na produção de potência, recuperação do calor perdido e processamento químico (INCROPERA; DE WITT, 2002, p. 452). A depender das condições de processo, como temperaturas de operação, tipos de fluidos ou até layout, diferentes equipamentos podem ser empregados, como trocadores do tipo bitubular (Figura 1), casco e tubos (Figura 2), placas (Figura 3), entre outros.

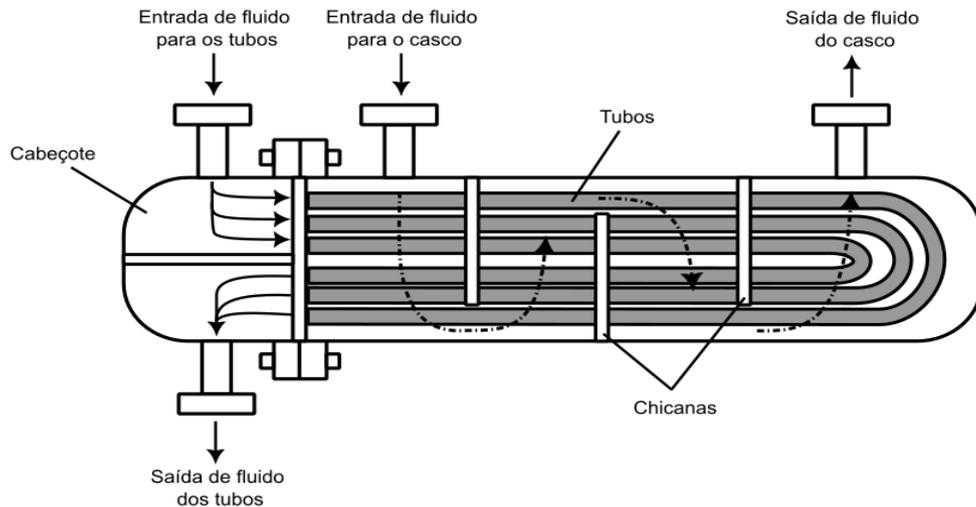
Figura 1 - Trocador de calor bitubular.



Fonte: Gut (2003).

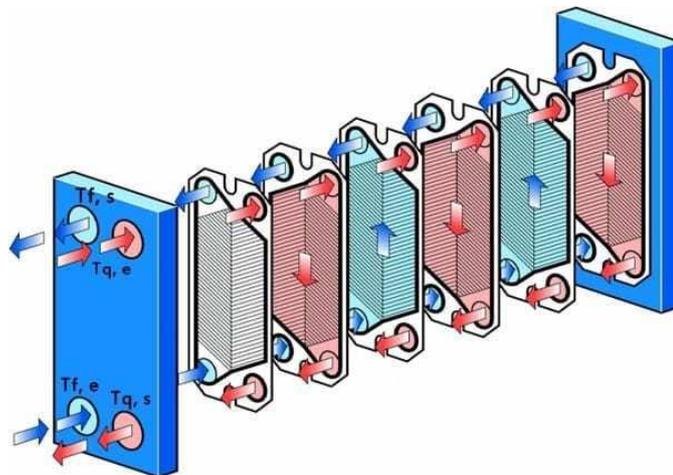
TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 2 - Trocador de calor casco e tubos.



Fonte: próprio autor.

Figura 3 - Trocador de calor de placas.



Fonte: Gut (2003).

O trocador do tipo casco e tubos é um dos trocadores mais utilizados para efetuar a troca térmica em processos químicos, apesar de atualmente competir em algumas situações com trocadores de placas. Alguns motivos para a popularidade deste tipo de trocador são apresentados por Mukherjee (2004), sendo: muito flexíveis em área e podem variar de algumas dezenas de centímetros até mais de mil metros quadrados; são mecanicamente robustos, resistindo aos diversos estresses impostos pela fabricação, transporte e condições de operações atípicas; podem ser facilmente limpos, tanto mecanicamente, como quimicamente; os componentes mais suscetíveis à falhas, como os tubos, podem ser facilmente trocados; projetos mecânicos e térmicos confiáveis estão amplamente disponíveis.

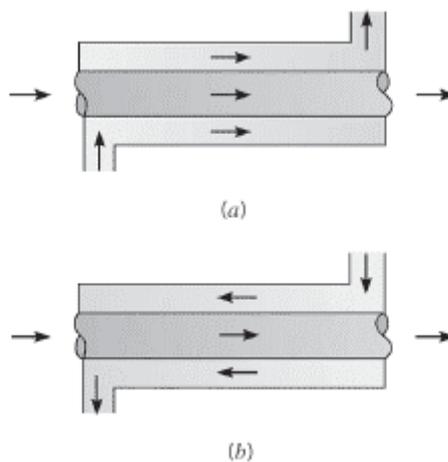


TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Os trocadores de calor casco e tubos possuem classificação a depender de sua construção interna, isto é, pela quantidade de passes nos tubos e no casco. A Figura 4.a mostra um trocador de construção simples, com tubos concêntricos. Este tipo de trocador possibilita escoamento com correntes paralelas, isto é, ambos os fluidos circulam no mesmo sentido, ou pode-se utilizar correntes contrárias, como mostrado na Figura 4.b, onde os fluidos circulam em sentidos opostos.

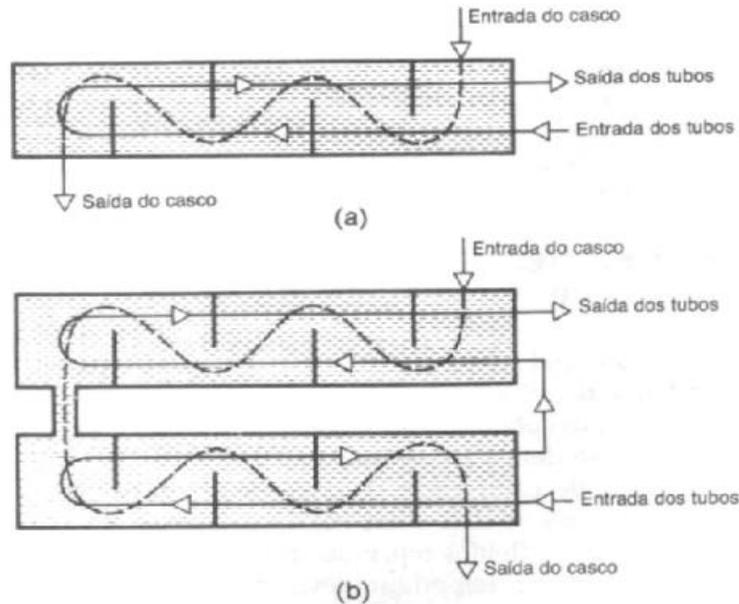
Os trocadores com mais de um passe no casco ou nos tubos são mais complexos, pois o projeto necessita de uma estrutura específica, com a adição de chicanas, conexões no casco, cabeçote com divisão para que o fluido quente não se misture com o fluido frio, etc. A Figura 5.a mostra um trocador de calor com um passe no casco e dois passes no tubo, enquanto a Figura 5.b mostra um trocador de calor com dois passes no casco e quatro passes no tubo.

