UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR
EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

Nicole Fávero Simões

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DE TEMPERATURA APLICADO EM ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM TROCADORES DE CALOR

POÇOS DE CALDAS – MG
2021

Nicole Fávero Simões

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DE TEMPERATURA APLICADO EM ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM TROCADORES DE CALOR

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Laos Alexandre Hirano
Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Vinícius Rodrigues

POÇOS DE CALDAS – MG
2021

Nicole Fávero Simões

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DE TEMPERATURA APLICADO EM ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM TROCADORES DE CALOR

A Banca examinadora abaixo-assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em ciências e tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas *campus* Poços de Caldas.

Aprovada em:

Prof. Dr. Laos Alexandre Hirano. Assinatura:
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Marcos Vinícius Rodrigues Assinatura:
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Me. Bruno Dias de Souza Assinatura:
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dra. Jaqueline Costa Martins Assinatura:
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

RESUMO

Os trocadores de calor possuem grande aplicação na engenharia e são amplamente estudados em aulas práticas e experimentais. Este tem como finalidade realizar a transferência de calor entre dois fluidos, que se encontram em diferentes temperaturas, levando à saída do dispositivo o fluido com uma temperatura determinada. Através de uma demanda para aprimorar os experimentos com trocadores de calor nas aulas práticas dos cursos de engenharia da Universidade Federal de Alfenas, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo automatizado para realizar a aquisição da temperatura em função do tempo em quatro posições distintas de um trocador de calor

O dispositivo foi programado em um arduino para enviar as medidas de temperatura diretamente para um display LCD 16x2 e para o Excel de forma simultânea à medição, onde as medidas de temperatura eram realizadas por termopares, amplificadas e convertidas para graus célsius por um módulo Max 6675.

O trocador utilizado neste estudo foi um duplo tubo e foram medidos durante os ensaios as temperaturas de entrada e saídas dos fluidos quente e frio escoando em paralelo e contracorrente. Com os valores médios das temperaturas foi calculado a média logarítmica de temperatura (MLDT), a taxa de transferência de calor e o coeficiente global de transferência de calor. Durante todo experimento foi utilizado água para os dois fluidos e a vazão se manteve constante.

Diante do exposto neste trabalho foi possível concluir que a MLDT do fluxo contracorrente apresenta uma diferença de temperatura de saída menor, o que significa que este fluxo apresenta maior taxa de calor transferido, conclui-se também que o coeficiente global de transferência de calor é mais eficiente no escoamento contracorrente, pois apresentou um resultado maior para este regime quando comparado com o paralelo. Destacou-se ainda que o dispositivo termopar apresentou resultados positivos quanto a variação da temperatura e do tempo de resposta durante o experimento.

Palavras-chave: Trocador de calor duplo tubo. Termopar. Coeficiente global de transferência de calor.

ABSTRACT

The heat Exchange has been widely applied in the engineering field and is intensively studied in practice and experimental classes. The purpose of this practice is to transfer heat between two fluids that have different temperatures, leading to the output of one fluid with a specific temperature. Following a great demand to improve experiments with heat exchangers in the engineering laboratory courses at the Federal University of Alfenas, this project aimed to develop an automated device to perform the acquisition of temperature as a function of time, in four distinct positions on a heat exchanger.

The device was programmed in an Arduino to send the temperature measurements directly and simultaneously to a 16x2 LCD display and to Excel, where the temperature measurements were taken through a thermocouple, and they were amplified and converted to degrees Celsius by a module Max 6675.

The heat exchanger used in this study was a double tube and the inlet and outlet temperatures of the fluids in parallel and countercurrent flow were measured during the tests and with their measurements the Logarithmic mean temperature difference, the heat transfer rate and the Overall Heat Transfer Coefficient were calculated. Over the entire practice, water was used for both fluids and flow remained constant.

Given the above work, it was possible to conclude that the global heat transfer coefficient is more efficient in the countercurrent flow, as it presented a higher result for this regime when compared to the parallel one. It was also found that the thermocouple device showed positive results in terms of temperature variation and response time during the experiment.

Key-words: Double tube heat exchanger. Thermocouple. Overall Heat Transfer Coefficient.

Sumário

Sumário *7*

1. INTRODUÇÃO **10**

2. OBJETIVO **11**

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA **12**

3.1. Trocador de Calor 12

3.1.1. Classificação trocadores de calor de acordo com o processo de transferência 13

3.1.2. Classificação trocadores de calor de acordo com o tipo de construção 15

3.1.3. Média Logarítmica das Temperaturas 20

3.1.4. Operação em Paralelo 22

3.1.5. Operação em Contracorrente 23

3.2. Termopares 24

4. METODOLOGIA **26**

4.1. Módulo de monitoramento de temperatura 26

4.2. CÓDIGO ARDUINO 28

4.3. Calibração do modulo de monitoramento de temperatura 32

4.4. Trocador de Calor 33

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES **36**

5.1. Calibração termopares 36

5.2. Trocador de Calor 37

6. CONCLUSÃO **41**

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS **43**

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **43**

APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO E INTERFACE EXCEL ***45***

APÊNDICE B – TROCADOR DE CALOR ***50***

Figura 1: Classificação dos trocadores de calor.....13
Figura 2:Trocador de calor de contato direto.....14
Figura 3: Trocador de calor de contato indireto com transferência direta, Recuperador.....15
Figura 4:Trocador de calor de contato indireto, trocador de armazenamento. 15
Figura 5:Principais componentes Trocador de calor casco tubo. 17
Figura 6:Trocador de calor serpentina. 17
Figura 7: Arranjos de escoamento Paralelo em trocadores de tubo duplo e seu perfil de temperatura.....19
Figura 8: Ilustração Trocador de Calor tubo duplo com escoamento Paralelo. 19
Figura 9: Arranjos de escoamento Contracorrente em trocadores de tubo duplo e seu perfil de temperatura 19
Figura 10: Ilustração Trocador de Calor tubo duplo com escoamento contracorrente. 20
Figura 11: Distribuição de temperatura em um trocador duplo tubo.....22
Figura 12: Distribuição de temperatura para operações em Paralelo. 23
Figura 13:Distribuição de temperatura para operações em Contracorrente.....24
Figura 14:Princípio de funcionamento do Termopar 25
Figura 15: Correlação da f.e.m em função da temperatura. 25
Figura 16: Sensor Termopar 27
Figura 17: Dispositivo termopar inserido na entrada do trocador 27
Figura 18: Posição do termopar na parte interna da mangueira do trocador 28
Figura 19: Interface Excel 30
Figura 20: Circuito esquemático do projeto.....31
Figura 21: Dispositivo termopar montado no arduino.....31
Figura 22: Dispositivo termopar montado no arduino integrado no trocador. 32
Figura 23:Posicionamento dos sensores e do termômetro padrão durante a calibração.....33
Figura 24: Ilustração do trocador de calor utilizado no experimento 35
Figura 25: Aparato experimental 36
Figura 26: Gráficos de calibração dos sensores termopar. 37
Figura 27: Termômetro padrão usado na calibração do termopar 50
Figura 28: Bomba peristáltica utilizado no experimento. 50
Figura 29: Banho termostatizado 50

Tabela 1: Lista dos materiais do Dispositivo Termopar e seus valores cotados no dia 27 de maio de 2022.....28
Tabela 2: Valores experimentais de temperatura a uma faixa de 50°C a temperatura ambiente, para escoamento paralelo e contracorrente. 37
Tabela 3:Valores experimentais de temperatura a uma faixa de 70°C a temperatura ambiente, para escoamento paralelo e contracorrente. 38
Tabela 4: Valores experimentais de temperatura a uma faixa de 70°C a 7°C, para escoamento paralelo e contracorrente 38
Tabela 5: Valores da média com incerteza utilizadas nos cálculos. 39
Tabela 6: Valores obtidos para calor, MLDT e U no escoamento contracorrente 41
Tabela 7:Valores obtidos para calor, MLDT e U no escoamento paralelo 41

1. INTRODUÇÃO

A área sobre fenômenos de transporte é um conhecimento muito importante para a melhoria de processos de fabricação. Esse fenômeno tem importantes aplicações na engenharia, pois identificam e quantificam trocas de energia bem como transferência de massa em processos físico-químicos. A transferência de calor ocorre como resultado da diferença de temperatura entre duas regiões separadas por um meio. [Kakaç e Liu, 2002]. Portanto, os estudos práticos-experimentais de fenômenos de transferência de calor requerem conhecer a variação da temperatura ao longo do tempo em diferentes regiões da peça que sofre a troca de calor.

O trocador de calor é um dispositivo que realiza a transferência de calor entre dois fluidos que se encontram em diferentes temperaturas. Usualmente são construídos de forma a evitar a mistura entre o fluido quente e o frio através de uma parede sólida. Estes equipamentos são amplamente utilizados para aquecer e/ou esfriar meios a taxas determinadas em seu dimensionamento. [Kakaç e Liu, 2002]. Devido a sua importância, ensaios em trocadores de calor são amplamente abordados em aulas teóricas e práticas nos cursos de engenharia. Contudo os experimentos envolvendo trocador de calor dentro dos laboratórios de Engenharia da Universidade Federal de Alfenas, campus de Poços de Caldas enfrentaram dificuldade quanto a obtenção de valores precisos de temperatura, onde era utilizado de termômetros de baixa precisão e soltos para fazer a medição, necessitando de varias pessoas para auxiliar na medição, impossibilitando a prática confiável com relação as quantidades de calor envolvidas e obtendo valores em desacordo com o equacionamento teórico.

Uma forma interessante para contornar os problemas citados é o desenvolvimento de um dispositivo automatizado para realizar a aquisição da temperatura em função do tempo em diferentes posições do trocador de calor. Tais dispositivos podem ser encontrados no mercado com um custo na

ordem de R$200.000,00[1], valor demasiado e nem sempre disponível para equipar laboratórios didáticos. Uma alternativa razoável é o desenvolvimento de protótipos de baixo custo utilizando plataformas como o Arduino para este fim. No entanto, é imprescindível que estes protótipos sejam devidamente investigados considerando parâmetros operacionais como precisão, exatidão, tempo de resposta, estabilidade, entre outros, que são garantidos nos dispositivos obtidos com altos custos.

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um dispositivo para monitoramento em tempo real da temperatura em quatro posições distintas em um trocador de calor. O dispositivo foi equipado com quatro termopares tipo K, uma plataforma arduino para realizar a aquisição dos dados de temperatura e para comunicar em tempo real com uma planilha eletrônica em um computador. Este dispositivo foi instalado em um trocador de calor utilizado em aulas práticas no Laboratório de Engenharias da Universidade Federal de Alfenas. O trocador de calor foi testado em fluxo paralelo e contracorrente para diferentes temperaturas de entrada e saída. Para este estudo foi utilizado apenas água como fluido quente e frio.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Desenvolver um dispositivo para monitoramento online de temperatura em função do tempo e investigar sua aplicação em ensaios experimentais com trocadores de calor.

2.2. Objetivo específico

1 - Integrar um módulo equipado com plataforma Arduino com que realize a aquisição de dados de quatro termopares tipo K e que registre os valores das temperaturas em um display LCD e envie os dados para uma planilha eletrônica simultaneamente

2 - Calibrar indiretamente o dispositivo integrado utilizando um termômetro de referência

[1] Se trata de um valor obtido informalmente através de conversas com alguns professores e técnicos

3 – Integrar o módulo ao trocador de calor e realizar ensaios para validação observando seu comportamento em escoamento paralelo e contracorrente

a – Determinar a média logarítmica de temperatura (MLDT) para os escoamentos paralelo e contracorrente

b – Determinar a taxa de transferência de calor (Q)

c – Determinar o coeficiente global de transferência de calor (U)

d- Comparar a eficiência das duas correntes do trocador de calor utilizando o coeficiente global de transferência de calor (U).

