



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho

MURILO ANDRADE SANTOS

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA DE TROCADOR DE
CALOR DE CASCO E TUBOS**

CABO DE SANTO AGOSTINHO - PERNAMBUCO
2019

MURILO ANDRADE SANTOS

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA DE TROCADOR DE
CALOR DE CASCO E TUBOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), como parte das exigências para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. M.Sc. Alisson Cocci de Souza

CABO DE SANTO AGOSTINHO - PERNAMBUCO

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S237s Santos, Murilo Andrade
Sistema de aquisição de dados de temperatura de trocador de calor de casco e tubos / Murilo Andrade Santos. - 2019.
46 f. : il.
- Orientador: Alisson Cocci de Souza.
Inclui referências, apêndice(s) e anexo(s).
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Cabo de Santo Agostinho, 2020.
1. Leitura de temperatura . 2. Fluxo paralelo. 3. Vazão. 4. Trocador de calor. I. Souza, Alisson Cocci de, orient. II. Título

CDD 620.1

MURILO ANDRADE SANTOS

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA DE TROCADOR DE
CALOR DE CASCO E TUBOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), como parte das exigências para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. M.Sc. Alisson Cocci de Souza

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. M.Sc. Alisson Cocci de Souza (Orientador)

UACSA/UFRPE

Prof. M.Sc. Humberto da Silva Santos (Examinador)

ETEPAM

Prof. M.Sc. Ronelly José de Souza (Examinador)

UACSA/UFRPE

AGRADECIMENTOS

Primeiro, agradeço a Deus por possibilitar que eu tenha saúde e força para realizar todos os projetos que surgem em minha vida.

Aos meus pais, Abisai Andrade e Pedrina Carvalho, que em todos os momentos da minha vida se fizeram presentes, me apoiando e encorajando em todos os meus projetos e pela formação ética e moral que me deram e que continuam me dando. Obrigado por tudo.

Ao meu irmão, Abisai Júnior, que sempre me apoiou e continua me apoiando em meus objetivos. Obrigado por tudo.

Aos meus tios, José Andrade e Rejane Maria, juntamente com minha prima, Áquila Priscila, que me ajudaram abrindo as portas de casa e de seus corações, me ajudando a estudar e conquistar os meus sonhos. Obrigado por tudo o que fizeram por mim.

À minha noiva, Camila Ramos, pela compreensão, companheirismo, sempre me incentivando a buscar meus sonhos e sempre dando uma palavra de incentivo. Obrigado por sempre estar comigo.

Aos meus colegas de sala, que tornaram a minha formação mais divertida e contribuíram com os meus estudos.

Ao meu orientador, Prof. MSc. Alisson Cocci de Souza, pelo apoio e incentivo na realização deste projeto.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, Campus UACSA, e a todos os professores que me auxiliaram na minha graduação.

RESUMO

Este projeto tem como objetivo a elaboração de um sistema de leitura de temperatura em um trocador de calor de casco e tubo, que permita avaliar a eficiência térmica do sistema com base no fluxo paralelo. No projeto foi utilizado apenas o fluxo paralelo devido à disposição do trocador de calor na bancada que foi elaborada, para evitar danos ao mesmo e para possibilitar uma montagem na bancada de forma que seja apenas necessário o fornecimento os fluidos de trabalho. Para realizar a análise de eficiência térmica, levam-se em conta as diferenças de leitura de temperaturas do fluido quente, do fluido frio e dos fluidos que saem do trocador de calor, tanto no fluxo do fluido quente quanto no fluxo do fluido frio. As temperaturas dos fluidos nas saídas também são verificadas com base na variação de fluxo do fluido frio na entrada do trocador de calor. O fluido escolhido para a realização do estudo foi a água. As medições de vazão dos fluidos, para ambos os testes foram feitas utilizando o arduino para leitura dos dados e de maneira semelhante foram feitas leituras de temperaturas dos fluidos utilizando um sensor que faz a leitura utilizando arduino e dois sensores que dispensam a utilização do arduino, devido ao fato de possuir visor próprio. Foram feitos cinco ensaios variando a vazão do fluido frio e os resultados obtidos foram satisfatórios, pois além de comprovar que uma mudança de vazão ocasiona diferença de temperaturas de saídas, conforme o esperado, tanto para o fluido quente quanto para o fluido frio, o sistema montado irá facilitar o entendimento de troca térmica para futuros discentes da instituição.

Palavras chave: *Leitura de temperatura. Fluxo paralelo. Vazão. Trocador de calor.*

ABSTRACT

This project aims to develop a temperature reading system in a shell and tube heat exchanger, which allows to evaluate the thermal efficiency of the system based on parallel flow. In the design, only parallel flow was used due to the arrangement of the heat exchanger on the workbench that was designed to prevent damage to it and to allow mounting on the workbench so that only the working fluids were needed. To perform the thermal efficiency analysis, differences in temperature readings of hot fluid, cold fluid and fluids leaving the heat exchanger are taken into account in both the hot fluid flow and the cold fluid flow. Exit fluid temperatures are also checked based on the variation of cold fluid flow at the heat exchanger inlet. The fluid chosen for the study was water. Fluid flow measurements for both tests were made using the arduino for data reading and similarly fluid temperature readings were made using a sensor that reads the arduino and two sensors that do not use the arduino, due to the fact that it has its own display. Five tests were performed varying the flow of cold fluid and the results obtained were satisfactory, as it proves that a change of flow causes differences in outlet temperatures, as expected, for both hot and cold fluid, the system assembled will facilitate the understanding of heat exchange for future students of the institution.

Keywords: *Temperature reading. Parallel flow. Flow rate. Heat exchanger.*

Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	8
2.1. OBJETIVO GERAL	8
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3. REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1.1. CONDUÇÃO	9
3.1.2. CONVECÇÃO	10
3.1.3. RADIAÇÃO TÉRMICA	11
3.2. ESCOAMENTO DE UM FLUIDO	11
3.2.1. REGIME PERMANENTE	12
3.2.2. REGIME NÃO PERMANENTE	12
3.3. VOLUME DE CONTROLE	13
3.4. TROCADORES DE CALOR	14
3.4.1. TROCADOR DE CALOR TUBO DUPLO	14
3.4.2. TROCADOR DE CALOR COMPACTO	17
3.4.3. TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO	19
3.5. COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	21
3.6. MÉTODO LMTD	21
3.7. MÉTODO DA EFETIVIDADE - NUT	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1. BANCADA DIDÁTICA	29
4.1. ARDUÍNO	31
4.1. SENSORES DE TEMPERATURA	32
4.2. SENSORES DE VAZÃO	34
4.3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1. ENSAIOS	37
6. CONCLUSÕES	40
7. POSSÍVEIS MELHORIAS E SUGESTÕES	41
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
APÊNDICE A – Como utilizar o trocador de calor	44
ANEXO A – Relação da efetividade com o NTU	46
ANEXO B – Valores de propriedades da água saturada	47

1. INTRODUÇÃO

Com a modernização dos produtos fabricados pelas indústrias, nos mais diversos setores, aumentaram-se as medidas tomadas para aperfeiçoar a produção através de um custo reduzido. Os trocadores de calor, que são dispositivos onde dois fluidos em movimento trocam calor evitando se misturarem (BOLES; ÇENGEL, 2013), são alvos de estudos para redução de gastos nos processos industriais.

Os trocadores de calor são utilizados para diversos setores, como: indústria petroquímica, na geração de potência em usinas sucroalcooleiras, para realizar o aquecimento e a refrigeração de ar nas indústrias alimentícias (VIANA, 2014).

Os trocadores de calor tipo casco e tubos possuem como componentes principais: cabeçote de entrada, cabeçote de retorno, casco e feixe de tubos (BALBUENO, 2006). O cabeçote de entrada se conecta ao feixe de tubos, servindo para admissão e/ou descarga do fluido que está nos tubos (BALBUENO, 2006).

2. OBJETIVOS

Devido à grande importância dos trocadores de calor na indústria, o presente projeto tem como objetivo realizar a leitura de retorno das temperaturas de um trocador de calor de casco e tubos quando a vazão da temperatura do fluido frio é variada, para observar em qual situação tende a obter um melhor aproveitamento energético do trocador de calor.

2.1. OBJETIVO GERAL

Aplicar sistema de leitura de temperatura em um trocador de calor de casco e tubo em escala laboratorial para fins didáticos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- *Medir e variação da temperatura dos fluidos quente e frio, através da variação de vazão do fluido frio, utilizando o arduíno;*
- *Analisar os processos de transferência de calor no equipamento através das temperaturas de entrada e saída dos fluidos;*
- *Realizar a análise térmica do trocador de calor funcionando em escoamento paralelo.*

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A termodinâmica pode ser relacionada como sendo uma ciência que analisa a energia, onde inclui todos os aspectos de energia e transformação de energia, podendo incluir refrigeração e as relações que ocorrem entre as propriedades da matéria (BOLES; ÇENGEL, 2013).

A transferência de calor, que envolve a transferência de energia que é analisada pela termodinâmica, é quando a energia térmica se movimenta devido a uma diferença de temperaturas no espaço (INCROPERA; et al., 2008). Os tipos de transferência de calor são: condução, convecção e radiação térmica.

3.1.1. CONDUÇÃO

O tipo de transferência de calor por condução ocorre quando existe uma interação entre partículas que são geralmente de uma mesma substância, sendo transferida a energia da que possui mais energia para a que possui menos energia, podendo ocorrer entre sólidos, líquidos e gases (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

A taxa com que ocorre a condução de calor em uma camada plana mantém uma proporcionalidade com a diferença de temperatura através da camada e da área onde ocorre a transferência de calor, apresentando uma relação inversa proporcional com a espessura da camada, conforme a equação 1 (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde,

$\dot{Q}$ = Taxa de condução de calor

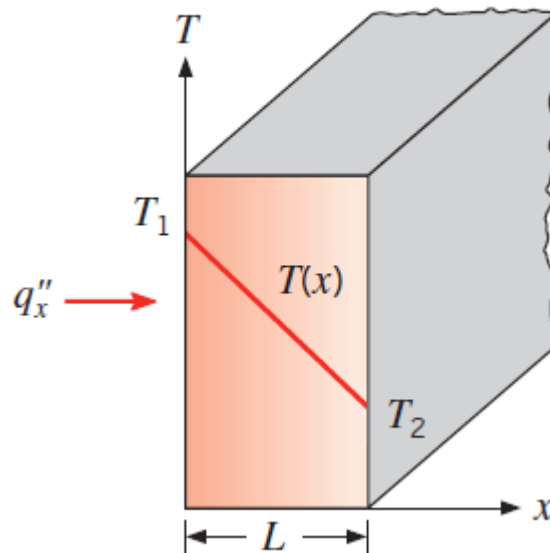
k = Condutividade térmica

A = Área

$\frac{dT}{dx}$ = Gradiente de temperatura

A Figura 1 demonstra uma situação de condução, onde a espessura da parede plana é L .