Figura 4 - Trocadores de calor de tubos concêntricos: (a) arranjo concorrente e (b) arranjo contracorrente.



Fonte: Incropera e De Witt (2002).

Figura 5 - Trocadores de calor casco e tubos.



Fonte: Incropera; De Witt, 2002.

As chicanas, como destacado por Incropera e De Witt (2002), “são frequentemente instaladas para aumentar o coeficiente de convecção do fluido do lado do casco pela indução da turbulência e de um componente de velocidade do escoamento cruzado.”

O tipo de trocador considerado para o trabalho foi o trocador de calor casco e tubos 1-2 (um passe no caso e dois passes no tubo) visto que este é o arranjo mais utilizado na indústria e, por isso, de maior importância do ponto de vista acadêmico.

Equações de projeto para trocadores casco e tubos

O coeficiente global é um dos parâmetros mais importantes no projeto de um trocador de calor. Para um trocador casco e tubos onde existem resistências de transferência de calor por convecção nos tubos, no lado casco e por condução através das paredes dos tubos, o coeficiente global (U_0) é modelado conforme a Equação (1). A Equação (1) também poderia levar em consideração as resistências por incrustação, que tipicamente ocorrem após longos períodos de operação do trocador (INCROPERA; DE WITT, 2002).

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_0} + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2k_w} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i} \quad (1)$$

O coeficiente convectivo no lado do casco pode ser estimado por diversas equações a depender do grau de precisão necessário. Conseqüentemente, a complexidade do modelo também aumenta com a precisão. Um dos modelos mais simples para o escoamento do lado do



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

casco para trocadores casco e tubos é o de Kern (Equação 2). O modelo leva em consideração o número de Reynolds do casco (Equação 3), o número de Prandtl e o coeficiente j_h .

$$h_o = \frac{k}{d_e} j_h \cdot Re \cdot Pr^{1/3} \quad (2)$$

Onde, k é a condutividade térmica da água (em W/mK), considerada constante; d_e é o diâmetro hidráulico do casco, para arranjo triangular (em metros); j_h é o fator da função entre Reynolds e o corte da chicana (tabelado e adimensional); Re é o número de Reynolds (adimensional) (calculado pela Equação 3) e Pr é o número de Prandtl (adimensional).

$$Re = \frac{\rho V_e D_{it}}{\mu} \quad (3)$$

Onde, ρ é a densidade da água (em kg/m³); V_e é a velocidade de escoamento (em m/s); D_{it} é o diâmetro interno do tubo (em mm) e μ é a viscosidade da água (em Pa·s).

O termo adimensional j_h (fator de transferência de calor), por vezes é consultado em gráficos, mas Kuye e Ogboja (1988) propuseram uma correlação em função do número de Reynolds e do corte da chicana (percentual da chicana que permite a passagem do fluido). A expressão é apresentada na Equação (4), onde B_c é o corte da chicana (em fração).

$$j_h = Re^a B_c^b \exp\left(c + dRe + \frac{e}{B_c} + fReB_c\right) \quad (4)$$

Onde, $a = -0,47$; $b = -0,25$; $c = -1,2362$; $d = 8,75 \cdot 10^{-8}$; $e = -1,4349 \cdot 10^{-2}$ e $f = -1,8276 \cdot 10^{-7}$.

O coeficiente convectivo do lado tubo (h_i) pode ser calculado pela Equação (4), para os casos de escoamento laminar, ou pela Equação (5), de Dittus-Boelter, para escoamento turbulento (INCROPERA e DE WITT, 2002).

$$h_i = 1,86 \frac{k}{d} \left(\frac{d}{L} \cdot Re \cdot Pr\right)^{0,33} \quad (5)$$

Onde, k é a condutividade térmica da água (em W/mK), considerada constante e d é o diâmetro interno do tubo (em metros).

Existem duas importantes abordagens para o projeto de trocadores de calor: utilizando a diferença média logarítmica das temperaturas e pelo método ϵ -NUT. O primeiro método normalmente é usado quando se conhece a carga térmica do trocador e, conseqüentemente, as temperaturas de saída dos fluidos podem ser calculadas a priori ou elas já são conhecidas. Quando apenas as temperaturas de entrada e a geometria são conhecidas, o método ϵ -NUT é mais interessante.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Após a definição do coeficiente global (U) e da área de troca térmica, o método ε -NUT necessita do cálculo da razão da capacidade térmica (C_r), conforme Equação (6), e do NUT (número de unidades de transferência), calculado conforme Equação (7).

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (6)$$

$$\text{NUT} = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (7)$$

Onde, U é o coeficiente global (em $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) e A é a área de troca térmica externa do tubo (em m^2).

Sendo, para C_{\min} e C_{\max} , com base na Equação (8), onde C_{\min} é a menor capacidade térmica dentre os dois fluidos passando pelo trocador.

$$C_{\min} \text{ ou } C_{\max} = \dot{m} \cdot c_p \quad (8)$$

Onde, \dot{m} é a vazão mássica do tubo ou casco (em kg/s) e c_p é o calor específico da água (em J/kgK), considerado constante.

Com essas informações, a efetividade do trocador (ε) pode ser calculada. A efetividade é a fração da carga térmica do trocador em relação à máxima troca térmica permitida pela termodinâmica. Para um trocador casco e tubos com dois passes no tubo, a efetividade é calculada pela Equação (9).

$$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \cdot \frac{1 + \exp[-\text{NUT} \cdot (1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-\text{NUT} \cdot (1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1} \quad (9)$$

Por fim, conhecendo-se as temperaturas dos fluidos na entrada e com a efetividade é possível calcular a transferência de calor real do trocador (Equação 10).

$$q = \varepsilon C_{\min} (T_{e,q} - T_{e,f}) \quad (10)$$

Onde, $T_{e,q}$ é a temperatura de entrada do fluido quente ($^{\circ}\text{C}$) e $T_{e,f}$ é a temperatura de entrada do fluido frio ($^{\circ}\text{C}$).

Conhecendo a taxa de transferência real do sistema, é possível calcular quais serão as temperaturas de saída dos fluidos, pelos respectivos balanços de energia. Para cálculo da temperatura de saída do fluido frio, seguiu-se a Equação 11.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

$$T_{s,f} = \left(\frac{q}{\dot{m}_f \cdot c_p} \right) + T_{e,f} \quad (11)$$

E, de maneira semelhante, para cálculo da temperatura de saída do fluido quente, tem-se a Equação 12.

$$T_{s,q} = \left(\frac{q}{\dot{m}_q \cdot c_p} \right) + T_{e,q} \quad (12)$$

Ao final destes cálculos, é possível encontrar as temperaturas de saída, tanto do casco quanto do tubo. Desta forma, será possível avaliar a eficiência do projeto pretendido e prever o comportamento do mesmo, para que sejam feitos ajustes na geometria caso não seja atingido o objetivo desejado no início dos cálculos.