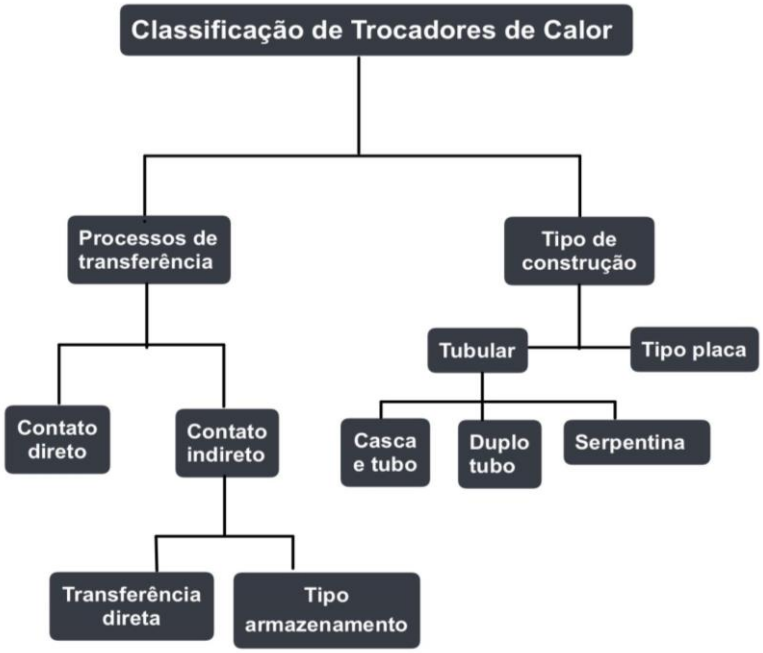
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1. Trocador de Calor

Trocadores de calor são equipamentos usados para realizar o processo de troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas, sendo utilizados para aquecer ou resfriar fluidos para usos diversos. Os trocadores são dispositivos projetados para promover o fluxo de energia térmica entre dois ou mais fluidos com diferentes temperaturas [Kakaç e Liu, 2002]. Se existe uma diferença de temperatura então haverá uma transferência de calor para tentar igualá-las.

Os trocadores de calor são classificados pelo tipo e forma em que realizam a troca térmica com base na sua construção [Delatore, 2011]. Dessa forma, podemos identificar três diferentes trocadores de calor, sendo ele de contato direto ou indireto, e também com relação às suas funções baseadas em sua construção e suas características [Lucas, 2014]. A Figura 1 apresenta esquematicamente a classificação de um trocador de calor.

Figura 1: Classificação dos trocadores de calor

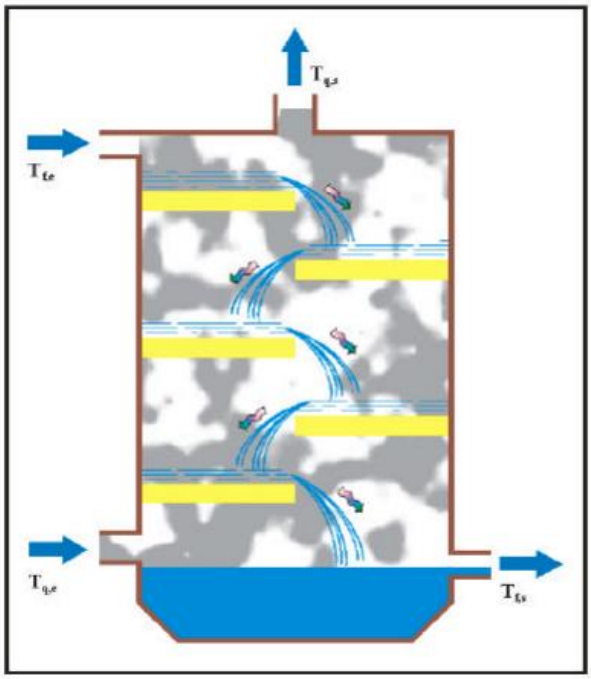


Fonte: Autor, 2022.

3.1.1. Classificação trocadores de calor de acordo com o processo de transferência

Trocadores de calor de contato direto, a transferência ocorre entre dois fluidos imiscíveis, como gás e um líquido, que entram em contato direto, utilizando correntes quentes e frias de duas fases na ausência de uma parede de separação (Lucas, 2014). A seguir a figura 2 representa um trocador de calor de contato direto.

Figura 2:Trocador de calor de contato direto.



Fonte: Lucas,2014.

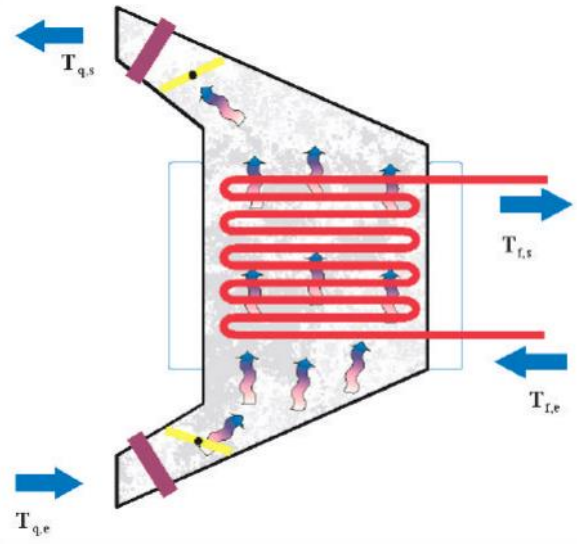
Em um trocador de calor de contato indireto, os fluidos permanecem separados e o calor é transferido continuamente através de uma parede, pela qual se realiza a transferência de calor. Classificam-se em: transferência direta e de armazenamento.

Transferência direta é designado como um trocador de calor de recuperação, ou simplesmente como um Recuperador. Neste tipo, há um fluxo contínuo de calor do fluido quente ao frio através de uma parede que os separa. Não há mistura entre eles, pois cada corrente permanece em passagens separadas.

Em um trocador de armazenamento, ambos os fluidos percorrem alternativamente as mesmas passagens de troca de calor. A superfície de transferência de calor geralmente é de uma estrutura chamada matriz. Em caso de aquecimento, o fluido quente atravessa a superfície de transferência de calor e a energia térmica é armazenada na matriz. Posteriormente, quando o fluido frio passa pelas mesmas passagens, a matriz “libera” a energia térmica (em refrigeração o caso é inverso). Este trocador também é chamado regenerador. (Lucas,2014).

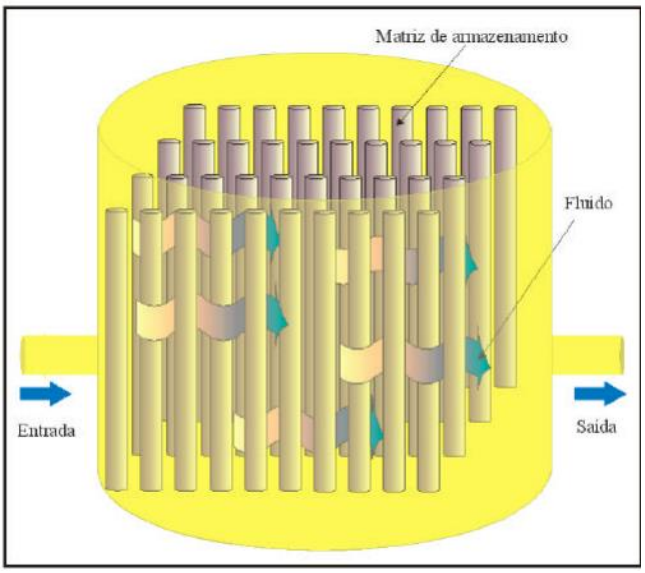
As figuras 3 e 4 esquematizam tanto um recuperador, transferência direta, quanto um armazenador, respectivamente.

Figura 3: Trocador de calor de contato indireto com transferência direta, Recuperador.



Fonte: Lucas,2014.

Figura 4:Trocador de calor de contato indireto, trocador de armazenamento.



Fonte: Lucas,2014.

3.1.2. Classificação trocadores de calor de acordo com o tipo de construção

Atualmente, é possível encontrar trocadores tubular, de placas, de superfície estendida e regenerativos. Outros modelos existem, mas os grupos principais são estes. No presente trabalho será abordado somente o modelo tubular que foi o utilizado para a realização da prática.

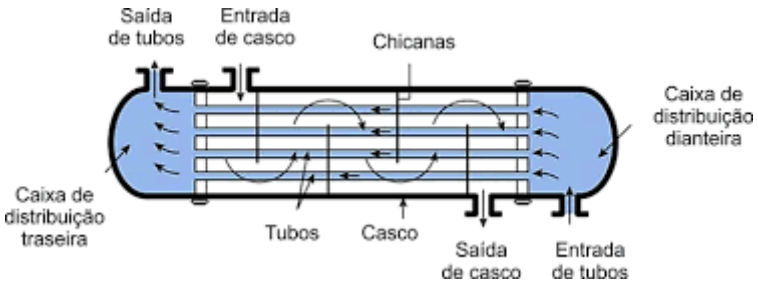
Eles geralmente são construídos com tubos circulares, existindo uma variação de acordo com o fabricante. São usados para aplicações de transferência de calor líquido/líquido (uma ou duas fases). Eles trabalham de maneira ótima em aplicações de transferência de calor gás/gás, principalmente quando pressões e/ou temperaturas operacionais são muito altas onde nenhum outro tipo de trocador pode operar. Estes trocadores podem ser classificados como carcaça e tubo, tubo duplo e de espiral.

A. Trocadores de carcaça e tubo

Como o nome sugere, este tipo de equipamento de troca térmica possui diversos tubos colocados paralelamente ao eixo longitudinal de um casco cilíndrico. A transferência de calor ocorre através da parede destes tubos, em que um fluido escoa por dentro deles e o outro percorre o exterior dos tubos ao longo da casca.

Trocadores de carcaça e tubo são os mais usados para quaisquer capacidades e condições operacionais, tais como pressões e temperaturas altas, atmosferas altamente corrosivas, fluidos muito viscosos, misturas de multicomponentes, etc. Estes são trocadores muito versáteis, feitos de uma variedade de materiais e tamanhos e são extensivamente usados em processos industriais. A figura 5 esquematiza um trocador de calor casca tubo e seus principais componentes.

Figura 5:Principais componentes Trocador de calor casco tubo.



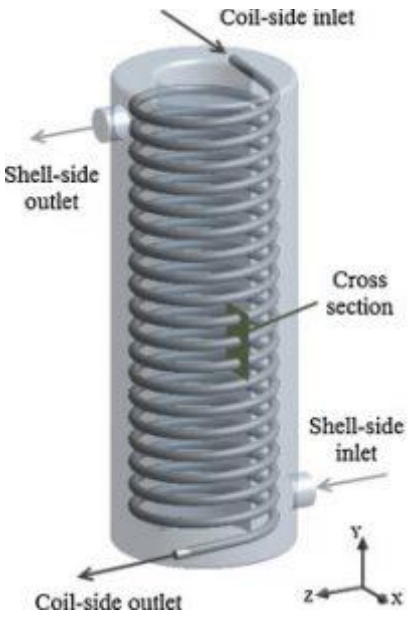
Fonte: Özisik,1990.

B. Trocador de calor em serpentina

O trocador de calor serpentina é construído com dois ou mais tubos circulares, sejam eles helicoidais ou em espiral. Suas paredes podem ser lisas ou aletadas dependendo da densidade do fluido.

Este tipo de trocador consiste em uma ou mais serpentinas (de tubos circulares) ordenadas em uma carcaça. A transferência de calor associada a um tubo espiral é mais alta que para um tubo duplo. Além disso, uma grande superfície pode ser acomodada em um determinado espaço utilizando as serpentinas. Esse modelo é aplicado como refrigerador, aquecedor ou condensador. A seguir a figura 6 esquematiza um trocador de calor serpentina.

Figura 6:Trocador de calor serpentina.



Fonte: Kakaç and Hongtan Liu,2002.

C. Trocador tubo duplo

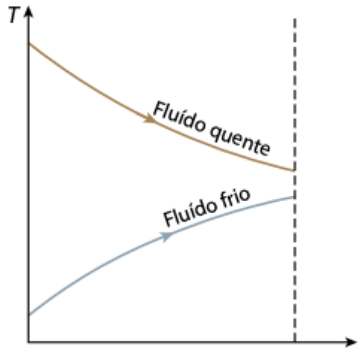
O modelo mais simples de trocador de calor é o chamado trocador de tubo duplo, que consiste essencialmente em um tubo que é montado concentricamente no interior de outro tubo de maior diâmetro. (Saunders,1988). Um dos fluidos escoa pelo tubo de diâmetro menor e o outro escoa pelo espaço anular entre os dois tubos, não há mistura entre os dois fluidos, de modo que a transferência de calor ocorre através da parede do tubo interno. (Kreith, 1977).