Figura 1 - Condução de calor através de uma parede plana.



Fonte: Incropera et al. (2008).

3.1.2. CONVECÇÃO

A transferência de calor por convecção ocorre entre uma superfície sólida, uma líquida, uma gasosa e também entre uma interface líquido-gás, que por estar se movimentando envolve os efeitos de condução e movimentação de fluido. É necessário que ocorra o movimento da parte fluida para haver convecção, pois do contrário o que ocorre é condução, sendo representada pela equação 2 (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

$$\dot{Q}_{con} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

Onde,

h = Coeficiente de transferência de calor por convecção [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

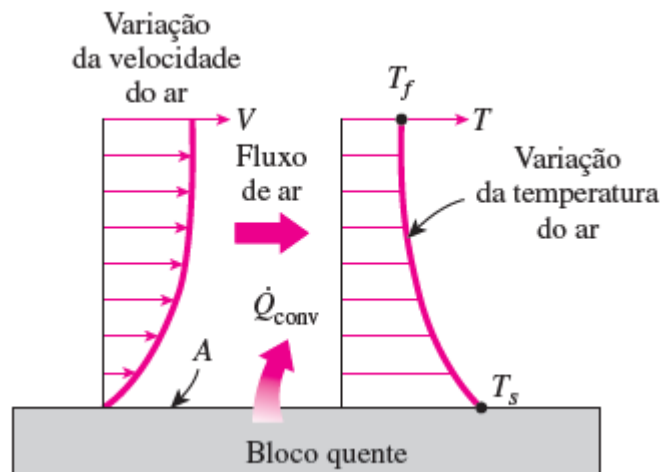
A_s = Área de transferência de calor [m^2]

T_s = Temperatura da superfície [$^\circ C$]

T_{∞} = Temperatura do fluido distante [$^\circ C$]

A Figura 2 demonstra um modelo de resfriamento de um bloco quente por ar frio.

Figura 2 - Transferência de calor por convecção.



Fonte: Boles e Çengel (2013).

3.1.3. RADIAÇÃO TÉRMICA

É a forma de transferência de calor que ocorre através de ondas eletromagnéticas, não necessitando de um meio físico para haver a propagação do calor, havendo a transferência de calor por todos os corpos que possuem temperatura superior ao zero absoluto, conforme a equação 3 (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

$$\dot{Q}_{emiss,m\acute{a}x} = \sigma A_s T_s^4 \quad (3)$$

Onde,

σ = Constante de Stefan-Boltzmann [$5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$]

A_s = Área da superfície [m^2]

T_s = Temperatura da superfície [$^{\circ}\text{C}$]

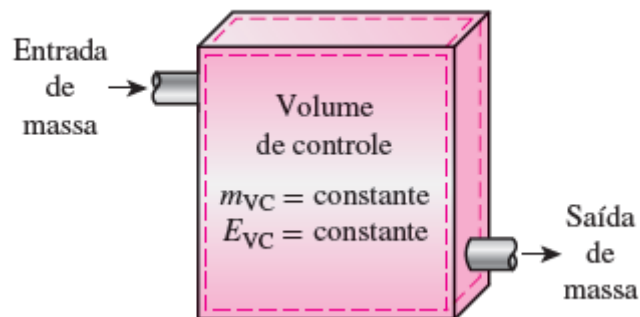
3.2. ESCOAMENTO DE UM FLUIDO

Os escoamentos dos fluidos podem ser laminar, que é o escoamento em que o fluido escoar de forma ordenada e turbulento, tipo de escoamento em que o fluido se movimenta de forma irregular e caótica. O escoamento turbulento apresenta essa forma irregular e caótica devido a alta velocidade em que se movimenta (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004).

3.2.1. REGIME PERMANENTE

Em um regime permanente não ocorre variação de temperatura em um determinado ponto com o tempo. A energia total que um regime permanente apresenta, para um dado volume de controle, é constante, ou seja, a variação total de energia do volume de controle para essa situação é zero. Com isso, a quantidade de energia que entra e que sai do volume de controle é igual (ÇENGEL; GHAJAR, 2009). A Figura 3 exemplifica um volume de controle em regime permanente.

Figura 3 – Volume de controle em regime permanente

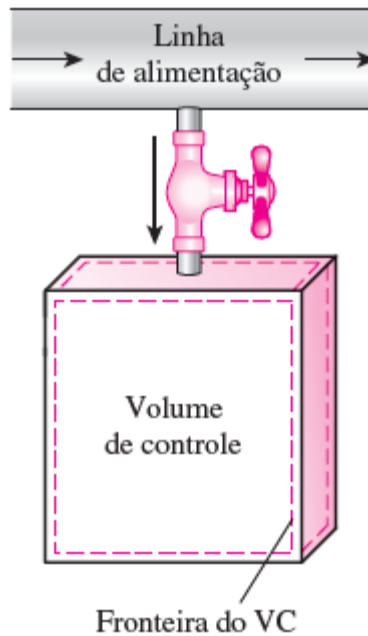


Fonte: Boles e Çengel (2013).

3.2.2. REGIME NÃO PERMANENTE

Em um regime não permanente ocorrem variações em um determinado ponto com o tempo. Quando esse regime é analisado é possível perceber as variações de massa e de energia que ocorrem, sendo necessário realizar a análise para um tempo determinado (ÇENGEL; GHAJAR, 2009). A Figura 4 mostra um volume de controle em regime não permanente.

Figura 4 – Volume de controle em regime não permanente

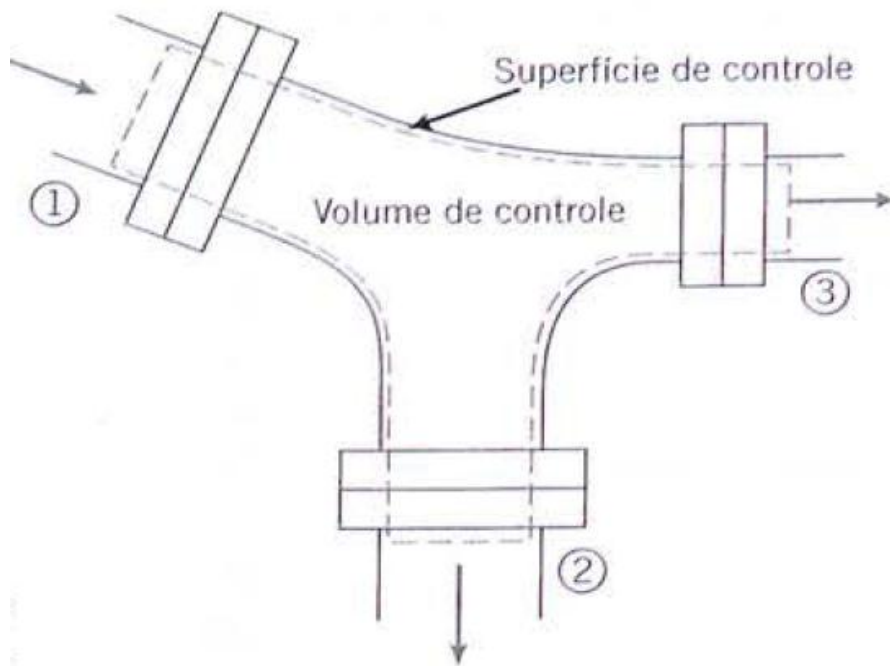


Fonte: Boles e Çengel (2013).

3.3. VOLUME DE CONTROLE

O volume de controle é definido como um volume arbitrário que encontra-se no local em que o fluido está escoando, sendo a fronteira geométrica em que o volume de controle se encontra é chamada de superfície de controle. A superfície de controle pode ser real ou pode ser também imaginária, podendo estar se movimentando ou não (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010). A Figura 5 representa um modelo de um volume de controle, juntamente com uma superfície de controle.

Figura 5 - Fluido escoando em um volume de controle.



Fonte: Fox, McDonald e Pritchard (2010).

3.4. TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são equipamentos que possibilitam que haja uma troca de calor entre dois fluidos, um fluido quente e um fluido frio, onde ocorre a transferência de calor por condução e por convecção (SANTOS; STAPASOLLA, 2011).

Os trocadores de calor podem ser classificados em função do escoamento e em função da construção que apresentam (INCROPERA; et al., 2008).

3.4.1. TROCADOR DE CALOR TUBO DUPLO

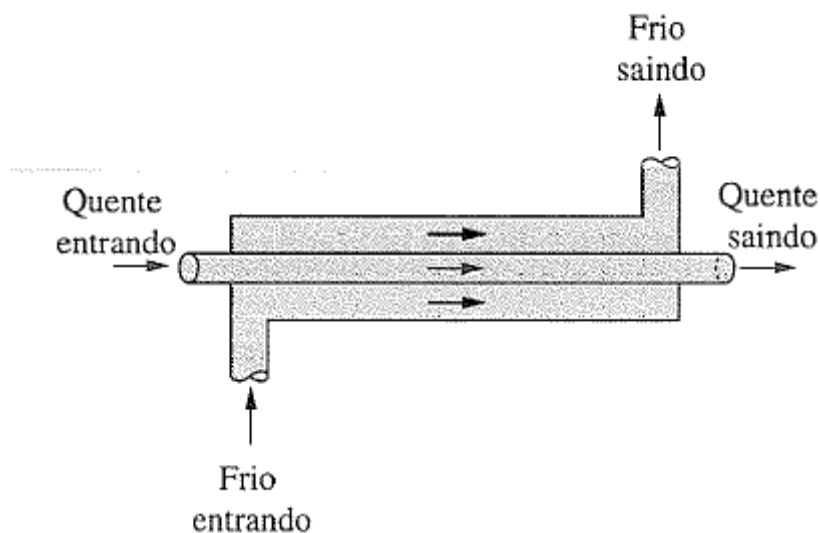
Esse tipo de trocador de calor é o modelo mais simples que existe, sendo constituído por dois tubos que apresentam diâmetros diferentes, sendo posicionados de forma concêntrica. Os fluidos utilizados em um trocador de calor de tubo duplo são organizados de modo que um deles escoa pelo tubo menor e o outro escoa através do espaço anular que está disposto entre os dois tubos (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

Nos trocadores de calor tubo duplo é possível haver duas disposições para o escoamento: escoamento paralelo e escoamento contracorrente.