Assim, o objetivo do presente trabalho é a modelagem, simulação e implementação de um trocador casco e tubos 1-2 (um passe no caso e dois passes no tubo) visando aplicações acadêmicas. Os materiais selecionados para o projeto foram principalmente de baixo custo e, onde houvesse aplicação possível, materiais recicláveis.

METODOLOGIA

Materiais

Neste trabalho foram empregados os seguintes materiais e equipamentos na construção do trocador de calor:

- Proveta de polipropileno de 1 litro;
- Tubos de alumínio Ø3/8”;
- Filamento de PLA para impressão 3D;
- Mangueiras de silicone;
- Sensores de fluxo mecânico modelo YF-S201;
- Placa Arduino UNO;
- Sensores de temperatura, modelo DS18B20;
- Brocas diamantadas;
- Microrretífica e furadeira;
- Impressora 3D, modelo Sethi3D AiP A3.

Métodos

O tipo de trocador escolhido para ser construído foi do tipo casco e tubos com dois passes nos tubos, visto que este é um trocador muito empregado nos processos industriais. O desenvolvimento do presente trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

- 1) Revisão da literatura em busca das equações de projeto adequadas;



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

- 2) Implementação das equações de projeto em planilha eletrônica;
- 3) Escolha dos materiais de construção;
- 4) Escolha da instrumentação e calibração;
- 5) Programação do Arduino;
- 6) Integração dos sistemas;
- 7) Validação das equações de projeto com o trocador construído.

Todo o equacionamento foi realizado através de uma planilha interativa de cálculo, com o intuito de prever o comportamento e eficiência da troca térmica gerada a partir dos dados e, neste caso, da geometria previamente definida, utilizando como base o Método de Kern. Este método, em comparação com outros métodos para cálculo da troca térmica, é um dos mais simples e confiáveis. Devido a forma que este projeto será aplicado, sendo utilizado de forma didática como bancada de testes, não é necessário utilizar equações de projeto de alta complexidade.

A planilha foi dividida em uma aba para “entrada de dados” onde são requeridos os dados dimensionais do casco, assim como uma previsão de número de tubos e chicanas. Por ser uma planilha de cálculos interativa, esses dados podem ser alterados a qualquer momento, se a análise final concluir que é necessária alteração de projeto.

Definiu-se também inicialmente que seria utilizada apenas água como fluido, tanto no casco quanto nos tubos, e por esta razão apenas as propriedades físicas da água são consideradas como fluido dentro do sistema.

São solicitados também, na aba de entrada de dados, os dados que deverão ser conhecidos no momento da utilização do equipamento, como as temperaturas de entrada (quente e fria) e as vazões volumétricas.

Adicionalmente, na parte de geometria, são solicitadas as medidas do casco em milímetro, que posteriormente passam por uma conversão para serem utilizados na aba de cálculos. Todos os valores da aba de cálculo estão sendo considerados no sistema SI. A planilha está apresentada no Apêndice A.

Os dados dimensionais dos tubos e do casco foram retirados das próprias peças utilizando paquímetro, enquanto a condutividade térmica do alumínio foi retirada da literatura (INCROPERA; DE WITT, 2002). Os tubos usados foram de alumínio, adquiridos em uma loja de materiais de construção na cidade de Campinas, com diâmetro de $\text{Ø}3/8''$ e com 2 metros de comprimento. O casco foi aproveitado de uma proveta de laboratório de 1 litro.

O cabeçote do trocador foi desenhado no SolidWorks e fabricado por manufatura aditiva. Isso foi necessário em função da especificidade da peça em termos de tamanho e disposição dos tubos. As chicanas, os engates para as mangueiras do casco e as peças de apoio das mangueiras que conectam os tubos também foram fabricados por manufatura aditiva. O material usado foi PLA por questões de limitação da impressora em termos de materiais.

Houve um desafio adicional no projeto do cabeçote, visto que internamente os fluidos não podem se misturar. Portanto, o desafio do projeto foi fabricar um cabeçote com divisão interna entre os fluidos, e oco, isto é, com ausência dos suportes que a impressora 3D constrói para sustentação do material. Desta forma, todas as partes do cabeçote onde a impressora incluiria suporte durante a fabricação foram desenhadas com curvatura, possibilitando a impressão da peça sem a necessidade dos suportes.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Em relação à instrumentação do trocador, foram utilizados dois sensores de fluxo mecânicos do tipo impacto, modelo YF-S201, com capacidade de leitura de 1-30 L/min, onde ambos foram submetidos à calibração para se determinar a correlação entre a quantidade de pulsos gerados com o volume de fluido que escoou pelo sensor. Para isto, a placa Arduino UNO foi empregada, com o objetivo de processar as informações dos sensores, por onde os medidores de fluxo foram programados para coletar e exibir os dados de pulsos e posteriormente realizar definitivamente a leitura da vazão.

O código elaborado contabilizou a quantidade de pulsos que ocorriam em intervalos de tempo de 6 segundos para uma determinada vazão estabelecida de água que escoava através do sensor. Esta vazão era calculada manualmente com o auxílio de provetas graduadas para a medição dos volumes e cronômetro para quantificar o tempo.

Para cada ajuste na válvula da saída de água, cinco alíquotas foram captadas para o cálculo da vazão, desta forma, realizando em quintuplicata para cada vazão e sempre correlacionando com o número de pulsos. Posteriormente foi gerada uma reta de calibração.

Em relação aos sensores de temperatura, modelo DS18B20, a programação exigiu a utilização de duas bibliotecas para a comunicação com os sensores, a “DallasTemperature.h” e a “OneWire.h”, o reconhecimento de cada um dos sensores no código e a atribuição do valor do sinal produzido em cada sensor para uma variável, que é o valor das temperaturas. Estes sensores não precisam de calibração.