Segundo Saunders 1988, a utilização de trocadores de calor tubo duplo tem como ponto positivo permitir a operação em contra corrente, o que proporciona uma menor variação na diferença de temperatura dos fluidos ao longo do trocador. Para o autor este tipo de trocador deve ser considerado uma alternativa aos cascos tubulares.

Além disso, repare que duas formas de escoamento são possíveis: o escoamento paralelo, em que ambos os fluidos entram no trocador pela mesma extremidade ou o escoamento contracorrente, em que os fluidos entram no trocador por extremidades opostas entre si. Importante ressaltar que o desempenho e o funcionamento do trocador serão diferentes para os dois tipos de escoamento.

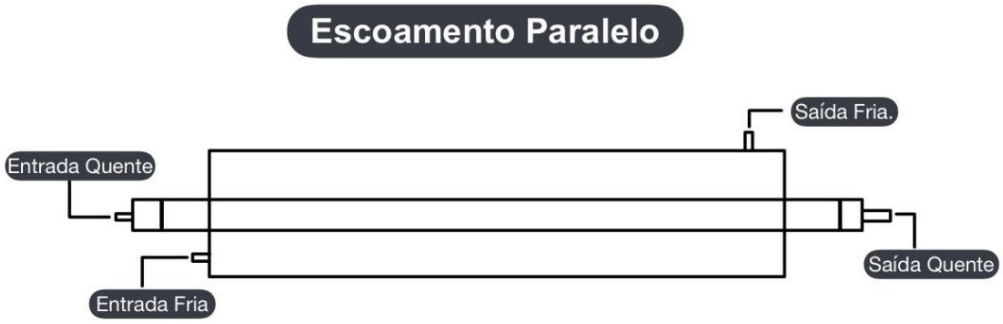
Para o escoamento paralelo, as temperaturas dos dois fluidos tendem a se aproximar e a diferença de temperatura ao longo do trocador diminui significativamente. Por outro lado, para o escoamento contracorrente, o fluido frio pode sair do equipamento mais quente do que o próprio fluido quente sai, e as diferenças de temperatura entre os dois fluidos ao longo do trocador apresentam menor variação. As Figuras 7 a 10 representam de forma simplificada estas duas situações. Nos diagramas de temperatura, repare que a seta nas curvas serve para indicar a direção dos escoamentos.

Figura 7: Arranjos de escoamento Paralelo em trocadores de tubo duplo e seu perfil de temperatura



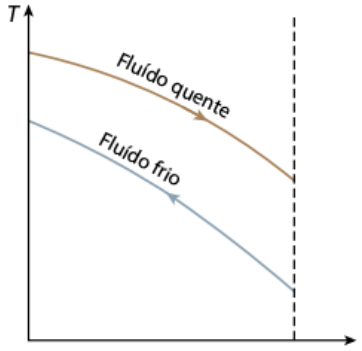
Fonte: Çengel e Cimbala, 2015, p. 630.

Figura 8: Ilustração Trocador de Calor tubo duplo com escoamento Paralelo.



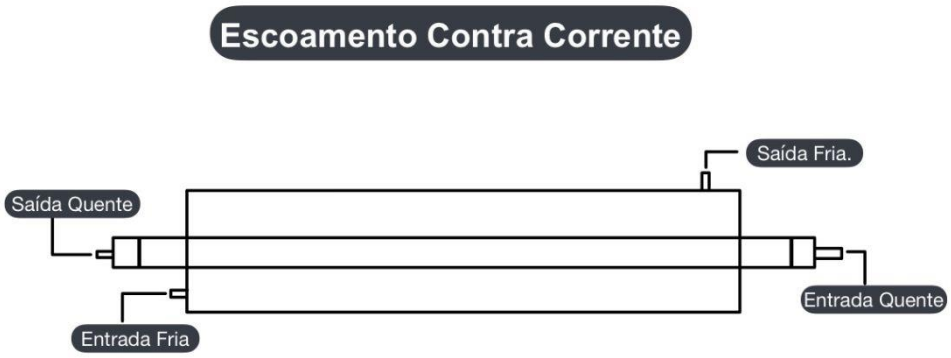
Fonte: Autor,2022.

Figura 9: Arranjos de escoamento Contracorrente em trocadores de tubo duplo e seu perfil de temperatura



Fonte: Çengel e Cimbala, 2015, p. 630.

Figura 10: Ilustração Trocador de Calor tubo duplo com escoamento contracorrente.



Fonte: Autor,2022.

Este é talvez o mais simples de todos os tipos de trocador de calor pela facilidade de construção, manutenção envolvida e ampliação da área de troca térmica. Geralmente, é usado em aplicações de pequenas capacidades.

3.1.3. Média Logarítmica das Temperaturas

Utilizando como exemplo um trocador de calor duplo tubo que opera em contracorrente, é possível identificar que o fluido com temperatura mais elevada percorre o interior do tubo, enquanto o fluido com temperatura mais baixa irá percorrer o espaço entre os tubos. Considerando que as condições dos fluidos são estacionárias, não ocorrerá alteração nas temperaturas com o tempo durante todo o escoamento. Para facilitar o entendimento do processo de troca térmica o fluido frio será denominado t, enquanto o quente será T. O comprimento do trocador é L e a área de troca é A. No nosso estudo, iremos considerar uma área elementar dA, de troca de calor, e depois integrar os resultados por toda a área.

São nossas hipóteses para a dedução da MLDT:

1. Regime permanente (vazões constantes);
2. Perdas de Calor Desprezíveis;
3. Calores específicos constante;
4. Não há mudanças de fases parciais (válido para troca de calor sensível e com condensação ou vaporização isotérmica em todos os pontos).
5. U constante ao longo do trocador;

6. A temperatura de cada fluido é constante em qualquer seção transversal.

O balanço de energia, no estado estacionário, para uma seção diferencial do trocador é representado pela equação (1)

$$dq = U.\Delta t.dA \quad (1)$$

Sendo:

- dq a quantidade de calor na área dA
- Δt a diferença de temperatura (T-t)
- U coeficiente global de transferência de calor

Baseando o U na área externa do tubo interno (A_O) (Araújo, 2002). Temos a equação (2):

$$U = \frac{1}{\frac{A_O}{h_i A_i} + \frac{\Delta r A_O}{k A_{ln}} + \frac{1}{h_o}} \quad (2)$$

Em que h é o coeficiente convectivo, k é a condutividade térmica, A_i é a área interna.

Se o calor específico de cada fluido é constante, ou puder ser representado por um valor médio no intervalo de variação de temperatura de cada fluido, a relação entre temperatura e o calor trocado é linear. Dessa forma, o mesmo ocorrerá com o Δt, sua relação com q também será linear. A equação (3) expressa essa relação.

$$Q = \dot{m}\,(Cp.\,\Delta T) \quad (3)$$

Esse comportamento é representado pela figura 11, em que as diferenças de temperatura nas extremidades do trocador são expressas pelas equações 4 e 5. (Araújo, 2002).

$$\Delta t_1 = T_1 - t_2 \quad (4)$$

$$\Delta t_2 = T_2 - t_1 \quad (5)$$

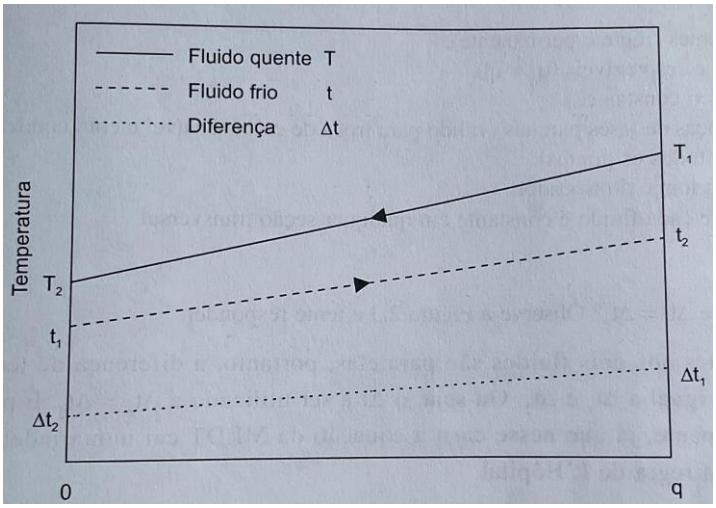
T_1: Temperatura de Entrada do fluido quente;

T_2: Temperatura de Saída do fluido quente;

t_1: Temperatura de Entrada do fluido frio;

t_2: Temperatura de Saída do fluido frio.

Figura 11: Distribuição de temperatura em um trocador duplo tubo.



Fonte: Araújo, 2002.

Derivando Δt e substituindo na equação (1) temos a equação (6):

$$\frac{d(\Delta t)}{dq} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{q} \qquad (6)$$

Integrando a equação (6) e considerando U constante, temos a equação (7):

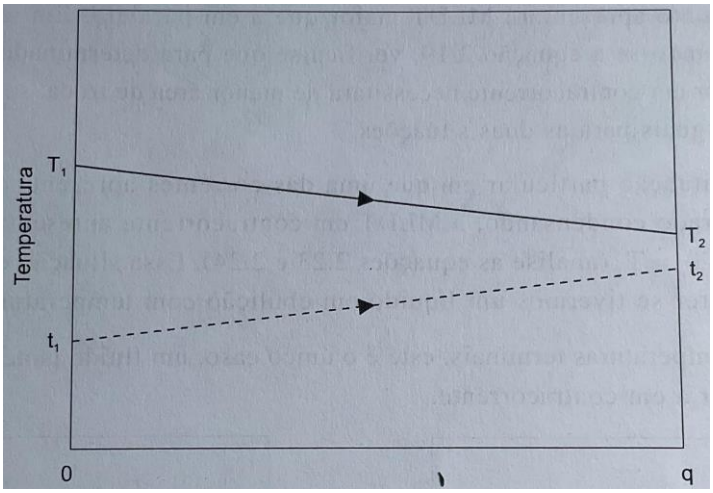
$$MLDT = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{ln(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2})} \qquad (7)$$

MLDT é a média logarítmica das diferenças de temperatura e Δt a diferença de temperatura entre os fluidos.

3.1.4. Operação em Paralelo

Ambos os fluidos entram no trocador de calor pela mesma extremidade e fluem através do trocador de calor na mesma direção. Na extremidade de entrada, a temperatura do fluido quente no tubo interno é a mais alta e a temperatura do fluido frio no tubo externo é a mais baixa. Portanto, esta diferença de temperatura entre os fluidos é a maior. Ao longo do dispositivo, essa diferença diminui. A distribuição de temperatura no trocador de calor é mostrada na figura 12.

Figura 12: Distribuição de temperatura para operações em Paralelo.



Fonte: Araújo, 2002.

No funcionamento em paralelo, não é possível obter uma temperatura de saída do fluido frio superior à temperatura de saída do fluido quente. (Araújo, 2002).

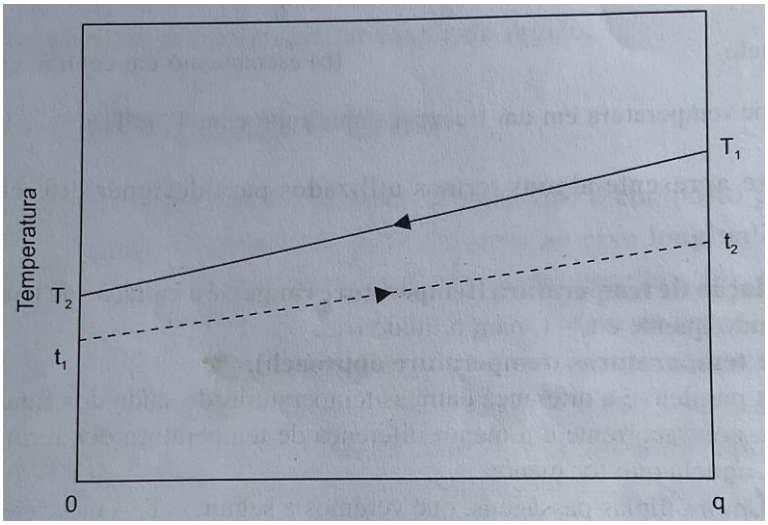
Usando a equação 6 para a operação do trocador no sentido da corrente paralela temos a equação (8):

$$MLDT = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{ln(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2})} \quad \text{para } \Delta t_1 = T_1 - t_1 \text{ e } \Delta t_2 = T_2 - t_2 \quad (8)$$

3.1.5. Operação em Contracorrente

Nesse tipo de escoamento, os fluidos entram no dispositivo por extremidades opostas, percorrendo-o em sentidos contrários. A diferença de temperatura entre os fluidos ao longo do trocador é mais homogênea do que na operação paralela. A distribuição de temperatura no trocador de calor é mostrada na figura 13 abaixo.