- **Escoamento paralelo:** No escoamento paralelo, ambos os fluidos entram pela mesma extremidade, realizam o escoamento pelo mesmo sentido e quando saem do trocador de calor eles vão pela mesma extremidade (INCROPERA; et al., 2008).
- **Escoamento contracorrente:** Nesse tipo de escoamento os fluidos realizam a entrada no trocador de calor por sentidos opostos e deixam o equipamento em lados opostos, após realizarem o escoamento em sentidos opostos (INCROPERA; et al., 2008).

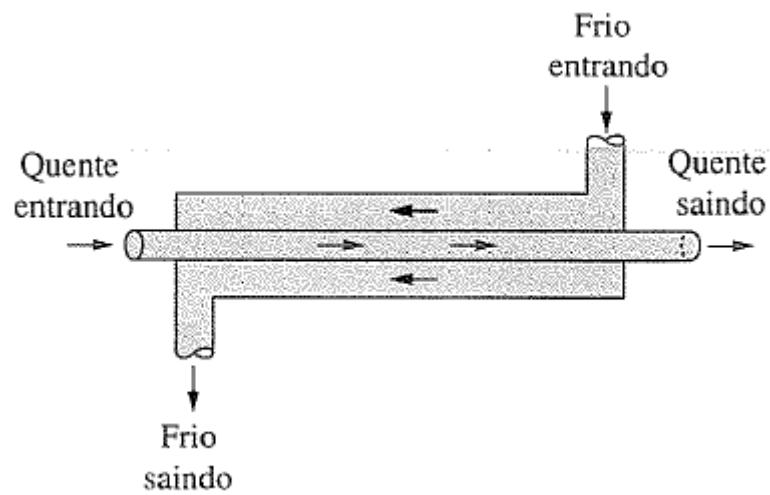
A Figura 6 apresenta um trocador de calor com configuração de escoamento paralelo e a Figura 7 apresenta um trocador de calor com configuração de escoamento contracorrente.

Figura 6 - Escoamento em paralelo.



Fonte: Çengel e Ghajar (2009).

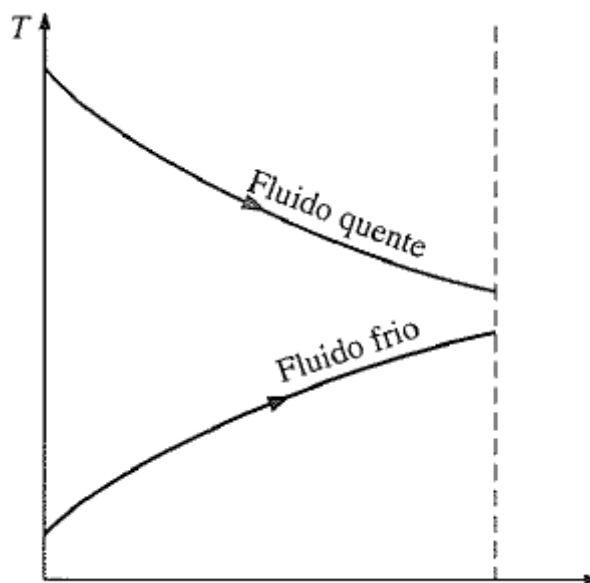
Figura 7 - Escoamento contracorrente.



Fonte: Çengel e Ghajar (2009).

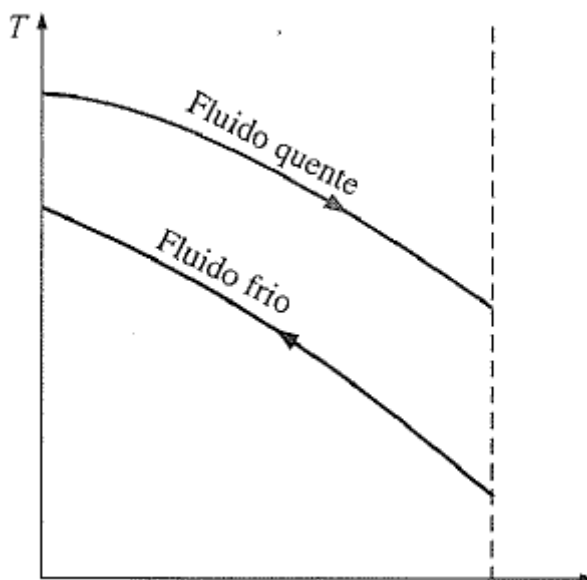
As Figuras 8 e 9 mostram os gráficos comparativos dos comportamentos da temperatura para os fluidos nos dois tipos de escoamento.

Figura 8 - Comparativo dos fluidos para o escoamento em paralelo.



Fonte: Çengel e Ghajar (2009).

Figura 9 - Comparativo de temperaturas para o escoamento contracorrente.



Fonte: Çengel e Ghajar (2009).

3.4.2. TROCADOR DE CALOR COMPACTO

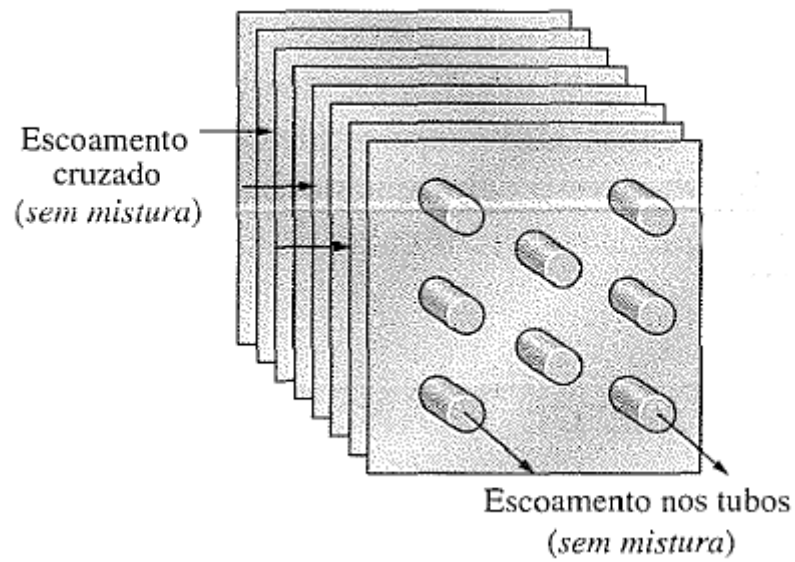
É um tipo de trocador de calor feito para apresentar uma grande quantidade de superfície de transferência de calor por unidade de volume, permitindo altas taxas de transferência de calor com um pequeno volume (ÇENGEL; GHAJAR, 2009). Devido a utilização de chapas finas estreitamente espaçadas, os trocadores de calor compactos conseguem obter a grande superfície de troca térmica (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

Nesse tipo de trocador de calor o fluido possui um escoamento cruzado, ou seja, um fluido escoa perpendicularmente ao outro. Esse trocador de calor pode ser misturado e não misturado (INCROPERA; et al., 2008).

- **Sem mistura:** É quando o escoamento do fluido é forçado pelas aletas por um espaço que fica entre aletas, fazendo com que o fluido não vá paralelamente aos tubos (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).
- **Com mistura:** É quando o escoamento do fluido está livre para avançar paralelamente (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

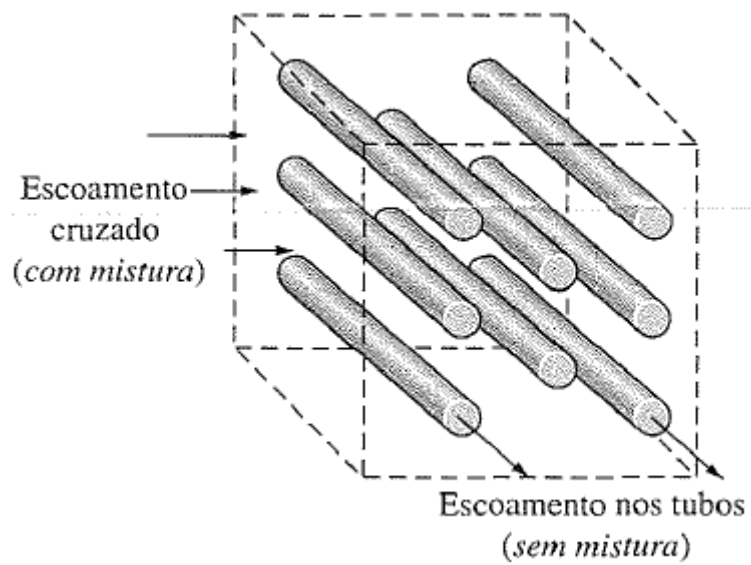
As Figuras 10 e 11 exemplificam como é o funcionamento dos escoamentos sem mistura e com mistura, respectivamente.

Figura 10 - Escoamento sem mistura.



Fonte: Çengel e Ghajar (2009).

Figura 11 - Escoamento com mistura.



Fonte: Çengel e Ghajar (2009).

3.4.3. TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO

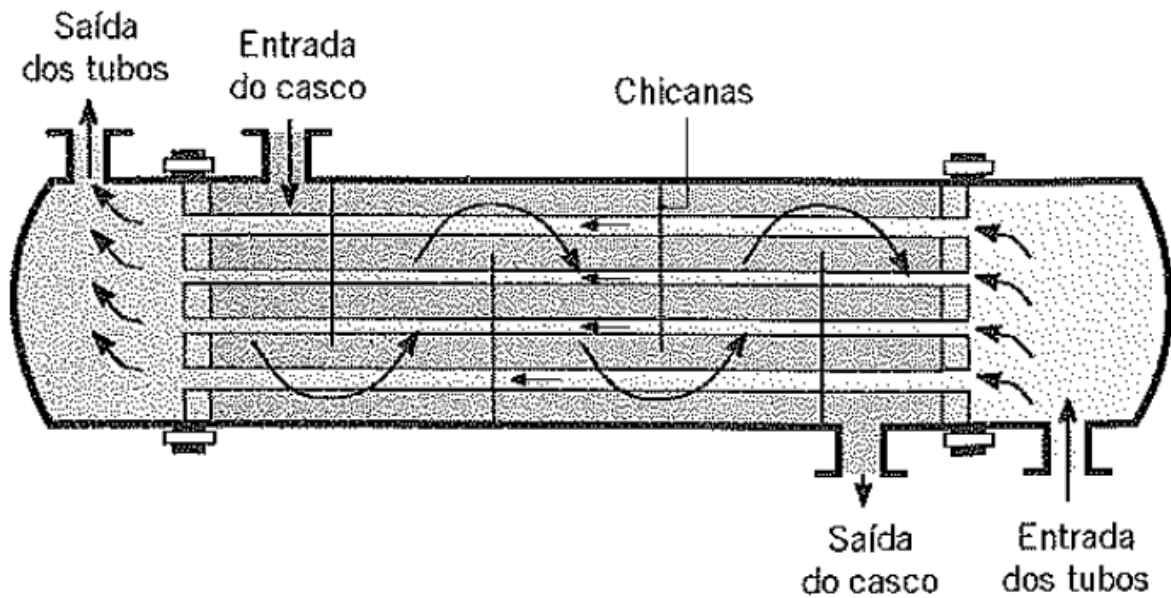
O trocador de calor de casco e tubo é utilizado quando se possui uma grande área térmica, sendo possível alcançar elevadas áreas de troca térmica de maneira econômica e prática (SANTOS; STAPASOLLA, 2011). Eles são constituídos por um feixe de tubos, sendo envolvidos por um casco, onde um dos fluidos circula externamente ao feixe enquanto o outro circula pelo interior dos tubos (BALBUENO, 2006).