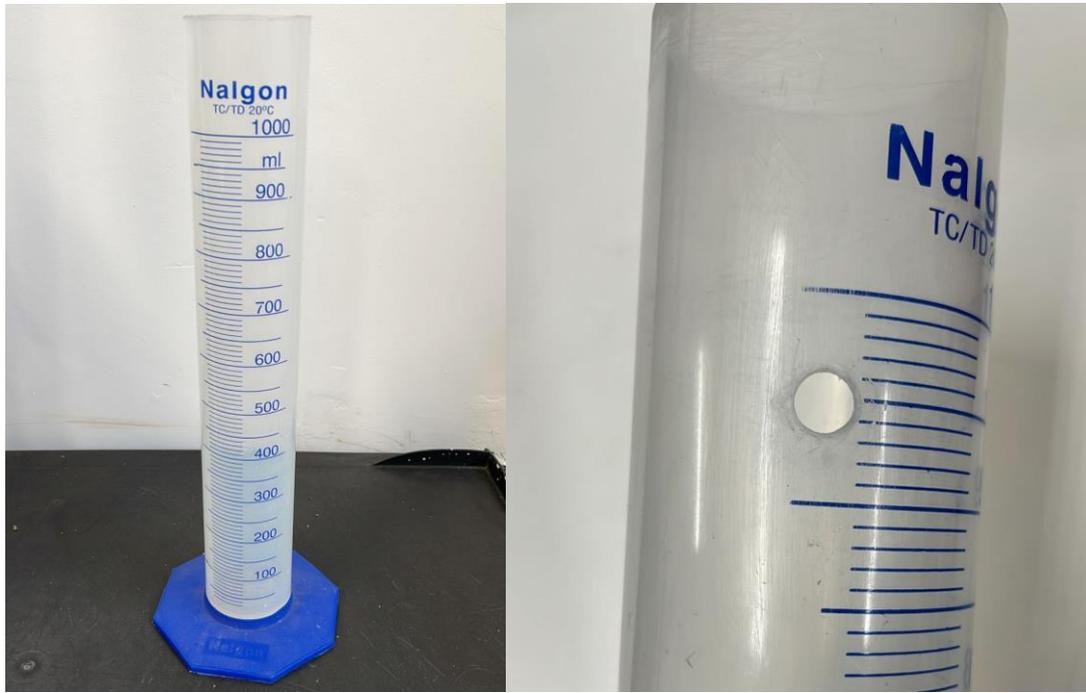
Finalmente, com a construção do trocador, foi possível comparar durante ensaios o desempenho do trocador mediante as equações de projeto. Os ensaios realizados no protótipo consistiram em fixar uma vazão para a passagem de fluido no casco e uma no tubo e avaliar, após se observar que o estado estacionário foi alcançado, as temperaturas em cada um dos sensores e compará-las com a simulação feita na planilha a fim de verificação, para poder checar se esta previsão está próxima dos valores obtidos nos experimentos ou não.

Quatro ensaios foram realizados, dois com fluido frio passando pelo casco e dois com fluido frio passando pelos tubos e em cada um, uma vazão foi estabelecida para a passagem dos fluidos. O fluido quente foi a água oriunda da rede dos laboratórios e o fluido frio água refrigerada em um banho termostático com recirculação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro passo na construção do casco foi a furação, realizada com uma broca de diâmetro 10 mm, conforme a Figura 6. As furações no casco serviram para a entrada e saída de fluido e foram feitas com distância de 850 mm entre centros dos furos. Este espaço foi escolhido para acomodar adequadamente a curva no final dos tubos e o cabeçote no outro lado da proveta.

Figura 6 - Furo de entrada/saída do fluido no casco de polipropileno.



Fonte: Próprio autor.

Com as informações da geometria e propriedades dos materiais, resumidas na Tabela 1, foi possível dimensionar o número total de tubos, sendo cinco em cada passe, e definir o comprimento de corte, de 500 mm, com base no espaço disponível dentro do casco. Posteriormente, foi realizado o projeto e fabricação das chicanas, com corte de 30% e espessura de 4mm, levando em consideração o espaço útil dentro do casco. A Figura 7 mostra o desenho em SolidWorks e o resultado final das chicanas.

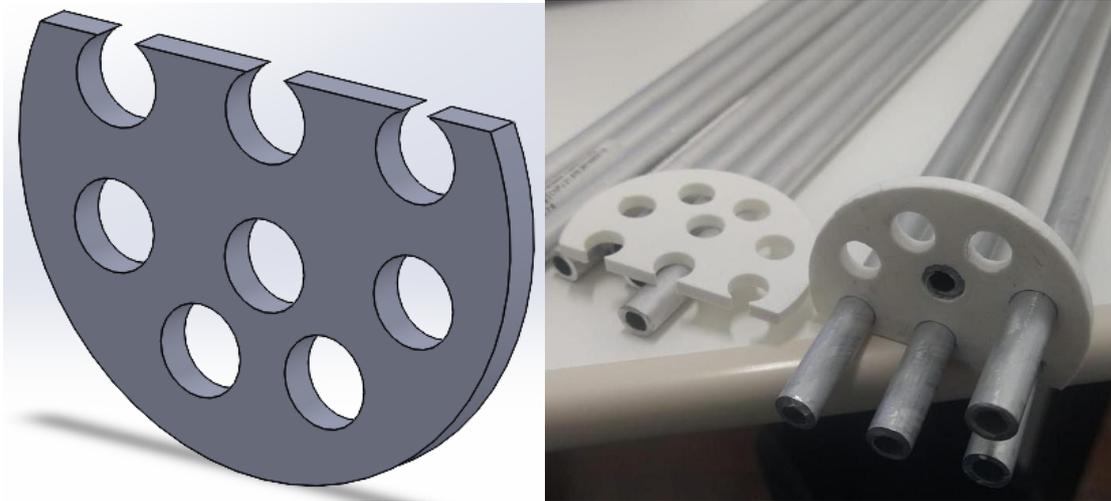
Durante a montagem dos tubos nas chicanas, houve dificuldade em inserir alguns tubos, devido à falta de padronização do diâmetro externo de 3/8". O diâmetro interno do tubo (parede) também não é uniforme, apresentando grande variação. Assim, houve necessidade de adequação dos furos da chicana, e, para tal, foi utilizada lima cilíndrica. Após a adequação das furações, foi possível iniciar de fato a montagem do feixe de tubos.

Tabela 1 – Dados de geometria do trocador de calor e propriedades dos materiais.

Descrição	Valor	Unidade de medida
Diâmetro interno do tubo (médio)	6	mm
Diâmetro externo do tubo (médio)	9	mm
Comprimento do tubo	270	mm
Diâmetro interno do casco	62,2	mm
Diâmetro externo do casco	66,5	mm
Condutividade térmica do alumínio	237	W/mK

Fonte: Próprio autor.

Figura 7 - Chicanas com 4mm de espessura.

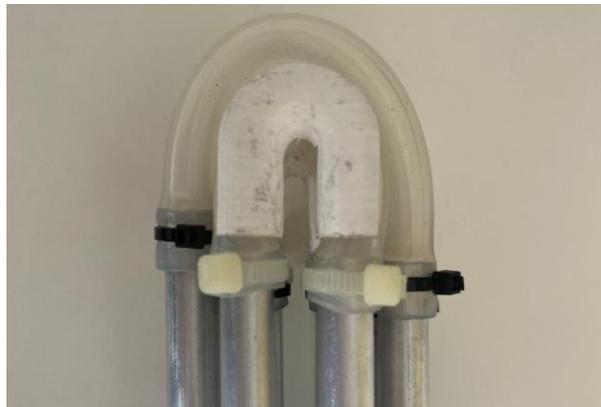


Fonte: Próprio autor.