Figura 13:Distribuição de temperatura para operações em Contracorrente.



Fonte: Araújo, 2002.

Neste tipo de operação a temperatura de saída do fluido pode ser maior que a do fluido quente ($t_2 > T_2$). Para a operação do trocador no sentido contracorrente usamos a equação 6 como base, assim temos a equação (9) para regime contracorrente:

$$MLDT = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{ln(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2})} \quad \text{para } \Delta t_1 = T_1 - t_2 \text{ e } \Delta t_2 = T_2 - t_1 \quad (9)$$

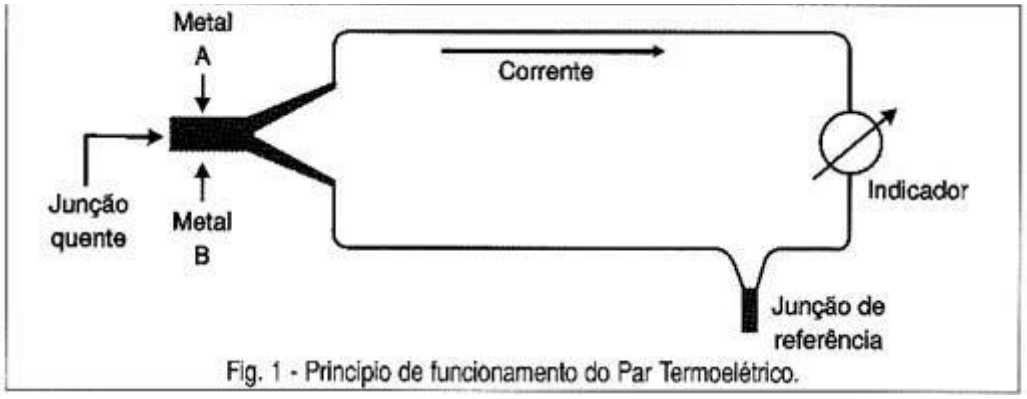
3.2. Termopares

O termopar é um tipo de sensor de temperatura, no qual uma de suas extremidades é constituída pela junção de dois metais diferentes. Este sensor possui diversas vantagens, tais como baixo custo, realização de medições confiáveis e construção relativamente simples e robusta.

Ao expor as juntas metálicas que compõe o termopar em diferentes temperaturas, os portadores de carga de cada metal passam a se mover de forma distinta, visto que possuem condutividades diferentes. Por esta diferença da capacidade dos portadores de carga se movimentarem, nestas juntas se observa uma pequena transferência de elétrons, que por sua vez, está associada a uma diferença de potencial. Este modo de operação ocorre-se pelo efeito de Seebeck, que consiste na união entre dois metais diferentes, no qual se os dois metais forem mantidos a temperaturas diferentes, surgirá uma diferença de potencial elétrico entre eles. (Seebeck,1821).

Pode-se realizar a medição da tenção dessa diferença de potencial, determinando, então, a temperatura em que a outra extremidade se encontra, ou seja, a extremidade com a junção dos dois metais, como mostra a figura 14, é possível notar que para a medida de temperatura, o dispositivo é ligado em série com uma segunda junção que serve de referência, sendo mantida numa temperatura mais baixa (junção de referência). O dispositivo formado pela junção dos dois metais serve então para a medida da temperatura e é denominado par termoelétrico. (Braga,2010).

Figura 14:Princípio de funcionamento do Termopar

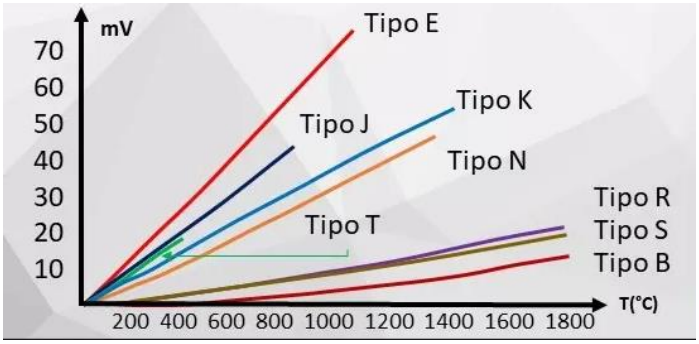


Fonte: Braga, 2010.

Existem diferentes tipos de termopares que possuem tipos de curva distintas. Os termopares são categorizados em três tipos: padronizado de metal nobre (R, S, B), padronizado de metal base (K, J, N, E, T) e não definido por letras.

A curva do termopar relaciona a tensão de saída com a temperatura do sensor, por isso cada modelo apresenta diferentes curvas de temperaturas, como mostra a figura 15. (Alves,2016).

Figura 15: Correlação da f.e.m em função da temperatura.



Fonte: Alves, 2016.

O tipo k, que é utilizado neste experimento, é formado por fios de Cromel (90% Níquel e 10% Cromo), como termoelemento positivo, e Alumel (95% Níquel e 5% Alumínio), como termoelemento negativo.
Ele realiza medições contínuas entre -200°C e 1260°C, e possui uma sensibilidade linear de aproximadamente 41µV/°C. (Alves,2016).

Este modelo é um instrumento de uso genérico, que pode ser usado tanto por técnicos quanto por profissionais sem muita experiência no monitoramento de temperatura.

De acordo com as necessidades para este estudo foi escolhido o modelo de termopar tipo K, por apresentar apresenta uma excelente resistência à oxidação em altas temperaturas e à corrosão em baixas temperaturas se comparado aos modelos E, J e T, além de possuir um baixo custo, resposta linear e disponibilidade em diversos tipos de montagens.

4. METODOLOGIA

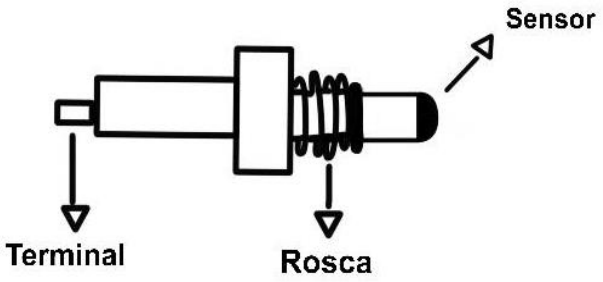
4.1. Módulo de monitoramento de temperatura

Um módulo para monitorar em tempo real a temperatura em função do tempo foi desenvolvido. O módulo é equipado com quatro termopares tipo K. Visto que a resposta típica de um termopar é um sinal de tensão na ordem de alguns milivolts, cada termopar foi equipado com um módulo Max6675 que tem a função de amplificar seu sinal antes de ser enviado para o Arduíno. O Arduíno foi programado para realizar a aquisição de dados de temperatura dos quatro termopares e enviar para uma planilha eletrônica em tempo real.

A escolha do modelo tipo K do termopar foi devido ao seu alto desempenho associado a seu baixo custo e pelo tamanho reduzido da ponta onde se faz a aferição da temperatura, conforme apresentado na Fig 16. Este tamanho reduzido é estratégico para evitar perdas de carga do fluído dentro das tubulações do trocador de calor. O alcance (range) do termopar utilizado varia linearmente entre -200 °C a 1260°C de acordo com informações do fornecedor.

A ponta do termopar foi instalada dentro de um adaptador, que foi furado no seu sentido lateral, este furo foi feito do diâmetro do dispositivo representado na figura 16 e fixado com silicone para altas temperaturas, com intuito de realizar uma vedação do sistema evitando vazamentos do fluido. O posicionamento do termopar foi feito de forma que a ponta responsável por efetuar as medições, ficasse posicionada no meio do adaptador, com objetivo de fazer uma aferição da temperatura do fluido de forma mais adequada e não obstruir a passagem do mesmo pela tubulação, como mostra as figuras 17 e 18.

Figura 16: Sensor Termopar



Fonte: Autor, 2022.

Figura 17: Dispositivo termopar inserido na entrada do trocador

Fonte: Autor, 2022.

Figura 18: Posição do termopar na parte interna da mangueira do trocador

Fonte: Autor, 2022.

Para a montagem do termopar foi utilizado os instrumentos descritos na tabela (1):

Tabela 1: Lista dos materiais do Dispositivo Termopar e seus valores cotados no dia 27 de maio de 2022.

Instrumentos	Valor médio (R$)
Arduino UNO c/ Cabo	99,9
Cabo USB 2.0 A/B para Arduino Uno	15,9
ProtoShield	29,9
Display LCD 16X2	42,9
Modulo I2C	12,9
Quatro termopares tipo K	29,9/ por unidade
Quadtro Módulos Max6675	35/ por unidade
Cabos Jumpers.	12,90/ 40 unidades
Excel	0
TOTAL	461,1

Fonte: Autor, 2022.

4.2. CÓDIGO ARDUINO

O Arduino foi programado na IDE (Integrated Development Environment) para enviar as medições de temperatura dos 4 termopares localizados nas entradas e saídas do trocador de calor para a tela Display

e simultaneamente para uma planilha no Excel, para realizar a conexão do arduino com o Excel, foi necessário criar um sistema de interface na planilha. Em anexo a este trabalho se encontra o código usado para a programação deste dispositivo e a planilha usada para a captação dos dados. O código pode ser conferido no anexo A

O sinal gerado pelos termopares foi tratado com uma placa que contém o circuito integrado MAX6675, responsável por amplificar e enviar digitalmente, via protocolo SPI (Serial Peripheral Interface), a leitura do elemento sensor. O termopar tipo K possui uma faixa de temperatura de operação grande. Porém, o mesmo não é válido para o circuito integrado MAX6675, o qual possui operação restrita a faixa de temperatura de -20°C até +85°C. (Maxim datasheet,2002). Logo, se o termopar estiver sujeito a uma faixa de temperatura fora da faixa de operação do circuito integrado MAX6675, deve haver uma isolação térmica entre ambos.

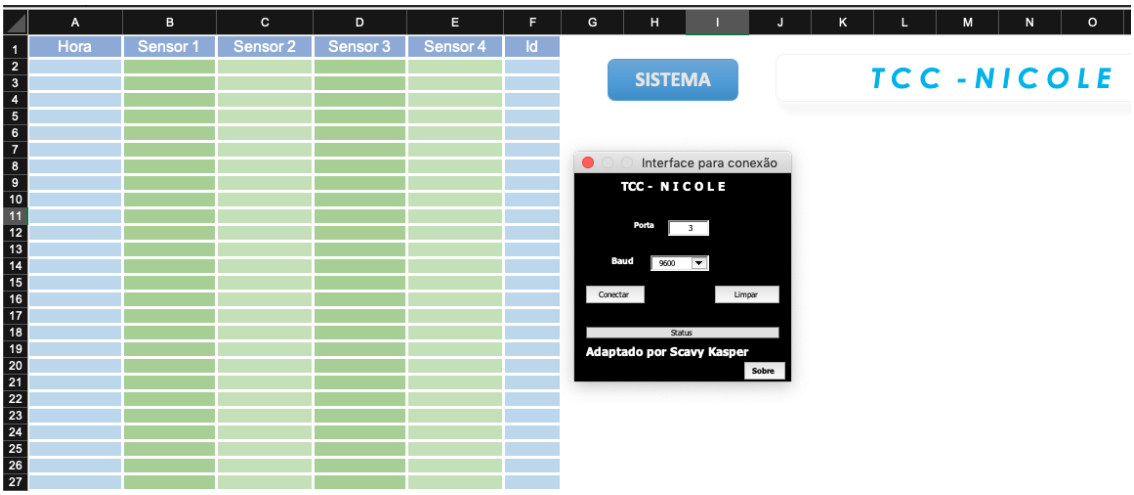
A leitura do termopar, é feita através da comunicação do Arduino com o circuito integrado MAX6675 é utilizada a biblioteca MAX6675.h, a biblioteca, além de comunicar com o amplificador, permite obter a temperatura lida já em graus Celsius, facilitando o uso de termopares em projetos com Arduino. A leitura de temperaturas é enviada pela serial, sendo possível portanto monitorá-la pelo display LCD (Liquid Crystal Display) e pela planilha do Excel através de uma macro.