Os seus componentes principais são:

- **Cabeçote de entrada:** Ligado ao feixe de tubos com o intuito de realizar a admissão e/ ou descarga do fluido (BALBUENO, 2006).
- **Cabeçote de retorno:** serve para realizar o retorno e/ ou a descarga dos fluidos que passam pelos tubos, dando acabamento ao casco (BALBUENO, 2006).
- **Casco:** É o componente que proporciona o movimento do fluido externo (SILVA, 2019).
- **Feixe de tubos:** Pode apresentar forma reta ou em forma de U, sendo presos em discos metálicos por suas extremidades, discos estes que possuem a função de manter os tubos na posição escolhida (BALBUENO, 2006).
- **Espelhos:** São placas planas que estão localizadas fixas nas extremidades dos feixes de tubos (SILVA, 2019).
- **Chicanas:** Servem para ocasionar turbulência com o intuito de aumentar o coeficiente de transferência de calor para o fluido (MADI, 2005).

A Figura 12 mostra como é a disposição de um trocador de calor casco e tubos.

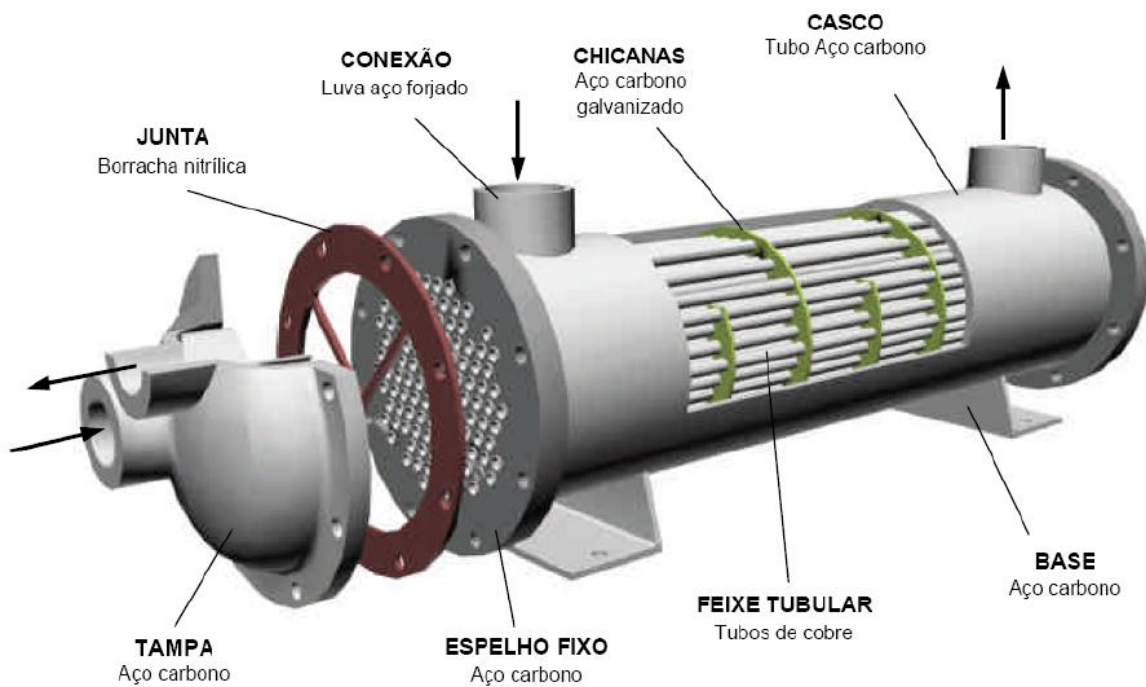
Figura 12 - Trocador de calor casco e tubos



Fonte: Incropera et al. (2008).

A Figura 13 mostra a vista explodida de um trocador de calor casco e tubos.

Figura 13 – Vista explodida de trocador de calor casco e tubos



Fonte: Fiorillo e Martins (2010)

3.5. COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Quando se realiza a escolha de um trocador de calor, é necessário realizar a análise do coeficiente de calor, que é o efeito combinado de uma série de resistências por onde ocorre o tráfego do calor (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004). Para realizar a análise da transferência de calor através do coeficiente global de transferência de calor utiliza-se a equação 4 (INCROPERA; et al., 2008).

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_f A_f} = \frac{1}{U_q A_q} \quad (4)$$

Onde,

U = Coeficiente global de transferência de calor $[W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}]$

A = Área da superfície $[m^2]$

U_f = Coeficiente global de transferência de calor fluido frio $[W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}]$

A_f = Área superficial fluido frio $[m^2]$

U_q = Coeficiente global de transferência de calor fluido quente $[W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}]$

A_q = Área superficial fluido quente $[m^2]$

3.6. MÉTODO LMTD

O método de análise para trocadores de calor da diferença de temperatura média logarítmica (LMTD) é utilizado quando se quer determinar o tamanho de um determinado trocador de calor, pois esse método permite identificar qual a área de transferência de calor, quando as temperaturas de entrada e saída dele são conhecidas (ÇENGEL; GHAJAR, 2009). Para obter a taxa de transferência de calor utilizando o método LMTD, utiliza-se as equações 5 e 6.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (5)$$

$$Q = UA_s \Delta T_{lm} \quad (6)$$

Onde,

ΔT_1 =Diferença de temperatura entre a entrada e saída do fluido 1.

ΔT_2 =Diferença de temperatura entre a entrada e saída do fluido 2.

ΔT_{lm} =Diferença de temperatura média logarítmica

3.7. MÉTODO DA EFETIVIDADE - NUT

O método da efetividade - NUT (número de unidades de transferência) possui como base a utilização do fator efetividade da transferência de calor, sendo este um parâmetro adimensional, que é definido pela equação 7 a seguir (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{\text{máx}}} = \frac{\text{Taxa real que ocorre a transferência de calor}}{\text{Taxa máxima de transferência de calor}} \quad (7)$$

Segundo Balbueno (2006), a taxa real de calor que é trocada tem a ver com o valor do cálculo de energia que foi perdida pelo fluido quente ou pelo valor que foi ganho pelo fluido frio, sendo representado essa taxa de calor real trocada através da equação 8.

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{m}_q \cdot cp_q \cdot (T_{qe} - T_{qs}) = \dot{m}_f \cdot cp_f \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \quad (8)$$

Onde,

$\dot{Q}_{\text{total}}$ = Taxa de calor real [kW]

$\dot{m}_q$ = Vazão mássica fluido quente [kg/s]

cp_q = Calor específico fluido quente [J/kg.K]

T_{qe} = Temperatura fluido quente de entrada [°C]

T_{qs} = Temperatura fluido quente de saída [°C]

$\dot{m}_f$ = Vazão mássica fluido frio [kg/s]

Quando se realiza a análise de trocador de calor é comum utilizar a grandeza adimensional chamada razão de capacidades, que é demonstrada pela equação 9.

$$C = \frac{C_{min}}{C_{m\acute{a}x}} \quad (9)$$

Onde,

C_{min} = Menor valor de capacidade térmica entre os dois fluidos [W / °C]

$C_{m\acute{a}x}$ = Maior valor de capacidade térmica entre os dois fluidos [W / °C]

Para realizar as relações de efetividade de um trocador de calor, utiliza-se o NTU, que é o número de unidades de transferência. O NTU serve para medir a área de transferência de calor, ou seja, quanto maior o valor NTU maior será o trocador de calor. A obtenção da grandeza NTU é obtida através da equação 10.

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{m\acute{i}n}} \quad (10)$$

Onde,

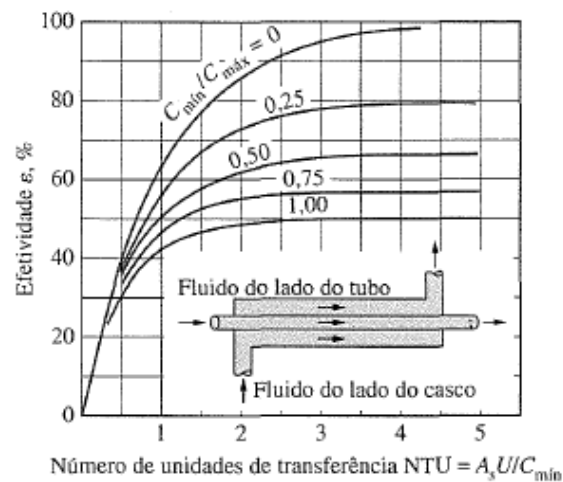
U = Coeficiente global de transferência de calor [W . (m². K)⁻¹]

A_s = Área de transferência de calor do trocador de calor [m²]

C_{min} = Menor valor de capacidade térmica entre os dois fluidos [W / °C]

A Figura 14 mostra a relação da efetividade de trocadores de calor com o NTU para o escoamento paralelo.

Figura 14 - Relação da efetividade com o NTU para escoamento paralelo.



Fonte: Çengel e Ghajar (2009).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o estudo de leitura de dados no trocador de calor foi utilizado o trocador de calor de casco e tubo fornecido por Silva (2019) em seu trabalho de conclusão de curso, representado pela Figura 15. O trocador de calor foi feito utilizando doze tubos de alumínio (Figura 16), possuindo uma disposição dentro do trocador de calor de quatro colunas, com 3 tubos em cada coluna, com 12,7 milímetros de diâmetro cada tubo e possuindo 1 metro de comprimento, 4 chicanas espaçadas 20 centímetros umas das outras e um casco de acrílico (Silva, 2019).

Figura 15 - Trocador de calor de casco e tubo



Fonte: Silva (2019).