Após definição da chicana e montagem do feixe de tubos, iniciou-se o projeto da ligação entre os tubos para a passagem do fluido. A ideia inicial foi a utilização do tubo do trocador conformado mecanicamente para se obter um raio de curvatura na extremidade. Porém, após análise desse tipo de conformação, foi visto que para alguns tubos a curvatura não seria suficiente e poderia formar vincos internos e, conseqüentemente, obstrução da passagem do fluido. Desta forma, a alternativa encontrada para suprir a necessidade de um raio de curvatura pequeno foi a utilização de tubos de silicone.

Para manter o raio de curvatura totalmente sem vincos e obstruções, foi projetado um suporte com o raio mínimo de curvatura necessário, e que acompanha o perfil do tubo, conforme ilustrado na Figura 8. O feixe de tubos finalizado está mostrado na Figura 9.

Figura 8 - Curvatura do tubo de silicone.



Fonte: Próprio autor.

Figura 9 - Montagem do feixe de tubos.

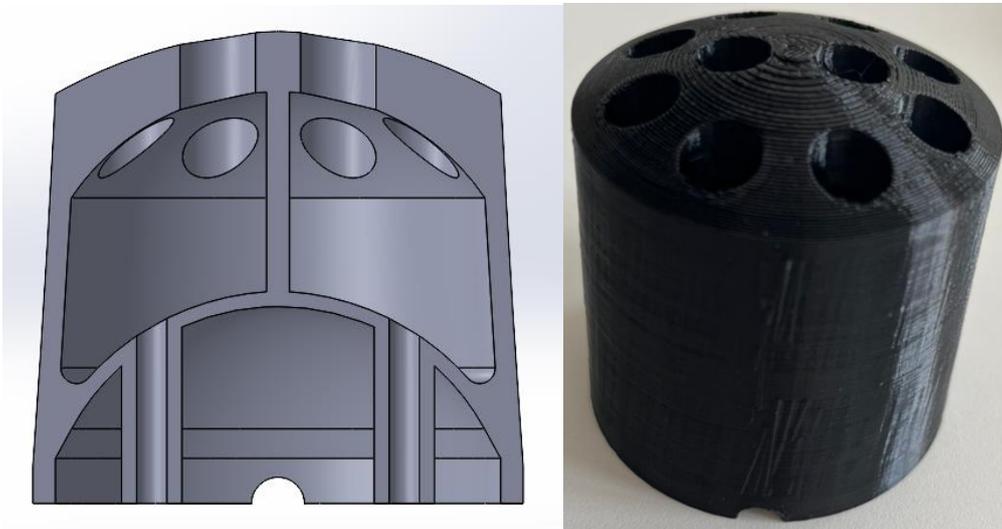


Fonte: Próprio autor.

O cabeçote do trocador também foi fabricado em PLA, através de impressão 3D, conforme Figura 10. Este foi projetado para permitir vedação do fluido interno, garantindo que não houvesse nenhum tipo de vazamento. O preenchimento de material na impressão 3D utilizado para o cabeçote foi de 100%, para que não houvesse pontos de passagem do fluido. Além disso, o design do cabeçote foi pensado para que houvesse pontos de entrada e saída do fluido, e também um suporte para fixação do conjunto.

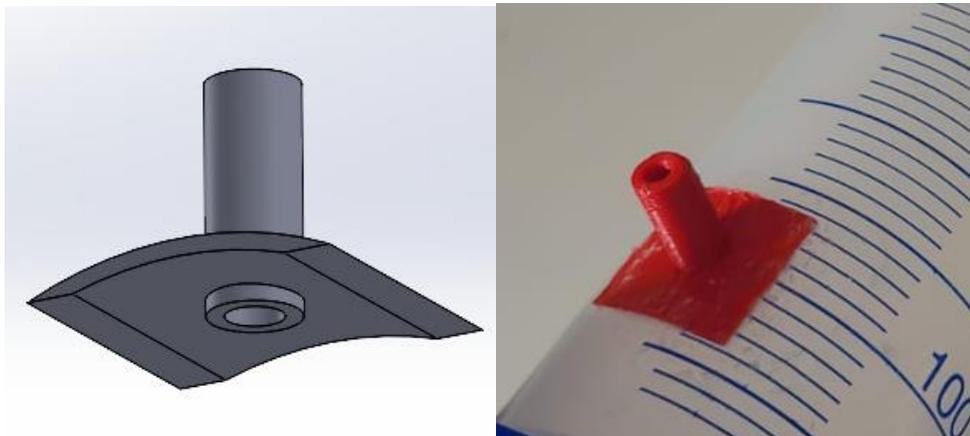
Para entrada e saída do fluido no casco, foram fabricadas também em PLA duas conexões. Essas conexões, conforme Figura 11, foram utilizadas para guiar o fluido para o interior do casco na extremidade de entrada e, posteriormente, direcionar o fluido para a saída na outra extremidade.

Figura 10 - Desenho do cabeçote no SolidWorks e a peça finalizada.



Fonte: Próprio autor.

Figura 11 - Conexão de entrada/saída do fluido no casco.



Fonte: Próprio autor.

Para acoplamento dos sensores de temperatura, foi projetado um conector em PLA. Este conector possui uma entrada e uma saída, juntamente de um furo lateral para encaixar o sensor, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 - Conexão para sensor de temperatura.



Fonte: Próprio autor.

Após impressão das peças em PLA, foram feitos testes para verificar o comportamento da mesma, em contato com o fluido, neste caso a água. Foi verificada a possibilidade de vazamentos e, como prevenção deste problema e também como medida de proteção para as peças, foi utilizada uma camada de uma mistura de poliestireno e cola de cianoacrilato. Esta mistura proporcionou a criação de uma camada protetora nas peças e serviu também como vedação para os tubos inseridos no cabeçote. A mistura foi utilizada também para fixação dos sensores de temperatura nas conexões e vedação das mesmas, além da vedação das conexões de entrada e saída de fluido no casco.

Para a montagem do trocador, foi utilizada placa de madeira reaproveitada do laboratório da Universidade São Francisco, além de suportes com garras para que o trocador se mantivesse suspenso e na posição horizontal, conforme Figura 13.

Figura 13 - Trocador de calor montado na base de madeira.