O arduino ao receber os dados dos sensores termopar tipo K através do módulo MAX6675, envia esses dados para o computador via USB (Universal serial bus) usando comunicação serial contida na programação, Serial.print(sensorData). A programação limita até 200 linhas de escrita na planilha e depois faz um reset e reposiciona o cursor para o início da tabela. Esse limite pode ser ajustado para cada necessidade.

A planilha desenvolvida pela referencia (Kasper,2020) e modificada para adaptar a este trabalho dispõe de duas interfaces, retratadas na figura 19, sendo uma, um formulário desenvolvido com programação VBA (do inglês Virtual Basic for Applications) para Excel, para ajustes de porta, botão para limpar os dados da planilha, um para iniciar a coleta de dados na porta serial definida e um label, para indicar o status. A outra interface é a própria planilha, que contém um header a partir da célula A1 até a

célula F1 para estrutura dos dados. Os dados enviados pelo micro controlador Arduino para porta serial, são lidos pela programação VBA dessa planilha e inseridos inicialmente na célula A2. A planilha dispõe de um botão para abrir a interface de conexão. Trata-se uma imagem vinculada a macro da programação VBA.

Figura 19: Interface Excel

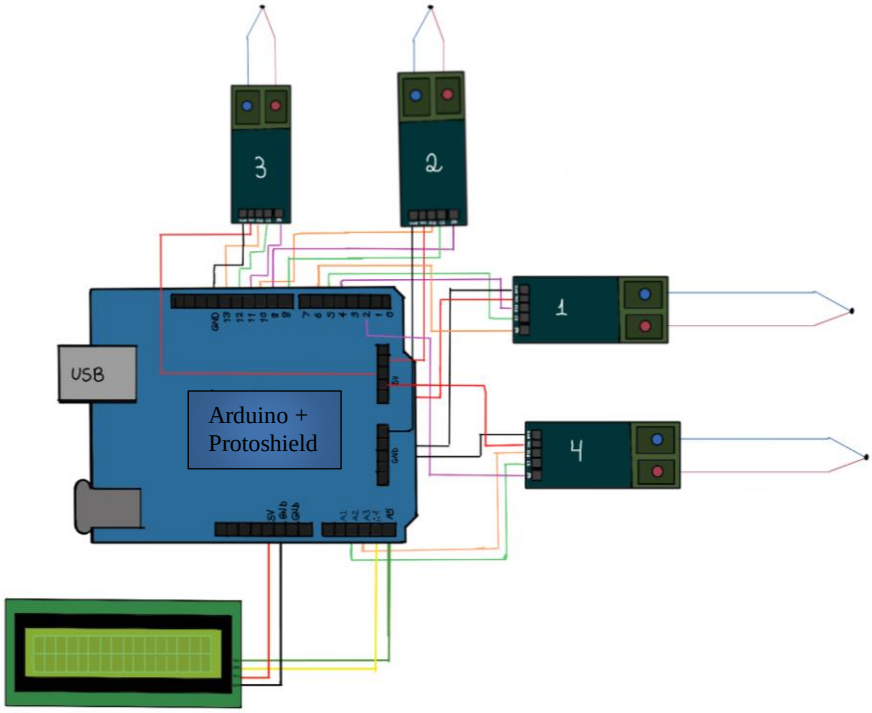


Fonte: Autor,2022.

O controle do display LCD com o módulo I2C foi feito utilizando-se a biblioteca LiquidCrystal_I2C, já disponível na IDE do Arduino, assim como utilizar a biblioteca Wire.h, responsável por conter as funções necessárias para gerenciar a comunicação entre os dispositivos através do protocolo I2C.

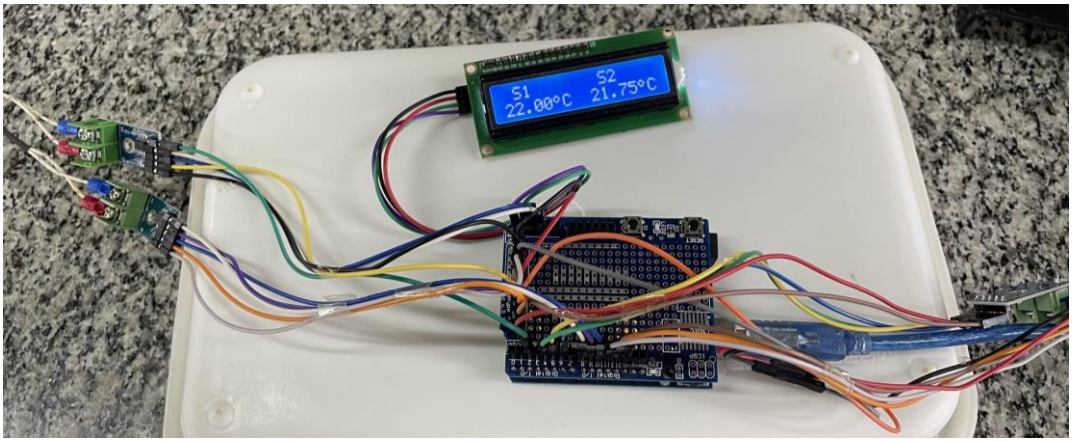
Com esse módulo, foi possível controlar um display LCD 16×2, utilizando apenas quatro pinos do Arduino: o pino analógico 4 (SDA) e o pino analógico 5 (SCL) e dois para alimentação ao invés de 16 pinos referentes ao display sem o módulo. As figuras 20 e 21 apresentam um esquema e uma foto desta montagem. A figura 22 apresenta uma foto deste módulo integrado ao trocador de calor.

Figura 20: Circuito esquemático do projeto



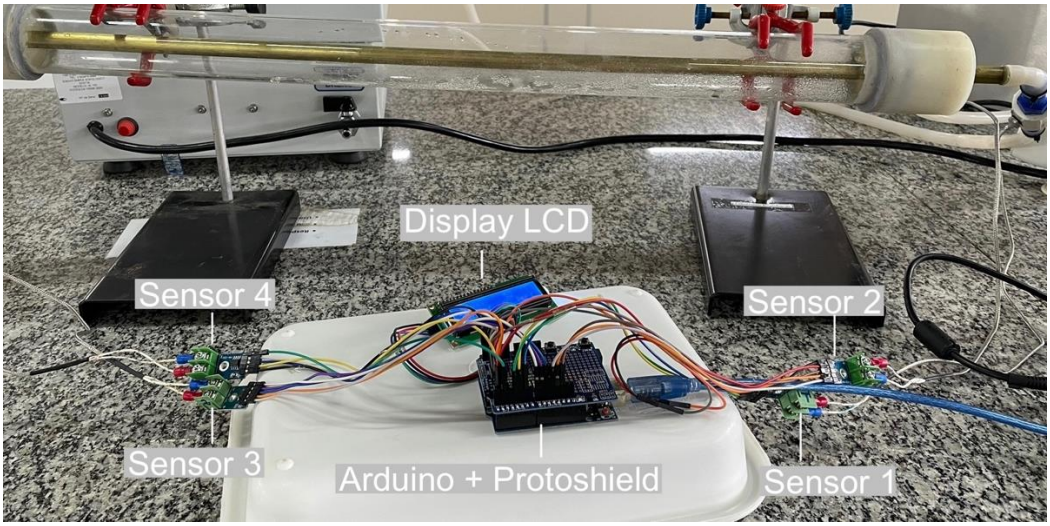
Fonte: Autor, 2022.

Figura 21: Dispositivo termopar montado no arduino



Fonte: Autor, 2022.

Figura 22: Dispositivo termopar montado no arduino integrado no trocador.



Fonte: Autor, 2022.

4.3. Calibração do modulo de monitoramento de temperatura

Os quatro termopares do módulo foram calibrados separadamente em comparação com outro termômetro de referência. Nesta etapa foi utilizado:

- Termômetro de coluna de mercúrio de -20°C à 250°C, considerado pelos usuários do laboratório o dispositivo mais preciso;
- Um Banho Sorológico SL-151 marca SOLAB para aquecer e manter a temperatura da água constante;
- Béquer com gelo;
- Termopar montado.

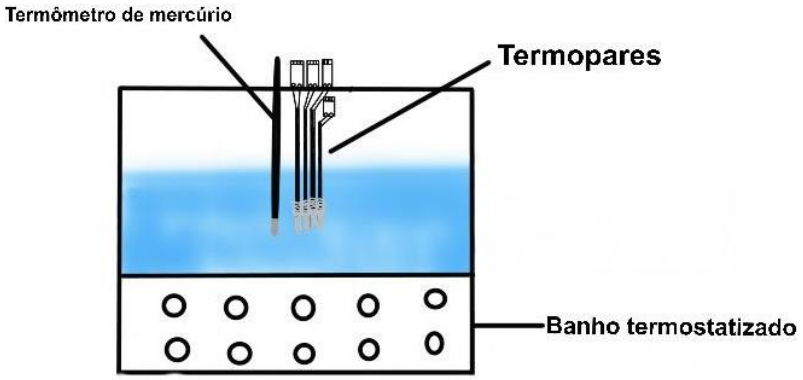
Utilizando um termômetro de mercúrio como padrão, foram medidas as temperaturas entre 1°C e 95°C com os 4 termopares e com o termômetro. Primeiramente foi medido a água quente do banho termostatizado, posicionando os 4 sensores perto do termômetro calibrado, a fim de obter uma medição mais correta. Em consideração a baixa taxa de variação de temperatura deste sistema cada ponto da temperatura foi medido em triplicata para obter um resultado com maior precisão minimizando o efeito de flutuações das medidas.

O mesmo procedimento foi realizado para a medição da água como fluido frio, tomando sempre cuidado com o posicionamento dos termopares para que ficassem próximos ao termômetro. A figura 23 representa o

posicionamento dos medidores de temperatura durante o procedimento de calibração com o fluido quente.

Os dados obtidos no módulo e no termômetro de referência foram comparados através de uma regressão linear para a obtenção do fator de correção. Adotou-se como incerteza a metade do menor incremento da régua de medida do termômetro de referência e o desvio padrão de uma triplicata de cada ponto experimental. Adotou-se o coeficiente de correlação R^2 como estratégia para avaliar a qualidade do ajuste

Figura 23:Posicionamento dos sensores e do termômetro padrão durante a calibração



Fonte: Autor, 2022.

4.4. Trocador de Calor

O trocador de calor de duplo tubo utilizado neste projeto foi confeccionado com material de vidro para o tubo externo, em virtude da sua baixa condutividade térmica, assim diminuindo a troca térmica do tubo de vidro com o ambiente. Para o tubo interno, utilizou-se o latão, visto que é um material de alta condutividade, baixa resistência térmica e possui bom resultado de troca térmica. A figura 22 apresenta uma foto do trocador de calor junto com o módulo.

O instrumento tem como medidas, diâmetro externo e interno do tubo maior, com material de vidro, igual a 4,48 cm e 4,98 cm, respectivamente e diâmetro externo do tubo menor, confeccionado de latão, igual a 1,28 cm. O comprimento do trocador é de 73,00 cm, resultando em uma área igual a $2{,}93\ x\ 10^{-2} cm^2$.

Após a calibração do termopar e das medições do trocador, foi fixado os medidores de temperatura nos tubos das duas entradas do trocador e das duas saídas e logo após deu-se início ao experimento utilizando:

- Duas bombas peristálticas SL-64 da marca SOLAB para controlar a vazão do fluido quente e do frio;
- Um Banho Sorológico SL-151 marca SOLAB para manter a temperatura do fluido quente constante;
- Mangueiras de silicone para interligar o sistema com as Bombas, o Banho e os fluidos;
- Termopar para medição das temperaturas;
- Dois suportes e duas garras para manter o sistema suspenso diminuindo as trocas térmicas com outros materiais.