Figura 16 – Tubos do trocador de calor

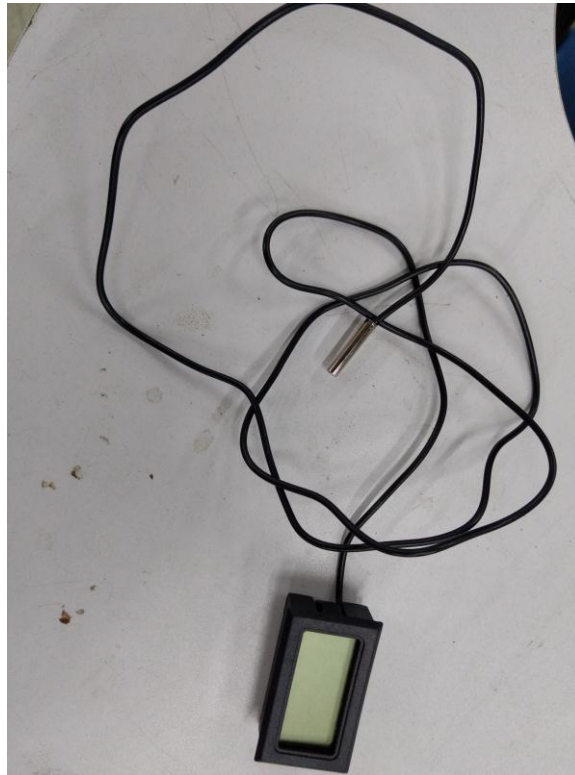


Fonte: Silva (2019).

Com o intuito de fazer um sistema de leitura de dados para o trocador de calor, foi elaborado uma disposição que possibilite o escoamento do fluido quente sendo um sistema fechado, ou seja, reaproveitando a água aquecida sem precisar de reabastecimento e o fluido frio sendo em sistema aberto, ligado diretamente em uma torneira.

Foram utilizados dois sensores Matsuri de temperatura com LCD acoplados para obtenção dos dados do fluido quente (Figura 17), sendo eles colocados imediatamente antes e depois do fluido quente passar pelos tubos do trocador de calor. Para medição da água fria após passar pelo casco do trocador de calor, foi utilizado um sensor de temperatura do tipo ds18b20 (Figura 18), que é utilizado diretamente com o Arduino.

Figura 17 - Sensor de temperatura com LCD acoplado



Fonte: Autor.

Figura 18 - Sensor de temperatura utilizado com arduíno



Fonte: Autor.

Para realizar a medição dos fluxos de água quente e fria, foram utilizados dois sensores de vazão do tipo SEA YF - S201 (Figura 19). Para medir o fluxo de água quente, o sensor de vazão foi colocado imediatamente antes da entrada da água quente nos tubos e para verificar o fluxo de água fria, o sensor foi colocado na saída da torneira que é ligada ao casco.

Figura 19 – Sensores de vazão utilizados



Fonte: Autor.

Os ensaios para obtenção dos dados foram realizados na oficina mecânica da UACSA - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, uma das unidades acadêmicas da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Para a realização do sistema que possibilite o sistema de leitura de dados, foram utilizados os materiais que estão contidos na Tabela 2.

Tabela 2. Materiais utilizados para a bancada didática

Material	Quantidade	Função
Trocador de calor casco e tubo fornecido	1	Realizar a troca térmica entre os fluidos quente e frio
Estante de aço desmontável	1	Servir como suporte para os equipamentos dos ensaios
Balde	1	Servir para armazenamento da água quente
Mangueira	4	Transporte dos fluidos para dentro e fora do

		<i>trocador de calor</i>
<i>Arduino UNO</i>	<i>2</i>	<i>Realizar leitura dos dados capturados pelos sensores de temperatura e de vazão</i>
<i>Bomba de aquário</i>	<i>1</i>	<i>Fazer circular água quente pelos tubos</i>
<i>Sensor de temperatura</i>	<i>3</i>	<i>Coletar as temperaturas das águas fria e quente</i>
<i>Resistência elétrica</i>	<i>2</i>	<i>Realizar o aquecimento da água</i>
<i>Sensor de vazão</i>	<i>2</i>	<i>Coletar os fluxos de água fria e quente</i>

Fonte: Autor.

4.1. BANCADA DIDÁTICA

A bancada didática, representada pela Figura 20, possibilita que possam ser estudados os efeitos que uma variação de vazão ocasiona no resultado da troca térmica.

Figura 20 - Bancada didática



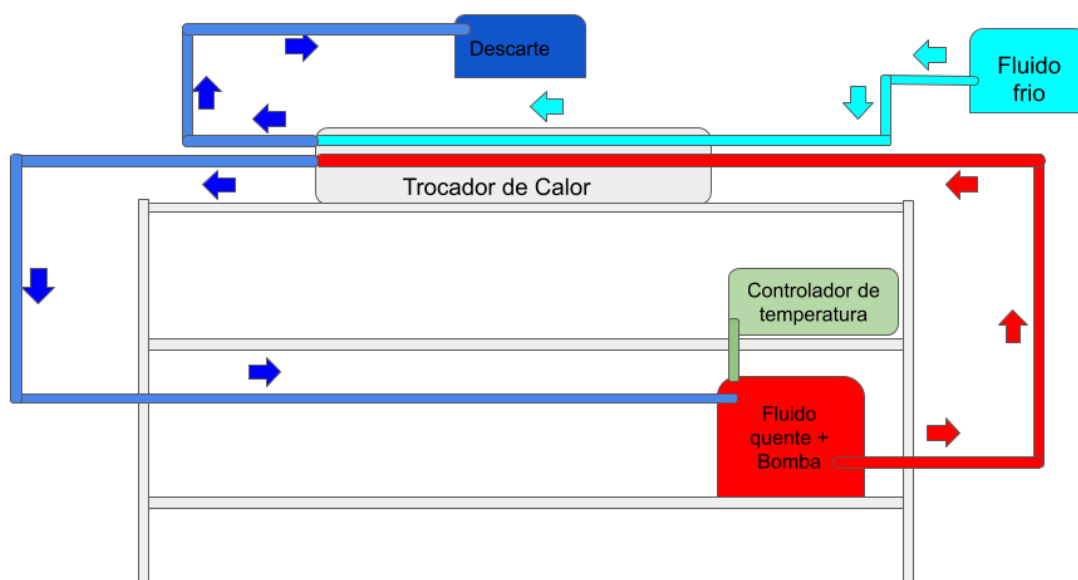
Fonte: Autor.

Na bancada foram organizados os equipamentos de modo que cada módulo da estante de aço seja utilizada para finalidades específicas. Na parte superior é onde se encontra o trocador de calor, no meio é onde está localizado o controlador de temperatura e na parte inferior é onde as resistências são colocadas.

O esquema organizado para a bancada tornou necessário a fixação das mangueiras utilizando braçadeiras de nylon, para evitar que as mesmas dobrassem e impedissem o fluxo livre dos fluidos. O trocador de calor foi fixado utilizando as braçadeiras de nylon para permanecer na posição ideal para os ensaios, pois para ocorrer o fluxo correto do fluido frio, que é a água entrando pela torneira de baixo e saindo pela torneira de cima, essa configuração é necessária. Com isso, o preenchimento do casco com água foi melhor, minimizando o acúmulo de ar.

A parte inferior foi organizada de modo que pudesse reaproveitar a água quente de circulação do trocador de calor, fazendo um sistema fechado de água quente, de modo a precisar de uma quantidade menor de energia para aquecimento. A Figura 21 representa um desenho esquemático do funcionamento da bancada.

Figura 21 - Desenho esquemático da bancada de trocador de calor



Fonte: Autor.

A Figura 21 representa o desenho esquemático com o escoamento de fluxo paralelo, que foi o utilizado para o projeto. O fluxo paralelo foi utilizado devido o posicionamento que o trocador de calor adquiriu na bancada para realizar os ensaios. Esse posicionamento adquirido possibilitou apenas a utilização do fluxo em paralelo. Nesse desenho esquemático o fluido frio passa pelo trocador de calor e na saída vai para descarte, enquanto o fluido quente passa pelo trocador de calor e na saída é reaproveitado para continuar o ciclo.

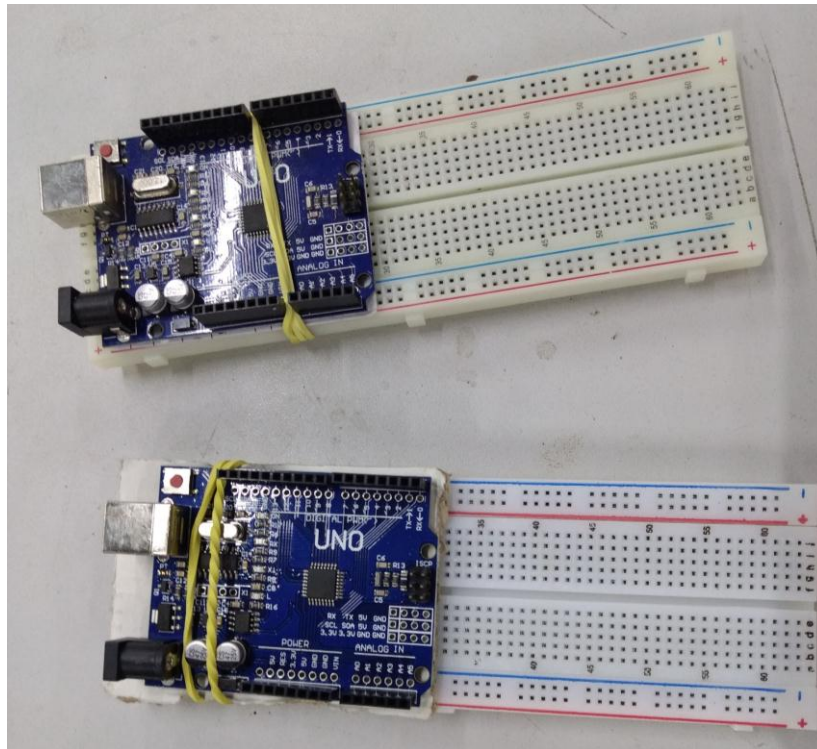
4.1. ARDUÍNO

O Arduino é um sistema que possibilita a prototipação e desenvolvimento de projetos com um preço reduzido (Silva, 2019). Ele é utilizado para obter resposta de sensores que são acoplados em suas conexões, obtendo resposta deles no computador, como por exemplo, um sensor de temperatura, que transfere a captação da temperatura do Arduino para o computador.

Para a aquisição dos dados de temperatura e de vazão, foram utilizados dois Arduino do tipo UNO, como mostra a Figura 22. Esse modelo de arduino é o mais

indicado para quem não possui experiência com codificação, sendo o modelo de referência para a plataforma (Arduino, 2019).

Figura 22 - Arduinos utilizados



Fonte: Autor.