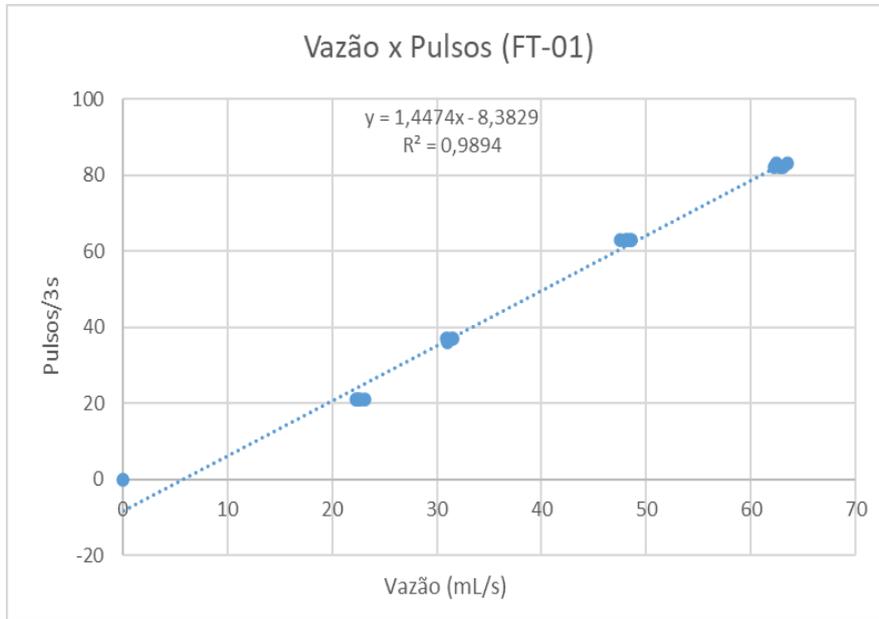
Fonte: Próprio autor.

Quanto à calibração, os medidores de vazão apresentaram uma boa linearidade a partir dos dados coletados, indicando assim confiabilidade para sua utilização na leitura dos fluidos do trocador, conforme mostram as Figuras 14 e 15 a seguir. Ambos apresentaram R^2 maior do que 0,98 para a reta de calibração. O sensor FT-01 foi conectado à corrente de fluido quente e o sensor FT-02, à corrente de fluido frio.



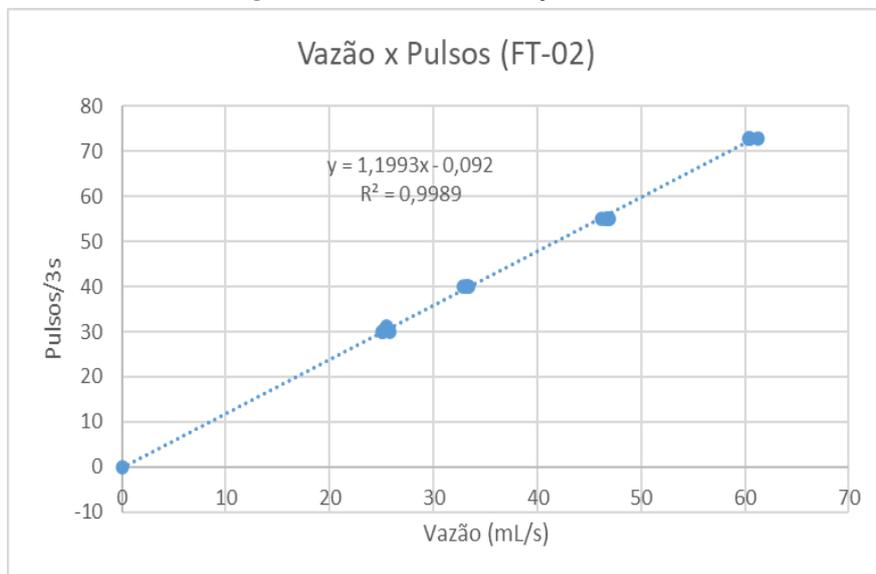
TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 14 - Curva de calibração sensor FT-01.



Fonte: Próprio autor.

Figura 15 - Curva de calibração do sensor FT-02.



Fonte: Próprio autor.

A programação final usada para aquisição dos dados dos sensores está apresentada no Apêndice B. Os resultados obtidos dos ensaios estão apresentados nas Tabelas 2 e 3. Na Tabela 2 é possível ver que o maior erro percentual foi de 14,1% e o menor, 2,9%, em relação às equações que modelam o comportamento térmico do trocador. De maneira sistemática, observa-se que a divergência em relação aos dados experimentais é maior no lado dos tubos.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Atribui-se essa divergência à falta de conformidade dos tubos, que podem gerar velocidades distintas ao longo do escoamento; a uma possível má distribuição dos fluidos entre os tubos a partir do cabeçote e até eventuais vazamentos dentro do cabeçote que podem gerar mistura do fluido de entrada com o fluido de saída. Como o cabeçote é feito de polímero e ele é poroso, apesar de não ter sido observado vazamento externo, pode haver vazamento interno não detectável diretamente e essa divergência pode ser um indicativo.

Os erros associados à estimativa da temperatura de saída do casco podem ser resultado de troca de calor com o ambiente, visto que o trocador não é isolado; vazamentos nos espaços entre a chicana e o casco e erros na modelagem do trocador, visto que a disposição dos tubos não é perfeitamente triangular e o espaçamento entre chicanas, após a fixação, não ficou uniforme.

Além disso, pode haver contribuições também de incertezas dos instrumentos, tanto de temperatura, como de vazão.

Pela Tabela 3 observa-se que o valor do coeficiente global médio foi de 232,9 W/m²K. Valores típicos de coeficientes globais para trocadores do tipo casco e tubos industriais onde ambos os fluidos são água variam entre 800-1.500 W/m²K (SINNOTT, 2005).

Tabela 2 – Dados obtidos nos ensaios com o trocador de calor.

	Vazão tubos (L/min)	Vazão casco (L/min)	T _e tubos (°C)	T _e casco (°C)	T _s tubos medida (°C)	T _s casco medida (°C)	T _s tubos simulada (°C)	T _s casco simulada (°C)	Erro T _s tubos (%)	Erro T _s casco (%)
Experimento 1 - Fluido frio nos tubos	0,36	2,46	11,9	25,8	17,3	23,8	19,3	24,7	11,3	3,9
Experimento 2 - Fluido frio nos tubos	0,35	1,67	11,5	25,6	16,4	22,3	18,6	24,1	13,3	8,2
Experimento 3 - Fluido frio no casco	1,17	0,59	25,5	12,5	20,6	16,0	23,5	16,5	14,1	2,9
Experimento 4 - Fluido frio no casco	1,70	0,51	25,7	11,0	21,4	15,4	24,2	16,1	12,9	4,7

Fonte: Próprio autor.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Tabela 3 – Valores calculados para o coeficiente global, efetividade, coeficientes convectivos e carga térmica a partir do modelo matemático.

	Coeficiente global U ($Wm^{-2}K^{-1}$)	Efetividade	Taxa de transferência de calor q (W)	Coeficiente convectivo h_c ($Wm^{-2}K^{-1}$)	Coeficiente convectivo h_t ($Wm^{-2}K^{-1}$)
Experimento 1 - Fluido frio nos tubos	262,7	0,53	184,2	705,0	630,3
Experimento 2 - Fluido frio nos tubos	240,9	0,50	172,1	574,2	624,5
Experimento 3 - Fluido frio no casco	215,3	0,30	162,1	330,8	929,9
Experimento 4 - Fluido frio no casco	212,8	0,35	180,7	306,2	1.052,0

Fonte: Próprio autor.