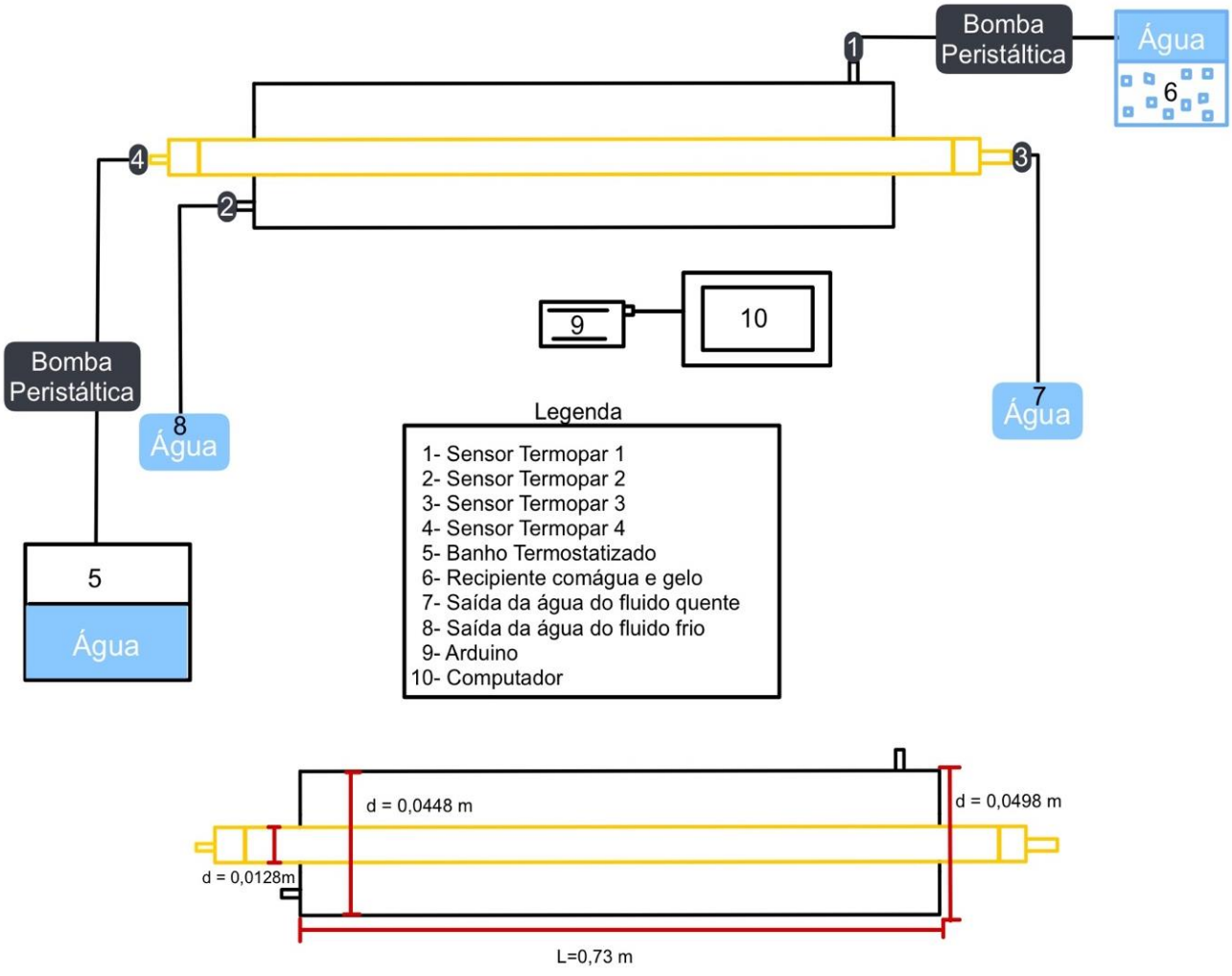
Utilizou-se água como fluído padrão tanto para o tubo externo de vidro, quanto para o interno de latão, devido a sua alta facilidade de manuseio. Para minimizar a troca de calor do tubo externo de vidro com o ambiente, colocou-se o fluido frio na parte externa e o quente no tubo interno de latão. Diante disto, como o vidro já possui uma baixa condutividade térmica, juntamente com a água fria, minimiza-se as trocas térmicas do tubo externo com o ambiente, sendo assim é possível desprezá-las em nossos cálculos.

Ao iniciar o experimento, ligou-se o Banho Sorológico à 50°C com capacidade de 15 litros, para manter o fluido quente a uma temperatura constante, e aguardou a estabilização da temperatura. Para o fluido frio, utilizou-se um recipiente de 20 litros com água em temperatura ambiente. A seguir, ligou-se as duas bombas peristálticas sendo uma para cada fluido, a uma vazão para fluido quente de 230ml/min e para o fluido frio 218ml/min. Foi escolhido o sentido da corrente e aguardou-se até que os dois tubos do trocador de calor estivessem cheios com os fluidos quente e frio. Em seguida conectou-se o USB do arduino no computador e pressionou o botão de conectar. Desta forma, as medidas de temperatura iniciaram-se de forma imediata. Para a obtenção de valores confiáveis de temperatura, foi necessário esperar até que os termopares se estabilizem e também aguardar que o trocador de calor entrasse em regime estacionário para, em seguida, começar a coleta das temperaturas. Após estabilizado, foi coletado as

temperaturas de 15 em 15 segundos durante 5 minutos em corrente paralela e depois o mesmo período para contra corrente.

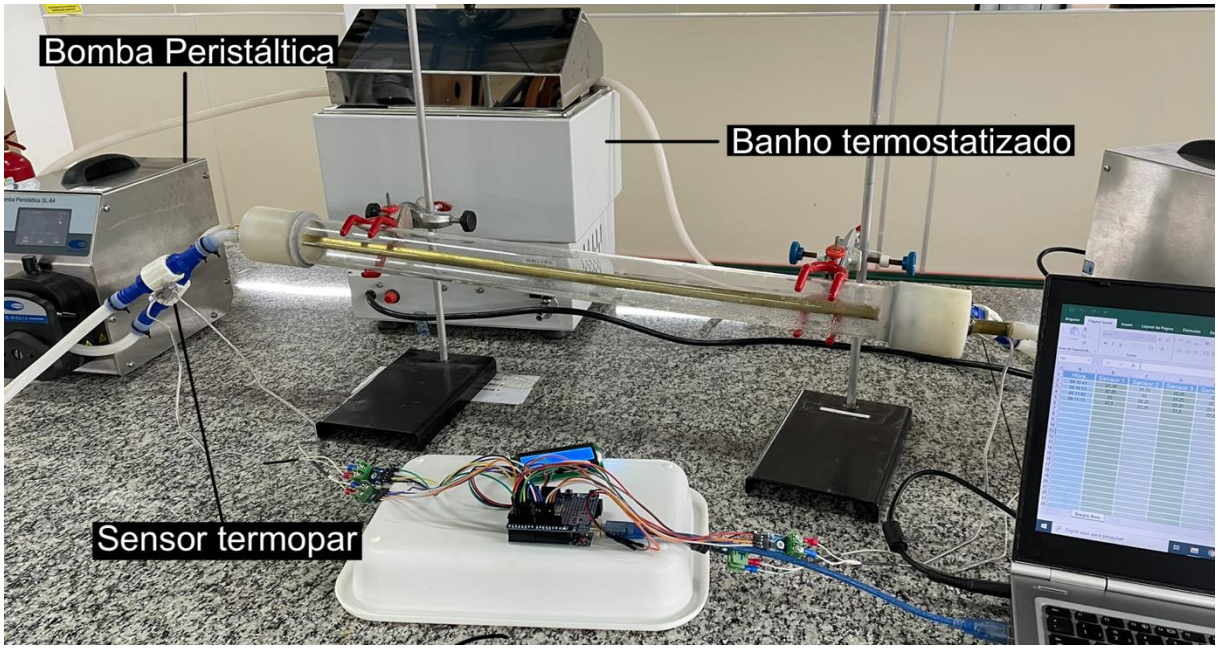
Em seguida, realizou-se o mesmo processo para temperaturas do fluido quente a 70°C e do frio com temperatura ambiente. Por fim, finaliza-se com fluido quente a 70°C e do frio a 4°C. A vazão foi mantida em 230 ml/min e 218ml/min durante todo o experimento. A figura 24 e 25 apresentam um esquema e uma foto do trocador de calor utilizado no experimento e suas medidas.

Figura 24: Ilustração do trocador de calor utilizado no experimento



Fonte: Autor, 2022.

Figura 25: Aparato experimental



Fonte: Autor, 2022.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Calibração termopares

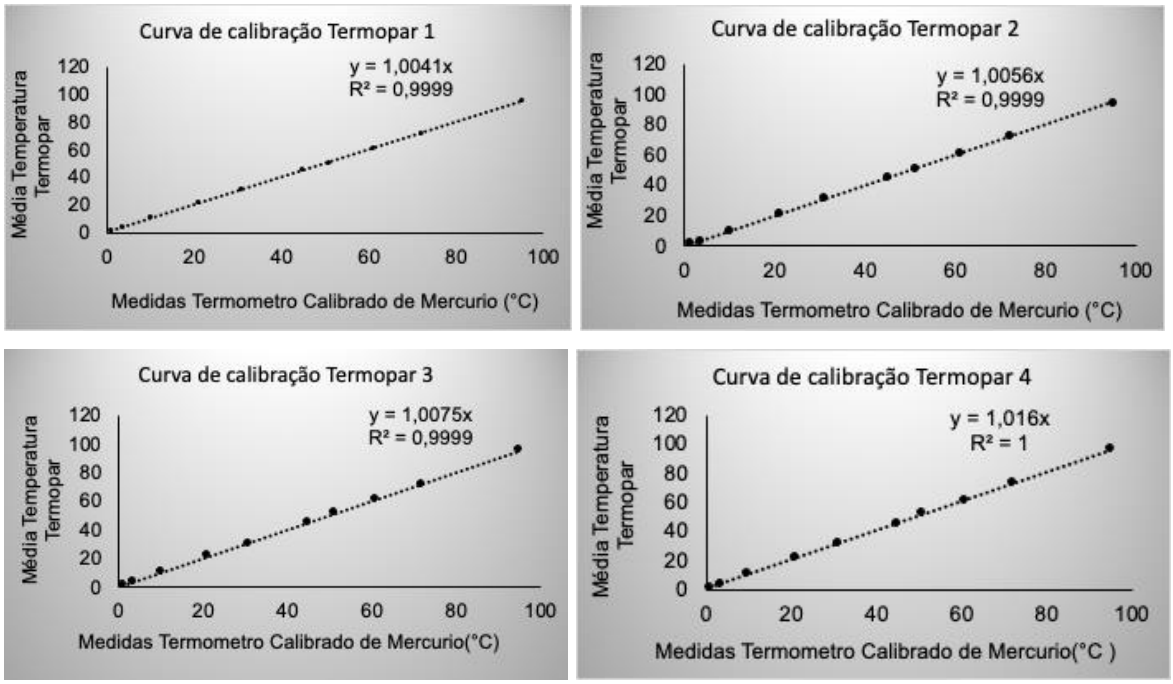
A figura 26 apresenta as curvas de calibração dos quatro termopares separadamente. Observou-se que as medidas de temperatura feitas pelo termopar estão apresentando uma linha de tendência linear como o esperado e com um coeficiente de determinação múltipla para a regressão múltipla muito próximo de 1, sendo assim as medidas feitas pelo sensor estão muito próximas da temperatura do termômetro calibrado.

A partir disso, o termopar foi ajustado de acordo com o fator de correção (Y) correspondente a cada sensor individualmente, contendo valores de 1,0041x a 1,016x. Com isso foi possível obter medidas mais confiáveis para o experimento a seguir.

O termômetro utilizado para calibração possui uma incerteza de ±0,5 e ela foi incluída nos cálculos assim como as incertezas estatísticas das medidas, como mostra a equação (10). Esses cálculos foram realizados a fim de obter uma maior precisão das medidas dos cálculos do experimento. As incertezas resultantes variaram entre ±0,5 e ±0,7.

$$\delta^2 = \delta^2_{estatistica} + \delta^2_{instrumental} \qquad (10)$$

Figura 26: Gráficos de calibração dos sensores termopar.



Fonte: Autor,2022.

5.2. Trocador de Calor

Após realizada a calibração foi iniciado a prática com o Trocador de Calor tubo duplo, as aferições dos valores de temperaturas foram feitas durante 5 minutos anotando o valor em um intervalo de 30 segundos, as primeiras 10 medidas foram descartadas considerando que o trocador não estava em regime estacionário. As tabelas (2), (3) e (4) apresentam uma comparação das temperaturas em corrente paralela e contracorrente.

Tabela 2: Valores experimentais de temperatura a uma faixa de 50°C a temperatura ambiente, para escoamento paralelo e contracorrente.