4.1. SENSORES DE TEMPERATURA

Para o sistema a bancada foram utilizados três sensores, com o intuito de verificar quais as temperaturas que o trocador de calor apresenta. A distribuição dos sensores foi feita conforme a Figura 23, sendo enumerados como 01, 02 e 03, sendo 01 e 02 os sensores Matsuri e 03 o sensor ds18b20.

Figura 23 - Posicionamento dos sensores de temperatura



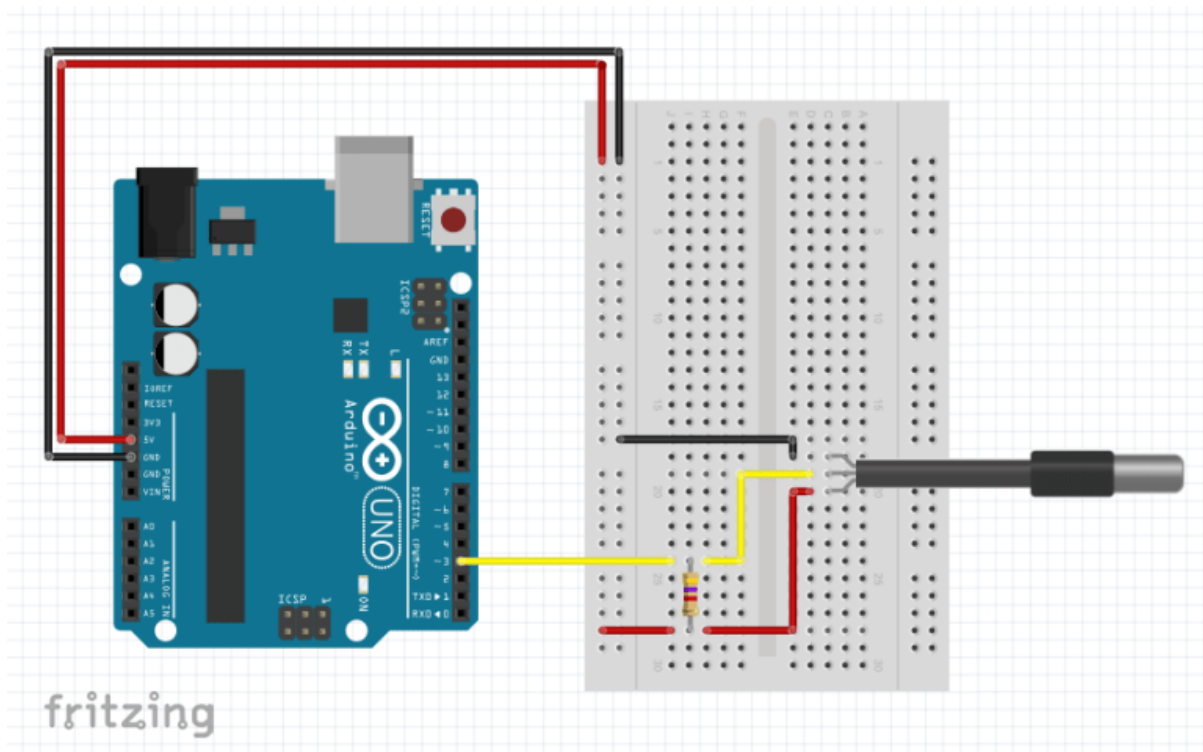
Fonte: Autor.

As numerações 01, 02 e 03 que estão indicadas na Figura 23, são referentes ao posicionamento dos sensores de temperatura, para escoamento paralelo, sendo organizadas da seguinte maneira:

- Numeração 01: Sensor de temperatura com LCD, sendo responsável por medir a temperatura de saída da água quente dos tubos do trocador de calor;
- Numeração 02: Sensor de temperatura com LCD, sendo responsável por medir a temperatura de água quente antes de entrar nos tubos. Serve também para conferir se o controlador de temperatura está operando de forma eficaz;
- Numeração 03: Sensor de temperatura que utiliza arduíno, sendo responsável por medir a água fria de saída do casco do trocador de calor.

Para realizar a leitura dos dados de temperatura utilizando o arduino, é necessário a utilização em conjunto com uma protoboard, que é um dispositivo que possibilita uma maior associação de componentes para o arduino. A tensão utilizada no arduino para o sensor é de 5V. Para realizar a leitura das temperaturas, o arduino é organizado conforme a Figura 24.

Figura 19 - Posicionamento sensor de leitura de temperatura no arduino



Fonte: Vida de silício (2018).

Os dois sensores Matsuri necessitam apenas que a sonda entre em contato com o ambiente desejado para obter a leitura de temperatura do sistema. Eles possuem uma resposta de temperatura que demora aproximadamente cinco segundos para ser atualizada no LCD.

4.2. SENSORES DE VAZÃO

Foram utilizados dois sensores de vazão SEA YF - S201 com o objetivo de medir qual é a vazão de entrada de água fria e água quente no trocador de calor, cujos posicionamentos no sistema estão representados na Figura 25.

Figura 25 - Posicionamento dos sensores de vazão



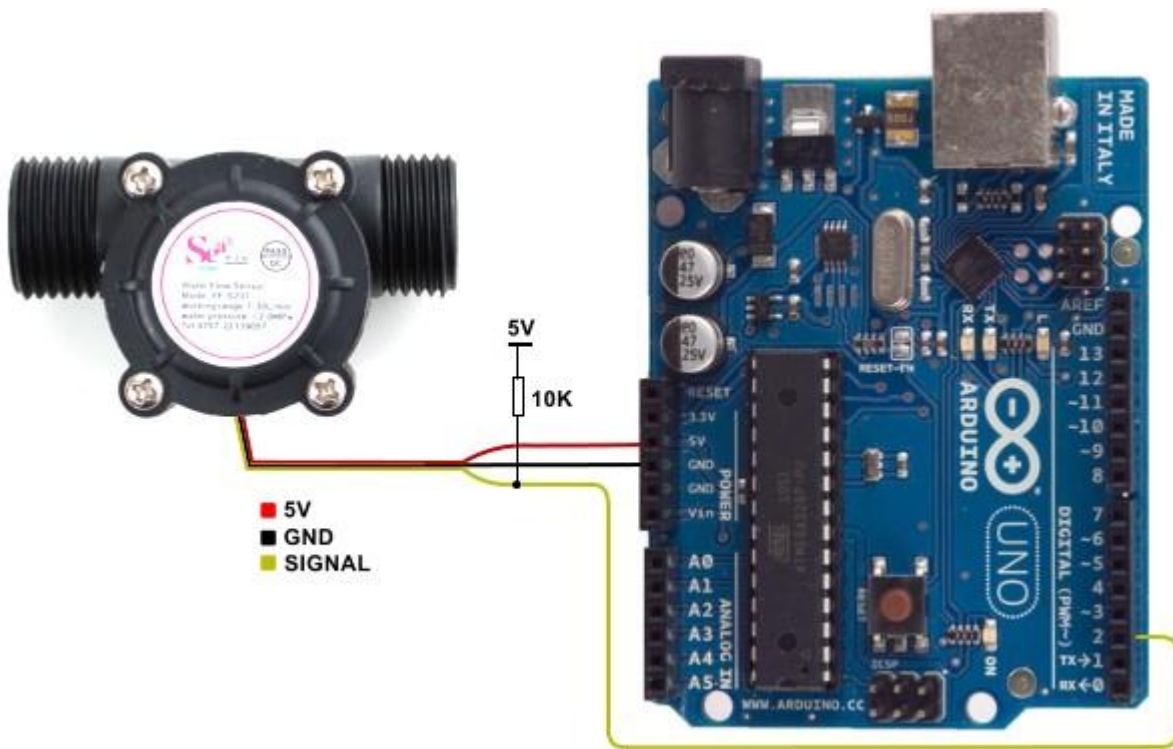
Fonte: Autor.

As numerações 01 e 02, apresentadas na Figura 25, são referentes ao posicionamento dos sensores de vazão no trocador de calor, onde:

- Numeração 01: Sensor de vazão posicionado na admissão de água quente pelo trocador de calor;
- Numeração 02: Sensor de vazão posicionado na admissão de água fria para o trocador de calor.

Para realizar a leitura dos dados de vazão com o sensor SEA YF - S201 não é necessária a utilização da protoboard. O sensor é ligado diretamente no arduino, conforme a Figura 26.

Figura 26 - Utilização do arduino para leitura de vazão



Fonte: Micro Robotics (2019).

4.3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a realização dos procedimentos experimentais, a temperatura da água fria proveniente da torneira era de 29,2 °C e a água quente possuía uma temperatura de 40 °C, sendo feitos cinco ensaios no total.

Os ensaios foram feitos em fluxo paralelo, onde a vazão do fluido quente foi mantido a 6 L/min enquanto era variada a vazão do fluido frio para cada ensaio. Para o sistema alcançar o regime permanente, em cada ensaio, ele funcionava por um minuto, com o intuito de estabilizar as temperaturas de saída de ambos os fluidos.

Através de interpolações com os dados obtidos nos ensaios, foram adotados os valores de densidade e calor específico da água líquida. Com a utilização das densidades e utilizando a vazão volumétrica dos fluidos, torna-se possível descobrir a vazão mássica para cada temperatura.

Através das equações apresentadas nas seções 3.5 e 3.6, foi possível obter os valores para razão de capacidades, taxa de transferência de calor do fluido quente, taxa real de transferência de calor, taxa de transferência de calor máxima, coeficiente global NTU e efetividade.