Foi identificado que as maiores resistências à transferência de calor devem-se às convecções no lado do casco e no tubo. Para aumentar o desempenho, uma das medidas poderia ser o aumento do número de chicanas, que aumentaria a velocidade do escoamento no casco, aumentando a turbulência e conseqüentemente, aumentando a taxa de transferência de calor. Por exemplo, no caso do experimento 4, com temperatura mais baixa e menor vazão (pior cenário para o coeficiente convectivo no lado do casco) o aumento do número de chicanas de 4 para 8 (valor recomendado para atender o espaçamento ótimo entre chicanas de 0,5 vezes o diâmetro do casco, indicada para trocadores industriais) (SINNOTT, 2005) o coeficiente global aumentaria para 269,2 W/m^2K (aumento de 26,5%).

Outra forma de melhorar o desempenho seria a troca dos tubos. Por exemplo, se o número de tubos fosse reduzido para 8 mantendo-se a área de troca térmica (diâmetro externo seria de 11,2 mm ao invés de 9 mm), a velocidade dentro dos tubos aumentaria, favorecendo o coeficiente convectivo dentro dos tubos. No cenário do experimento 1, cenário mais desfavorável à convecção dentro dos tubos, isso aumentaria o coeficiente convectivo para 1.833,3 W/m^2K e o coeficiente global para 283,9 W/m^2K .

Finalmente, o custo estimado do trocador ficou em torno de R\$352,61. Ele contempla o valor da proveta de plástico (R\$45,00); 4 sensores de temperatura (R\$31,2); 2 sensores de vazão (R\$70,00); 3 tubos de alumínio de 2 metros de comprimento (R\$74,70); 2 metros de mangueira de silicone (R\$60,00); uma placa Arduino Uno (R\$50,00) e 217,1 g de PLA para impressão do cabeçote, 4 chicanas, 4 conectores dos sensores de temperatura, 2 suportes para as mangueiras de silicone dos tubos e 2 conectores do casco (R\$21,71). Comparado com trocadores didáticos feitos de materiais mais tradicionais (acrílico e cobre, por exemplo) o custo deste trocador é muito mais acessível, no entanto, ressalta-se que este trocador possui limitações em termos de temperaturas, pressões e fluidos de operação, o que pode restringir seu uso, a princípio, à água sob baixas temperaturas até temperaturas próximas da ambiente.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

CONCLUSÕES

O trabalho apresentado teve por objetivo a modelagem, simulação e implementação de um trocador casco e tubos 1-2 tendo em vista aplicações acadêmicas, construído com materiais reciclados e peças de baixo custo, contando ainda com a fabricação de peças por impressão 3D como facilidade para a construção.

O modelo foi validado com um erro médio de 13% na estimativa de temperatura de saída dos tubos e 5% na temperatura de saída do casco. Embora tenham sido verificados os erros citados, o projeto está atendendo a expectativa inicial proposta, visto que o objetivo é a utilização para atividades acadêmicas, que visam o ensino do projeto de trocadores de calor casco e tubos, e o custo da construção mostrou-se acessível para este fim.

Por fim, foram visualizadas oportunidades de melhorias de alguns pontos na geometria que podem vir a aumentar o desempenho do trocador de calor, pensando em trabalhos de continuidade ao projeto. A nível de melhorias: poderá ser acrescentado um respiro na parte superior do casco, a fim de retirar o ar que fica retido, influenciando na efetividade de troca térmica do lado do casco; oportunidade de acréscimo de chicanas, aumentando a velocidade do escoamento no casco, conseqüentemente aumentando a taxa de transferência de calor; alteração dos tubos, tanto em quantidade quanto em diâmetro, aumentando a velocidade dentro dos tubos e conseqüentemente favorecendo o aumento do coeficiente convectivo.

REFERÊNCIAS

BALBINOT, A. **Instrumentação e fundamentos de medidas - Vol. 2**. Grupo GEN, São Paulo, 2019. E-book. ISBN 9788521635888. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521635888/>. Acesso em: 12 set. 2023.

GUT, J. A. W. Configurações ótimas para trocadores de calor a placas. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – USP, São Paulo. 2003.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa, 5ª edição**, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J. 2003.

KUYE, A.; OGBOJA, O. **Mathematical correlations for some shell and tube heat exchanger design parameters**. London: University of Cambridge, 1988.

MUKHERJEE, R. **Practical thermal design of shell-and-tube heat exchangers**. Nova Iorque: Begell House, 2004.

SINNOT, R.K. **Chemical engineering design**. 4ª ed., vol. 6, Elsevier, 2005.

APÊNDICE A

A Figura 23 mostra a aba de entrada de dados da planilha. Esta solicita os dados que deverão ser conhecidos e/ou determinados no início do projeto e deverão ser preenchidos nos espaços destacados em azul. Além disso, a planilha converte os dados inseridos para o sistema SI, que serão utilizados na aba de cálculos.

Figura 23 - Aba de entrada de dados da planilha.

Informações de entrada para os cálculos do trocador casco e tubos 1-2				
<i>Descrição</i>	<i>Input de dados</i>	<i>Unidade de medida</i>	<i>Conversão para SI</i>	<i>Unidade de medida SI</i>
<i>Øinterno_tubo</i>	6	mm	0,006	m
<i>Øexterno_tubo</i>	9	mm	0,009	m
<i>Comprimento</i>	270	mm	0,27	m
<i>Øinterno_casco</i>	63,2	mm	0,0632	m
<i>Øexterno_casco</i>	68,2	mm	0,0682	m
<i>Número de tubos</i>	10	tubos		
<i>Número de chicanas</i>	4	chicanas		
<i>Corte da chicana</i>	0,25	Porcentagem		
<i>Densidade água</i>	997	kg/m ³		
<i>Viscosidade água</i>	8,90E-04	Pa·s		
<i>Calor específico água</i>	4,18E+03	J/kgK		
<i>Cond. térmica água</i>	6,08E-01	W/mK		
<i>Cond. térmica alumínio</i>	237	W/mK		
<i>Pitch</i>	14,1	mm	0,0141	m
<i>Vazão volumétrica tubo</i>	2,48	l/min	4,13E-05	m ³ /s
<i>Vazão volumétrica casco</i>	2,48	l/min	4,13E-05	m ³ /s
<i>Temperatura de entrada tubo</i>	20	°C		
<i>Temperatura de entrada casco</i>	10	°C		
Cálculo complementar				
<i>Vazão mássica tubo</i>	NA	NA	4,12E-02	kg/s
<i>Vazão mássica casco</i>	NA	NA	4,12E-02	kg/s

Fonte: Próprio autor.