Contracorrente (50°C-amb)	Entrada Fria	Saída Fria	Entrada Quente	Saída Quente	Paralelo (50°C-amb)	Entrada Fria	Saída Fria	Entrada Quente	Saída Quente
1	21,8	30,3	44,3	37,8	**1**	21,8	29,0	43,3	37,8
2	21,8	30,3	44,3	37,3	**2**	22,0	29,0	43,3	37,3
3	22,0	29,8	44,5	37,3	**3**	21,8	28,3	43,5	37,0
4	22,0	30,5	43,5	37,8	**4**	22,3	28,8	43,5	36,8
5	22,0	30,3	44,0	37,8	**5**	21,8	29,0	43,0	37,3
6	22,0	30,3	44,3	37,8	**6**	22,0	28,8	43,0	37,0
7	22,0	30,0	44,3	37,3	**7**	21,5	28,8	43,8	37,0
8	21,8	30,0	44,3	37,8	**8**	22,3	28,3	43,0	37,8
9	21,8	30,5	44,0	37,5	**9**	22,0	29,0	43,3	37,8
10	22,0	30,3	44,3	37,3	**10**	22,3	28,5	43,3	37,8
Média	**21,9**	**30,2**	**44,2**	**37,5**	**Média**	**22,0**	**28,7**	**43,3**	**37,3**
Desvio	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,2**	**Desvio**	**0,3**	**0,3**	**0,2**	**0,4**

Fonte: Autor,2022.

Tabela 3:Valores experimentais de temperatura a uma faixa de 70°C a temperatura ambiente, para escoamento paralelo e contracorrente.

Contracorrente (70°C-amb)	Entrada Fria	Saída Fria	Entrada Quente	Saída Quente	Paralelo (70°C-amb)	Entrada Fria	Saída Fria	Entrada Quente	Saída Quente
1	24,5	41,3	68,8	52,3	**1**	22,8	37,5	65,5	49,8
2	24,8	41,0	68,8	52,0	**2**	22,8	37,3	65,5	49,8
3	24,0	41,5	68,5	51,5	**3**	23,0	37,3	65,0	50,0
4	24,3	41,8	68,8	52,3	**4**	22,5	37,3	65,5	50,0
5	24,8	41,0	68,8	52,5	**5**	22,8	37,5	66,3	49,8
6	24,3	41,5	68,8	52,0	**6**	23,0	37,5	65,8	49,8
7	24,0	41,3	68,8	52,3	**7**	22,8	38,3	65,8	49,8
8	24,5	41,5	68,8	52,3	**8**	23,0	37,5	65,5	49,8
9	24,8	41,5	68,5	52,3	**9**	23,3	37,8	65,8	49,8
10	24,8	41,5	68,7	52,5	**10**	23,8	37,0	65,5	49,8
Média	**24,5**	**41,4**	**68,7**	**52,2**	**Média**	**23,0**	**37,5**	**65,6**	**49,8**
Desvio	**0,3**	**0,2**	**0,1**	**0,3**	**Desvio**	**0,3**	**0,3**	**0,3**	**0,1**

Fonte: Autor,2022.

Tabela 4: Valores experimentais de temperatura a uma faixa de 70°C a 7°C, para escoamento paralelo e contracorrente

Contracorrente (70-7)°C	Entrada Fria	Saída Fria	Entrada Quente	Saída Quente	Paralelo (70-7)°C	Entrada Fria	Saída Fria	Entrada Quente	Saída Quente
1	8,0	32,8	68,8	40,8	**1**	7,0	26,8	65,0	39,0
2	8,0	33,0	68,8	40,0	**2**	7,0	26,5	65,0	39,8
3	7,8	33,0	69,0	40,5	**3**	6,3	26,8	65,3	39,8
4	7,5	32,8	69,0	40,0	**4**	7,0	26,8	65,8	39,8
5	7,5	33,0	69,0	40,5	**5**	6,8	26,8	65,3	39,5
6	7,5	33,0	69,0	40,8	**6**	6,8	26,8	65,0	39,5
7	7,8	32,8	68,8	40,8	**7**	6,8	26,5	65,5	39,5
8	7,8	33,0	69,0	40,3	**8**	6,8	26,3	65,0	38,8
9	7,8	33,0	69,0	40,5	**9**	6,3	26,5	65,0	39,0
10	7,8	33,0	69,0	40,5	**10**	6,5	26,8	65,0	38,8
Média	**7,7**	**32,9**	**68,9**	**40,5**	**Média**	**6,7**	**26,6**	**65,2**	**39,3**
Desvio	**0,2**	**0,1**	**0,1**	**0,3**	**Desvio**	**0,3**	**0,2**	**0,3**	**0,4**

Fonte: Autor,2022.

Os valores de temperatura de entrada da tabela (2) foram aquecidos pelo banho termostatizado a 50°C para o fluido quente, mas entraram no sistema a uma media de temperatura de 44°C contracorrente e 43°C paralelo, podendo notar que há uma perda para a vizinhança. O fluido frio foi utilizado temperatura ambiente.

Os valores de entrada das tabelas (3) e (4) foram aquecidas a 70°C e entraram no sistema com uma média de 68°C contracorrente e 65°C paralelo, assim como no caso anterior foi possível notar a perda calor.

Na tabela (3) o fluido frio se manteve entrando a temperatura ambiente, já na tabela (4) o fluido foi esfriado com gelo a uma temperatura de 7°C, portanto deve-se considerar as limitações laboratoriais para o esfriamento do fluido, apresentando assim as variações de 1°C de uma entrada para outra.

Em seguida, com as medidas das quatro entradas do trocador de calor obtidas, foi calculada a média e o desvio padrão destes valores e foi aplicado o fator de correção (y) correspondente a cada sensor de acordo com o gráfico de calibração. A tabela (5) apresenta os valores médios com o fator de correção aplicado.

Tabela 5: Valores da média com incerteza utilizadas nos cálculos.

Contracorrente	Entrada Fria	Saída Fria	Entrada Quente	Saída Quente
temp 50-amb	Media ±0,5	Media ±0,6	Media ±0,6	Media ±0,6
	21,9	30,4	44,9	37,7
temp 70-amb	Media ±0,6	Media ±0,6	Media ±0,6	Media ±0,5
	24,6	41,6	69,8	52,4
temp 70-4	Media ±0,5	Media ±0,5	Media ±0,5	Media ±0,6
	7,8	33,1	70,0	40,6
Paralelo	**Entrada Fria**	**Saída Fria**	**Entrada Quente**	**Saída Quente**
temp 50-amb	Media ±0,6	Media ±0,6	Media ±0,6	Media ±0,6
	22,1	28,9	43,5	37,9
temp 70-amb	Media ±0,6	Media ±0,6	Media ±0,6	Media ±0,6
	23,1	37,7	65,9	50,6
temp 70-4	Media ±0,6	Media ±0,5	Media ±0,6	Media ±0,7
	6,8	26,8	65,4	40,0

Fonte: Autor,2022.

Utilizando a média das temperaturas de entrada e saída quente e entrada e saída fria, expressas na tabela (5), calculou-se a média logarítmica das temperaturas.

Primeiramente foi utilizado a equação (8) para determinar os valores para o escoamento em paralelo das três faixas de temperatura e em seguida com a equação (9) foi calculada a operação em sentido contracorrente. Segue a tabela com os valores medidos da temperatura durante o experimento.

Como podemos notar na tabela (5) os valores obtidos no escoamento paralelo entram a uma diferença de temperatura grande e durante o experimento com a troca térmica essa diferença diminui. Enquanto o escoamento contracorrente a diferença de temperatura é mantido durante toda a troca, mantendo um comportamento mais homogêneo do que na operação paralela.

Note também que como dito no tópico 3.1.5 na operação em contracorrente a temperatura de saída do fluido frio poderia ser superior a saída do fluido quente. Observa-se através da tabela (5) que isto não aconteceu no experimento em questão, mas a diferença das temperaturas de saída do fluxo contracorrente foi pequena quando comparada a corrente paralela. Isto torna a operação em contracorrente muito mais vantajosa, pois a quantidade de calor transferida entre os fluidos é maior.

Para calcular a taxa de transferência de calor (Q) foi necessário relacionar a vazão volumétrica e a densidade para obter a vazão mássica, para isto utilizamos a fórmula (11). A densidade utilizada nesta equação foi 988 $\frac{kg}{m^3}$.

$$\dot{m} = \rho \; x \; v \qquad (11)$$

onde $\dot{m}$ é a vazão mássica, ρ é a densidade da água e v a vazão volumétrica.

Em seguida efetuou-se um balanço da energia global para um dos fluidos, quente ou frio, que neste caso como não passam por mudança de fase, pode ser feito com a utilização da equação (3). A taxa de transferência de calor foi calculada somente com o fluido quente no tubo interno, porque quando comparado com o fluido frio no tubo externo apresenta uma menor perda de calor para o ambiente.

O calor especifico utilizado na expressão é referente ao calor especifico na temperatura resultante da média da entrada e saída do fluído quente.

Após calcular a taxa de transferência de calor do trocador é possível descobrir o coeficiente global de transferência de calor utilizando a equação (12).

$$U = \frac{Q}{A.\Delta T_{MLDT}} \qquad (12)$$

Onde U é o coeficiente global de transferência de calor, A é a área externa do tubo interno de latão e ΔT a média logarítmica.

As tabelas 6 e 7 abaixo contém os resultados dos cálculos da média logarítmica (ΔT_{MLDT}), taxa de transferência de calor(Q) e coeficiente global de transferência de calor(U).

Tabela 6: Valores obtidos para calor, MLDT e U no escoamento contracorrente

Contracorrente	MLDT	ρ(kg/m3)	ṁ(kg/seg)	Cp(j/kg.K)	Q (W)	U (W/m3.K)
temp 50-amb	**(Δt1-Δt2)/ln(Δt1/Δt2)**		**ṁ=ρ x v**	**41**℃	**Q=** $\dot{m}\ Cp.\ \Delta T$	**U=Q/(A.ΔTMLDT)**
	15,1	988,0	0,0038	4179,0	112,6	256,9
temp 70-amb				**61**℃		
	28,0	988,0	0,0038	4185,0	273,5	337,1
temp 70-4				**55**℃		
	34,8	988,0	0,0038	4183,0	461,9	457,2

Fonte: Autor,2022.

Tabela 7:Valores obtidos para calor, MLDT e U no escoamento paralelo

Paralelo	MLDT	ρ(kg/m3)	ṁ(kg/seg)	Cp(j/kg.K)	Q (W)	U (W/m3.K)
temp 50-amb	**(Δt1-Δt2)/ln(Δt1/Δt2)**			**40**℃		
	14,3	988,0	0,0033	4179,0	76,3	183,8
temp 70-amb				**55**℃		
	24,9	988,0	0,0033	4183,0	208,7	288,6
temp 70-4℃				**50**℃		
	30,5	988,0	0,0033	4181,0	346,2	392,0

Fonte: Autor,2022.

Comparando os resultados do coeficiente global de transferência de calor da tabela (6) com a (7) é possível afirmar que assim como a literatura os coeficiente em fluxo contracorrente são maiores que na corrente paralela, tornando o trocador mais eficiente em contracorrente. Contudo podemos considerar que a diferença em questão neste trabalho é pequena sendo assim razoável também trabalhar com o fluxo paralelo.

6. CONCLUSÃO

Levando em conta que o Dispositivo de medição de temperatura utilizado foi um protótipo, atrelado a custos, o estudo do trocador de calor tudo duplo utilizando o termopar, apresentou resultados positivos quanto a variação da temperatura e tempo de resposta, como é apresentado nas tabelas 1, mantendo

uma medição constante durante todo o experimento. Sendo assim uma alternativa viável para uso em laboratório considerando sua resposta confiável e seu valor financeiro em torno de R$ 460,00.

Os resultados para os dois diferentes escoamentos apresentaram uma boa estabilidade, contudo deve-se levar em consideração que as condições laboratoriais, climáticas assim como dos equipamentos utilizados, afetam negativamente os resultados obtidos. É importante ressaltar que o dispositivo termopar desenvolvido neste estudo, pode ser usado em qualquer modelo de trocador de calor, apenas sendo necessário instala-lo nas entradas e saídas do trocador de calor escolhido.

A partir dos dados de temperatura coletados, foi possível calcular os valores da média logarítmica, que apresentou um comportamento alinhado com a literatura, onde o escoamento paralelo apresentou uma diferença de temperatura maior inicialmente e foi diminuindo ao longo do experimento, enquanto a contracorrente se manteve em uma diferença de temperatura mais homogênea. Além disso a operação em contracorrente apresentou uma diferença das temperaturas de saída bem pequena quando comparada ao paralelo, o que torna essa corrente muito mais vantajosa, pois a quantidade de calor transferida entre os fluidos é maior.