Para obtenção do coeficiente global de temperatura para todos os ensaios, foi utilizada a área lateral externa dos doze tubos, sendo de 0,4788 m², e os resultados obtidos para o fluido quente, pois o fluido frio perde calor para o ambiente externo através da convecção.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

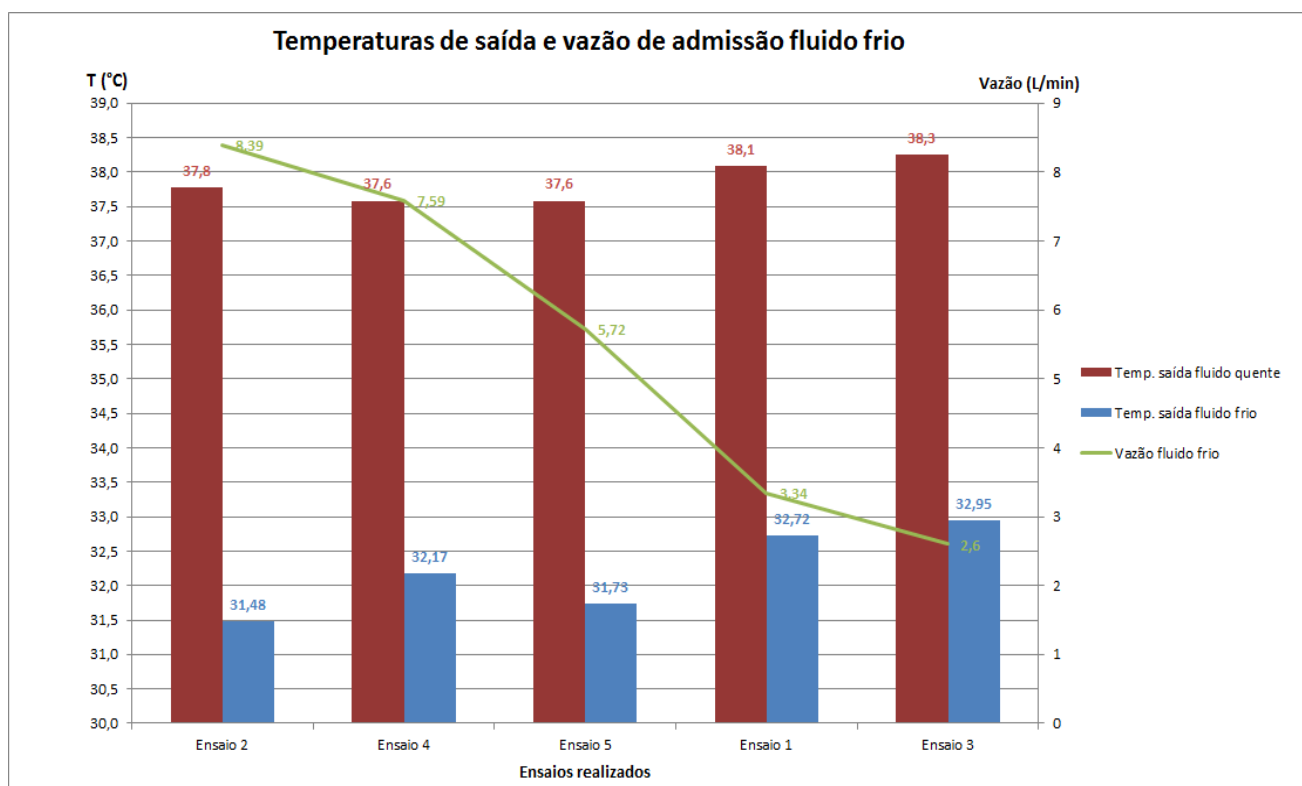
Foi possível ser feita a elaboração de uma bancada que possibilite a visualização de temperatura e vazão. Para realizar a análise de funcionamento do sistema de leitura que foi acoplado na bancada, foram feitos 5 ensaios para coleta dos dados.

Através dos dados coletados foi feita a análise da relação que a efetividade apresenta com relação à vazão.

5.1. ENSAIOS

Para verificação de como as temperaturas variam com a vazão do fluido, foram alteradas as vazões do fluido frio em cada um dos testes para análise, conforme a Figura 27. A vazão do fluido quente foi mantida com o mesmo valor, sendo de 6 L/min, para todos os ensaios.

Figura 27 - Temperaturas de saída e vazão de admissão fluido frio



Fonte: Autor.

A Figura 27 foi organizada de modo que as vazões utilizadas para os ensaios ficassem em ordem decrescente, para uma melhor visualização. É possível

analisar como a diferença na vazão do fluido frio afeta as temperaturas de saída do fluido quente e do fluido quente.

- *Fluido frio:* A temperatura do fluido frio apresenta uma tendência a ser maior quanto menor for a vazão, pois aumenta o tempo de contato com os tubos do trocador de calor, aumentando assim a transferência térmica, conforme o esperado.
- *Fluido quente:* A temperatura do fluido quente tem uma tendência a ser menor quanto maior for a vazão do fluido frio, pois uma quantidade maior de fluido frio com temperatura mais baixa irá fazer a transferência térmica com ele. O resultado obtido foi conforme o esperado.

Após o sistema atingir o regime permanente, ou seja, sem ocorrência de variação de temperatura de saída para os dois fluxos, foram observados os valores de temperatura para a água quente e água fria. Com isso, foi possível adotar os valores referentes à essas temperaturas, conforme exibido na Tabela 3.

Tabela 3. Valores adotados com as temperaturas de saída

Ensaio	Fluido	Vazão volumétrica (L/min)	Vazão mássica (kg/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	ΔT_{lm}	Calor específico (J/kg.K)
1	Frio	3,34	0,06	29.2	32.72	7,765	4178,32
	Quente	6	0,1	40	38.1		4179
2	Frio	8,39	0,14	29.2	31,48	8,343	4178,32
	Quente	6	0,1	40	37,77		4179
3	Frio	2,6	0,04	29.2	32,95	7,726	4178,32
	Quente	6	0,1	40	38,25		4179
4	Frio	7,59	0,13	29.2	32,17	7,797	4178,32
	Quente	6	0,1	40	37,58		4179
5	Frio	5,72	0,09	29.2	31,73	8,074	4178,32
	Quente	6	0,1	40	37,6		4179

Fonte: Autor.

Com os valores mostrados na Tabela 3, torna-se possível obter os dados de transferência de calor, que são mostrados na Tabela 4.

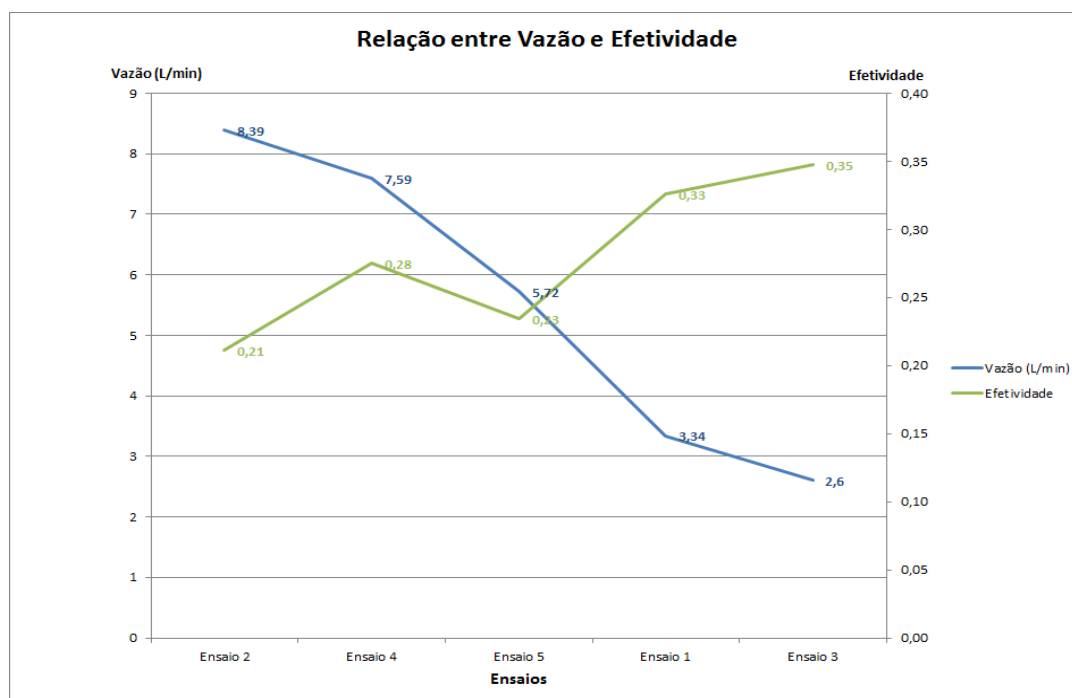
Tabela 4. Dados de transferência de calor

Ensaio	Razão de capacidades	Taxa de transferência de calor do fluido quente (kW)	Taxa real de transferência de calor (kW)	Taxa de transferência de calor máxima (kW)	Coefficiente Global ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	NTU	Efetividade
1	0,6	802,37	882,46	2707,55	215,84	0,41	0,33
2	0,71	931,92	952,81	4513,32	233,32	0,27	0,21
3	0,4	731,33	626,75	1805,03	197,71	0,57	0,35
4	0,77	1011,32	1241,16	4513,32	270,93	0,31	0,28
5	0,9	1011,32	951,40	4061,33	261,64	0,33	0,23

Fonte: Autor.

A Figura 28 exemplifica, de acordo com os resultados obtidos, qual é a relação entre vazão e efetividade dos testes realizados.

Figura 28 - Relação entre vazão e efetividade



Fonte: Autor.

A análise da Figura 28, que foi feita seguindo a ordem da maior vazão para a menor, indica que a efetividade do sistema aumenta quanto menor for a vazão de fluido frio utilizada, ou seja, possuem uma relação inversamente proporcional.

A efetividade do sistema é maior para o caso analisado com as menores vazões, pois com menores fluxos de água, o tempo de contato de uma parcela de água fria com a fonte quente é maior, ocasionando um aumento de transferência de calor.

O aumento no tempo de contato gera uma variação maior de temperatura da água fria, ocasionando uma taxa de transferência de calor real maior, que por sua vez gera uma efetividade maior. Para uma boa exemplificação pode-se citar o caso do chuveiro elétrico que possui certa temperatura de saída de água, mas ao diminuir o fluxo de água é notável o aumento da temperatura de saída da água.

A Figura 27 demonstra que quanto maior a vazão do fluido frio, menor será a temperatura de saída dele, ou seja, menor será a variação de temperatura do fluido frio. Com isso, a taxa real de transferência de calor será menor, ocasionando a baixa efetividade demonstrada na Figura 28. Isso se deve à relação da taxa real de transferência de calor com a efetividade, de acordo com a equação 4.

6. CONCLUSÕES

Com a elaboração da bancada didática para análise da leitura de dados de um trocador de calor, foi possível obter a leitura dos valores disponibilizados pelo trocador de calor de forma efetiva na prática.

Com a análise do trocador de calor utilizando um fluxo de escoamento em paralelo, foi possível adquirir dados de temperaturas de saída da água, as quais variavam com a alteração da vazão de água fria.

Com a leitura dos dados, sendo por arduíno e pelo visor do sensor de temperatura com LCD, foi possível adquirir dados que possibilitaram analisar por meio gráfico a relação que a efetividade possui com a vazão da água fria.

De um modo geral, os resultados obtidos se mostraram satisfatórios e a utilização dos sensores de maneira fixa possibilitou uma facilidade na leitura dos dados dos fluidos frio e quente, nas mais diferentes vazões.