As Figuras 24 e 25 mostram a aba de cálculos e resultados, onde foram aplicados os conceitos e equações mencionados anteriormente. A própria planilha realiza as considerações de equação conforme necessário, por exemplo: cálculo do coeficiente convectivo, a depender do número de Reynolds (laminar ou turbulento) e identificação do fluido frio e quente, de acordo com as informações fornecidas na aba entrada de dados. O resultado final aponta qual



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

temperatura será a encontrada com base nos dados fornecidos. A planilha de cálculos sempre fará o balanço de energia desprezando as perdas decorrentes do processo real.

Figura 24 - Aba de cálculos e resultados da planilha.

<i>Descrição</i>	<i>Resultado</i>	<i>Unidade de medida</i>
Área de troca térmica externa do tubo (A)	7,63E-02	m ²
Coeficiente convectivo (lado do tubo)		
Área de escoamento	1,41E-04	m ²
Velocidade de escoamento	0,29	m/s
Reynolds	1.965,14	Laminar
Prandtl	6,12	Adimensional
Coeficiente convectivo nos tubos para escoamento laminar		
h_laminar	1.191,58	W/m ² K
Coeficiente convectivo nos tubos para escoamento turbulento		
h_turbulento	1.827,24	W/m ² K
Coeficiente convectivo final (ht)		
ht	1.191,58	W/m ² K
Coeficiente convectivo (lado do casco)		
Espaçamento entre chicanas	0,0675	m
Área de escoamento cruzado	0,001543021277	m ²
Vazão mássica	4,12E-02	kg/s
Velocidade mássica	2,67E+01	kg/m ² s
Velocidade linear	2,68E-02	m/s
Diâmetro hidráulico do casco		
Arranjo triangular	0,0152207	m
Reynolds (casco)		
	456,74	Adimensional
Fator (jh)		
	0,02181110099	Adimensional
Coeficiente convectivo (hc)		
	727,84	W/m ² K

Fonte: Próprio autor.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 25 - Aba de cálculos e resultados da planilha.

Coeficiente global (U)	378,7221611	W/m ² K
Capacidade térmica (Cr)		
Capacidade térmica mínima (Cmin)	1,72E+02	W/K
Capacidade térmica máxima (Cmax)	1,72E+02	W/K
Razão da capacidade térmica (Cr)	1,00E+00	Adimensional
Número de unidades de transferência (NUT)	1,68E-01	Adimensional
Efetividade do trocador	0,1431460453	Adimensional
Definição das temperaturas de entrada - quente e fria		
Temperatura de entrada quente	20	°C
Temperatura de entrada fria	10	°C
Fluido quente	TUBO	
Fluido frio	CASCO	
Transferência de calor real (q)	2,47E+02	W
Temperatura de saída fluido frio	11,43	°C
Temperatura de saída fluido quente	18,57	°C
Temperatura de saída tubo	18,57	°C
Temperatura de saída casco	11,43	°C

Fonte: Próprio autor.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

APÊNDICE B

Código desenvolvido para a programação do Arduino para a leitura e obtenção dos dados de todos os sensores utilizados.

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define SensorPin 4

OneWire oneWire(SensorPin);
DallasTemperature DS18B20(&oneWire);

DeviceAddress SENSOR1, SENSOR2, SENSOR3, SENSOR4;

int contaPulso1;
int contaPulso2;
float flow1;
float flow2;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  DS18B20.begin();
  Serial.println("Inicializando...");
  // Obtenha os endereços dos quatro sensores
  DS18B20.getAddress(SENSOR1, 0);
  DS18B20.getAddress(SENSOR2, 1);
  DS18B20.getAddress(SENSOR3, 2);
  DS18B20.getAddress(SENSOR4, 3);

  pinMode(2, INPUT); // Entrada digital do sensor FT-01
  pinMode(3, INPUT); // Entrada digital do sensor FT-02
  attachInterrupt(0, incpulso1, RISING); // Interrupção Sensor FT-01
  attachInterrupt(1, incpulso2, RISING); // Interrupção Sensor FT-02
}

unsigned long antes = 0;
bool lerFT01 = true;

void loop() {
  unsigned long depois = millis();

  // Durante os primeiros 3000 ms o arduino faz a leitura do FT-01
  // depois ele troca para a leitura do FT-02 pelos próximos 1500 ms
  if (depois - antes > 3000) {
```



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

```
lerFT01 = false; // Ler o FT-02
} else {
lerFT01 = true; // Ler o FT-01
}

// Esse bloco condicional chaveia entre a leitura do sensor FT-01 e FT-02
if (lerFT01) {
attachInterrupt(0, incpulso1, RISING); // Liga a interrupção Sensor
FT-01
detachInterrupt(1); // Desliga a interrupção Sensor FT-02
} else {
attachInterrupt(1, incpulso2, RISING); // Liga a interrupção Sensor FT-02
detachInterrupt(0); // Desliga a interrupção Sensor FT-01
}

if (depois - antes > 6000) { //Contagem dos 6 segundos para a leitura dos
dados dos sensores de fluxo.
antes = depois;

if (contaPulso1 > 0) { //Condicional para a leitura do sensor FT-01
Serial.print("Vazão no sensor FT-01 (mL/s): ");
flow1 = ((contaPulso1 / 1.4474) + 8.3829);
Serial.println(flow1);
Serial.print("pulsos*6s FT-01: ");
Serial.println(contaPulso1);
} else {
Serial.println("Sem vazão no sensor FT-01");
}
contaPulso1 = 0;

if (contaPulso2 > 0) { //Condicional para a leitura do sensor FT-02
Serial.print("Vazão no sensor FT-02 (mL/s): ");
flow2 = ((contaPulso2 / 1.1993) + 0.092);
Serial.println(flow2);
Serial.print("pulsos*1,5s FT-02: ");
Serial.println(contaPulso2);
} else {
Serial.println("Sem vazão no sensor FT-02");
}
contaPulso2 = 0;

// Leitura das temperaturas
float temperatura1;
float temperatura2;
float temperatura3;
```



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

```
float temperatura4;
DS18B20.requestTemperatures();
temperatura1 = DS18B20.getTempC(SENSOR1);
temperatura2 = DS18B20.getTempC(SENSOR2);
temperatura3 = DS18B20.getTempC(SENSOR3);
temperatura4 = DS18B20.getTempC(SENSOR4);

Serial.print("Sensor 1: ");
Serial.print(temperatura1);
Serial.println(" °C");

Serial.print("Sensor 2: ");
Serial.print(temperatura2);
Serial.println(" °C");

Serial.print("Sensor 3: ");
Serial.print(temperatura3);
Serial.println(" °C");

Serial.print("Sensor 4: ");
Serial.print(temperatura4);
Serial.println(" °C");
}
}

void incpulso1() {
  contaPulso1++;
}

void incpulso2() {
  contaPulso2++;
}
```