Com os dados das medias logarítmicas e taxa de transferência de calor calculou-se o coeficiente global de transferência de calor. Ele apresentou um maior coeficiente para o regime contracorrente quando comparado com o paralelo. Considerando as perdas de calor por convecção para a vizinhança, pode-se concluir que o regime contracorrente em um trocador de calor tubo duplo é mais eficiente que o paralelo.

Conclui-se ainda que para a utilização do trocador com o dispositivo termopar para estudos em laboratório não se faz necessário uma faixa de temperatura muito alta, como foi mostrado neste trabalho, os valores calculados para as correntes a 50 graus e temperatura ambiente foram satisfatórios, dispensando assim o fluido frio e uma temperatura muito elevada para o fluido quente.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o decorrer do trabalho, pode-se notar alguns pontos a serem estudado com o sistema.

- Sugere-se a utilização de outros tipos de fluidos, com propriedades diferentes dos fluidos do presente estudo;
- Ampliar as faixas de temperaturas estudadas.
- Realizar o experimento sem um isolamento do sistema e calcular suas perdas de calor para a vizinhança e em seguida isolar o sistema.
- Instalar o dispositivo Termopar em outro modelo de trocador de calor, citados nos tópicos 3.1.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, Pedro. Manual da Eletrônica, o são termopares? Funcionamentos, tipo., 2016. <https://www.filipeflop.com/blog/como-usar-o-termopar-tipo-k-com-arduino>

ARAÚJO, E. C. da Costa. *Trocadores de calor, Série Apontamentos*. Editora da Universidade Fedderal de São Carlos, UFSCAR, São Carlos, 2002.

Essel, Engenharia. Trocador de calor. EsselEletromecanica LTDA. Disponível em <https://essel.com.br/cursos/> . Acesso mar 2021.

Baraldi, Aline. *Monitoramento do desempenho térmico de trocadores de calor duplo tubo de uma planta slurry.* Universidade federal do rio grande do sul. Porto alegre, 2011.

Braga, Newton C.; Pares Termoelétricos. Instituto NCB-2010.

ÇENGEL, Yunus A. *Tranferência de calor e massa: uma abordagem prática.* Tradução da 3ª Ed. Americana. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.

Harold E. Soisson Harold E,; Instrumentação Industrial – Hemus, 2000.

INCROPERA, Frank P.; DE WITT, David P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002

Kakaç, S; Lou. H. “Heat Exchangers Selection, rating and thermal design”. CRC Press, 2nd edition, 2002.

Kreith, Frank. *Principios da transmissão de calor.* Editora Edgard Blücher LTDA. 1977.

LUCAS, D. H. Paiva. *Trocador de calor tubular: construção e funcionamento.* Centro Universitário do Sul de Minas – Unis/MG. Varginha, 2014.

Özisik,M.N.: Transferência de calor, editora Guanabara koogan S.A,1990

SAUNDERS, E. A. D *Heat Exchangers: Selection, Design & Construction. Harlow (UK): Longman S. &T., 1988. In: GUT, J. A. W. Configurações ótimas para trocadores de calor a placas. 244 f.* Tese (Doutorado em Engenharia) – USP, São Paulo 2003.

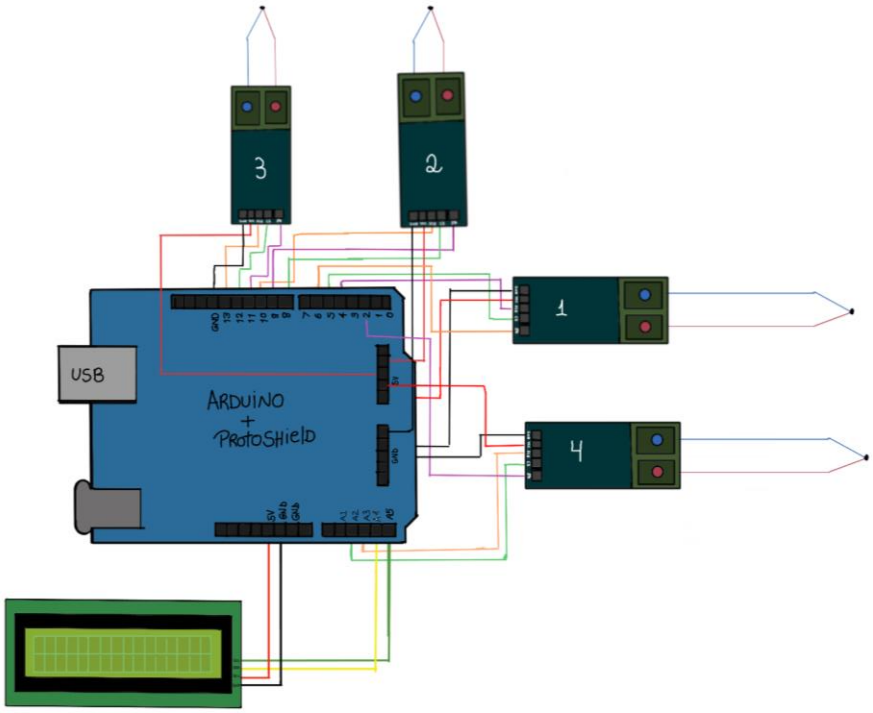
Maxim Integrated Products. Datasheet max6675, Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple to-Digital Converter (0°C to +1024°C),2002.

APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO E INTERFACE EXCEL

O Arduino foi programado na IDE para enviar as medições de temperatura dos 4 termopares localizados nas entradas e saídas do trocador de calor para a tela Display e simultaneamente para uma planilha no Excel, para realizar a conexão do arduino com o Excel, foi necessário criar um sistema de interface na planilha.

Para a montagem do termopar foi utilizado:

- Arduino UNO;
- ProtoShield
- Display LCD 16X2 com Módulo I2C;
- Quatro termopares tipo K;
- Módulo Max6675
- Cabos Jumpers.
- Cabo USB 2.0 A/B para Arduino Uno
- Excel



```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <max6675.h>

//=======================LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

int atualiza = 0;

float val1;
float val2;

uint8_t degree[8]  = {140, 146, 146, 140, 128, 128, 128, 128};

//=====================FIM LCD


//===========SENSORES

//Sensor1
int thermo1D0 = 4; //so
int thermo1CS = 5;
int thermo1CLK = 6; //sck

float temp1 = 0;

MAX6675 setSensor1(thermo1CLK, thermo1CS, thermo1D0);


//Sensor2
int thermo2D0 = 8; //so
int thermo2CS = 9;
int thermo2CLK = 10; //sck

float temp2 = 0;

MAX6675 setSensor2(thermo2CLK, thermo2CS, thermo2D0);


//Sensor3
int thermo3D0 = 11; //so
int thermo3CS = 12;
int thermo3CLK = 13; //sck

float temp3 = 0;

MAX6675 setSensor3(thermo3CLK, thermo3CS, thermo3D0);


//Sensor4
int thermo4D0 = 2; //so
int thermo4CS = A2;
int thermo4CLK = A3; //sck
```

```
float temp4 = 0;

MAX6675 setSensor4(thermo4CLK, thermo4CS, thermo4D0);


//===========FIM SENSORES

//==================ENVIO PARA EXCEL
int linha = 0; //variavel referente as linhas do excel
int LABEL = 1;
//==================FIM ENVIO PARA EXCEL

void setup()
{
  Serial.begin(9600);

//==========CONFIG PARA EXCEL
  Serial.println("CLEARDATA"); // reset para limpar os dados do excel
  Serial.println("LABLE, Hora,Temperatura,Humidade,linha"); // nomeia as
colunas
//==========FIM CONFIG PARA EXCEL

//===============INICIALIZA O LCD EO SISTEMA
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.createChar(0, degree);

  lcd.setCursor(16, 0);

  lcd.autoscroll();

  for (int thisChar = 0; thisChar < 17; thisChar++)
  {
    lcd.print(".");
    delay(100);
  }

  lcd.noAutoscroll();

  lcd.clear();

  lcd.setCursor(3, 0);
  lcd.print("Bem vindo!");

   lcd.setCursor(2, 1);
  lcd.print("TCC - NICOLE");

  delay(2000);

  lcd.clear();

 //===============FIM INICIALIZA O LCD EO SISTEMA
}


void loop()
```

```
{

//====================LEITURA DOS SENSORES
  temp1 = setSensor1.readCelsius();

  delay(100);

  temp2 = setSensor2.readCelsius();

  delay(100);

  temp3 = setSensor3.readCelsius();

  delay(100);

  temp4 = setSensor4.readCelsius();

  delay(100);


//====================FIM DAS LEITURAS DOS SENSORES

//=====================LCD

  if (atualiza == 0)
  {
    sensor_1_e_2();//CHAMA A FUNÇÃO QUE ESTA LA EMBAIXO

    val1 = temp1;
    val2 = temp2;
  }
  else if (atualiza == 1)
  {
    sensor_3_e_4();//CHAMA A FUNÇÃO QUE ESTA LA EMBAIXO

    val1 = temp3;
    val2 = temp4;
  }

  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(val1);
  lcd.write((byte)0);
  lcd.print("C");


  lcd.setCursor(9,1);
  lcd.print(val2);
  lcd.write((byte)0);
  lcd.print("C");

//=====================FIM LCD

//================ENVIO PARA O EXCEL

  linha++;
  Serial.print("DATA,TIME,");//inicia a impressao de dados
  Serial.print(temp1);
```

```
  Serial.print(",");
  Serial.print(temp2);
  Serial.print(",");
  Serial.print(temp3);
  Serial.print(",");
  Serial.print(temp4);
  Serial.print(",");
  Serial.println(linha);

  if (linha>200)// laco para limitar a quantidade de dados
  {
    linha = 0;
    Serial.println("CLEARDATA");
    Serial.println("ROW,SET,2"); //o registo de dados posiciona-se na linha
2
  }
//================FIM ENVIO PARA O EXCEL

  delay(10000);
  lcd.clear();
  delay(2);
}


//====================funções para imprimir na tela do lcd
void sensor_1_e_2()
{
  lcd.setCursor(1,0);
  lcd.print("S1");
  lcd.setCursor(10,0);
  lcd.print("S2");

  atualiza++;
}

void sensor_3_e_4()
{
  lcd.setCursor(1,0);
  lcd.print("S3");
  lcd.setCursor(10,0);
  lcd.print("S4");

  atualiza--;
}

//====================fim das funções que imprimi no lcd
```

APÊNDICE B – TROCADOR DE CALOR

A seguir outras fotos do aparato experimental, como o termômetro utilizado para a calibração dos termopares na figura (25), as bombas peristálticas utilizadas para o fluido quente e frio na figura (26) e o banho termostatizado responsável por manter o fluido quente em uma temperatura constante figura (27) .

Figura 27: Termômetro padrão usado na calibração do termopar

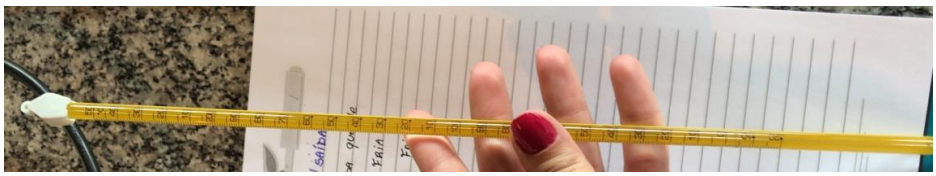
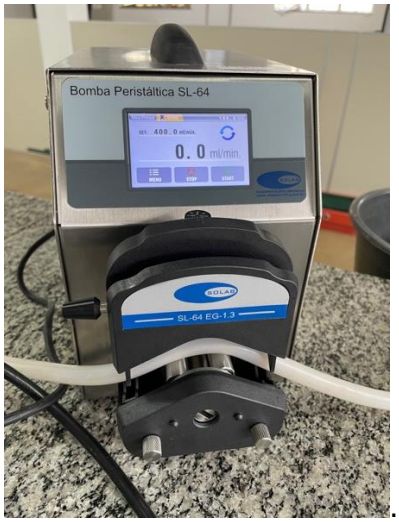


Figura 28: Bomba peristáltica utilizado no experimento.



.

Figura 29: Banho termostatizado