Durante a construção da bancada didática o maior desafio encontrado foi a da disposição que o trocador de calor assumia nela, não ficando na posição ideal para realizar os ensaios. Este problema foi resolvido utilizando braçadeiras de nylon

para manter o trocador de calor e as mangueiras em suas posições para o funcionamento. Essa resolução para o problema incapacitou a utilização do trocador de calor para análise do fluxo em sentido contra corrente devido à disposição da tubulação, ficando disponível para análise apenas em fluxo paralelo.

Os alunos que forem manipular a bancada elaborada conseguirão obter de maneira simples os resultados da troca térmica entre os dois fluidos no fluxo paralelo, devido ao fato que todos os sensores utilizados para a bancada foram mantidos nas posições que foram realizados os ensaios.

7. POSSÍVEIS MELHORIAS E SUGESTÕES

- Utilização de sensores que possuem visores acoplados para dispensar a utilização de um sistema de leitura externo, como o arduino, para obtenção de maneira simples das temperaturas e vazões;*
- Utilizar uma bomba que possibilite uma maior gama de variações de vazão para obter mais dados para comparação;*
- Realizar testes com temperaturas diferentes de entrada para a água quente e fria;*
- Evitar o desperdício da água fria realizando a elaboração de um sistema fechado que possibilite resfriamento da água fria de saída, como por exemplo, resfriamento por gravidade.*
- Realizar um novo arranjo de tubulação que possibilite a troca dos fluxos paralelo e contra corrente com apenas o abrir e fechar de válvulas.*

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDUINO. ARDUINO UNO REV3. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>>. Acesso em 26 nov. 2019.

BALBUENO BICCA, G. *Modelagem Hierárquica de Trocadores de Calor Casco e Tubo*. 2006.

BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E.; LIGHTFOOT, Edwin N. *Fenômenos de Transporte*, 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

BOLES, M. A.; ÇENGEL, Y. A. *Termodinâmica*. 7ª edição. São Paulo: AMGH Editora, 2013.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, A. J. *Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática*, 3ª Edição. São Paulo, 2009.

FIORILLO, DAVID; MARTINS, PAULO NASCIMENTO. *Comissionamento de trocadores de calor do tipo casco e tubos*. 2010.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. PRITCHARD, *Introdução à Mecânica dos Fluidos 7ª Edição*, LTC Editora, 2010.

INCROPERA, F. P. et al. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*, tradução da 6 ed. Rio de Janeiro, Brasil. LTC, 2008.

MADI, M. *Otimização do período de limpeza de trocadores de calor utilizados no refino de petróleo*. 2005.

MICRO ROBOTICS. *Liquid Flow Meter - Plastic 1/2" NPT Threaded*. Disponível em: <<https://www.robotics.org.za/YF-201>>. Acesso em: 26 nov. 2019.

SANTOS, F. C. DOS; STAPASOLLA, T. Z. *Construção trocador de calor tipo casco tubo para resfriamento de mostro de cerveja*. 2011.

SILVA NETO, Fernando Máximo da. Construção e estudo teórico-prático de um trocador de calor de casco e tubo de bancada. 2019.

VIANA, A. Modelagem matemática de trocadores de calor tipo casco e tubos. 2014.

VIDA DE SILICIO. DS18B20 - Sensor de temperatura inteligente. 2018. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/sensor-de-temperatura-ds18b20/>>. Acesso em: 26 nov. 2019.

APÊNDICE A – Como utilizar o trocador de calor

Utilizar o trocador de calor respeitando a sequência a seguir:

- 1. Colocar as mangueiras nas duas torneiras do casco;*
- 2. Conectar a torneira voltada para baixo na admissão de água fria;*
- 3. A torneira voltada para cima utilizar para saída da água fria após a troca térmica;*
- 4. Colocar o sensor de vazão na mangueira que realiza a admissão de água fria;*
- 5. Colocar o sensor de temperatura para medir a água fria após a troca térmica;*
- 6. Conectar o sensor de fluxo na tubulação voltada para baixo;*
- 7. Colocar a mangueira no sensor de tubo conectado na tubulação e conectar na bomba de água;*
- 8. Conectar a mangueira na saída de água da tubulação horizontal e conectar no balde;*
- 9. Colocar os sensores de temperatura nos dois furos feitos na tubulação na posição horizontal;*
- 10. Ligar a admissão de água fria no casco, tomando cuidado em garantir que ambas as torneiras estão abertas, para não comprometer a vedação do casco. É necessário garantir que a água preencha todo o casco;*
- 11. Encher o balde com água suficiente para o processo;*
- 12. Ligar as resistências para aquecimento da água;*
- 13. Ligar a bomba de água, tomando cuidado em garantir que o fluxo de água pela tubulação está liberado, garantindo assim que não comprometa a vedação da tubulação e do casco;*
- 14. Esperar até que o sistema fique em equilíbrio;*
- 15. Realizar medições das temperaturas de saída de água quente e água fria, para variações de vazão de admissão da água fria.*

Após realizar o passo a passo descrito, preencher a Tabela 5.

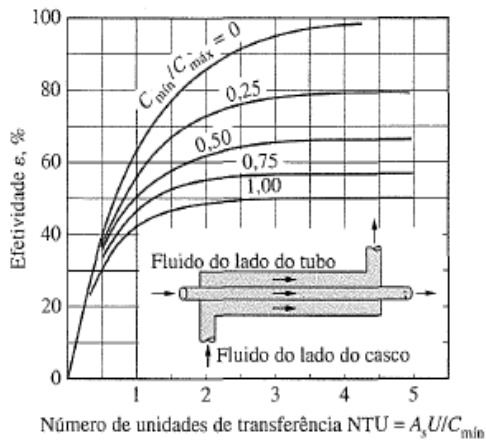
Tabela 5. Dados de transferência de calor

	<i>Temperatura de entrada água fria (°C)</i>	<i>Temperatura de entrada água quente (°C)</i>	<i>Temperatura de saída água fria (°C)</i>	<i>Temperatura de saída água quente (°C)</i>	<i>Vazão água fria (L/min)</i>	<i>Vazão água quente (L/min)</i>
<i>Ensaio 1</i>						
<i>Ensaio 2</i>						
<i>Ensaio 3</i>						
<i>Ensaio 4</i>						
<i>Ensaio 5</i>						

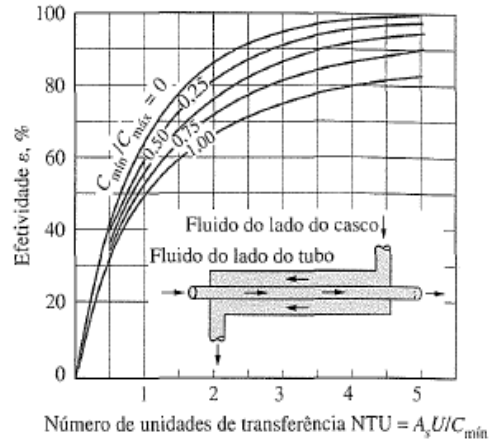
Fonte: Autor.

ANEXO A – Relação da efetividade com o NTU

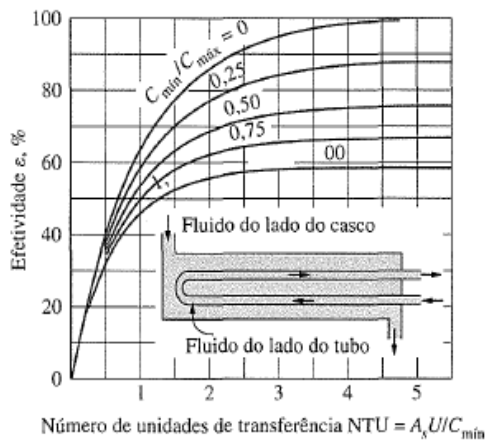
Figura A1: Relação da efetividade com o NTU.



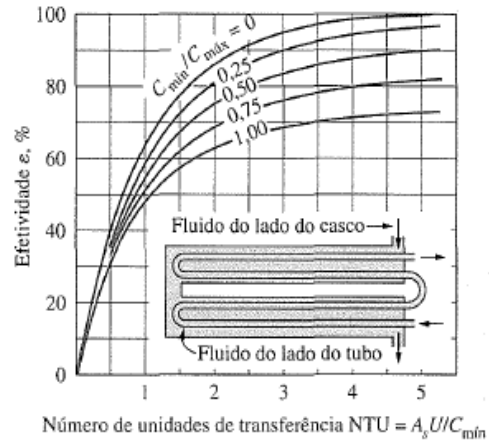
(a) Escoamento paralelo



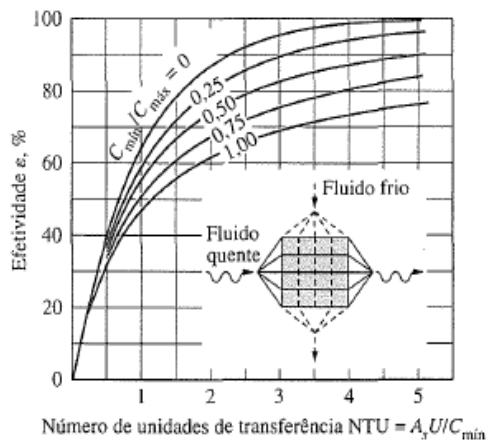
(b) Contracorrente



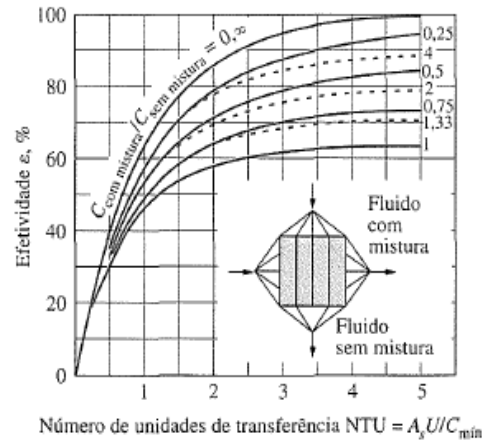
(c) Um passe no casco e 2, 4, 6 ...passe nos tubos



(d) Dois passes no casco e 4, 8, 12 ...passe nos tubos



(e) Escoamento cruzado com os dois fluidos sem mistura



(f) Escoamento cruzado com um fluido com mistura e o outro sem mistura

Fonte: Çengel e Ghajar (2009).

ANEXO B – Valores de propriedades da água saturada

Tabela B1. Valores de propriedades da água saturada

Temperatura (°C)	Densidade água líquida (kg/m³)	Calor específico água líquida (J/kg.K)
0,01	999,8	4217
5	999,9	4205
10	999,7	4194
15	999,1	4185
20	998	4182
25	997	4180
30	996	4178
35	994	4178
40	992,1	4179
45	990,1	4180

Fonte: Çengel e Ghajar (2009).