



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIAS E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CAIO LEONARDO FALCÃO MONTEIRO

**ESTUDO TERMODINÂMICO E ADEQUAÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR DE
PLACAS EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

Recife
2022

CAIO LEONARDO FALCÃO MONTEIRO

**ESTUDO TERMODINÂMICO E ADEQUAÇÃO DE UM TROCADOR DE
CALOR DE PLACAS EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Programa de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia
Mecânica.

Orientador: Profº. Marcus Costa de Araújo

Recife
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Monteiro, Caio Leonardo Falcão.

Estudo Termodinâmico E Adequação De Um Trocador De Calor De Placas Ee
Uma Indústria Alimentícia / Caio Leonardo Falcão Monteiro. - Recife, 222.
45 : il., tab.

Orientador(a): Marcus Costa de Araújo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -
Bacharelado, 222.

Inclui referências, anexos.

1. Trocador de Calor de Placas. 2. Análise de Causa Raiz. 3. Indústria
Alimentícia. I. Araújo, Marcus Costa de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

CAIO LEONARDO FALCÃO MONTEIRO

**ESTUDO TERMODINÂMICO E ADEQUAÇÃO DE UM TROCADOR DE
CALOR DE PLACAS EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Doutor Marcus Costa de Araújo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Mestre Luiz Adeildo da Silva Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Doutor Diniz Ramos de Lima Junior (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, Ana Maria, que foi minha maior incentivadora para concluir minha graduação e me ensinou a nunca desistir, acreditando sempre em mim.

A toda minha família, minhas irmãs Gabi e Duda e meu Padrasto Paulo Sérgio que sempre me apoiaram.

A todos os meus amigos de faculdade que participaram desta longa jornada na UFPE, dias longos de estudos e desafios.

Aos meus professores de ensino médio e graduação que foram fundamentais nesta trajetória em especial ao professor de matemática Marcello Menezes, foi um dos responsáveis pela minha aprovação no vestibular da UFPE, e ao orientador Marcus Araújo por ser um ótimo mentor, paciente e solícito que me ajudou bastante neste trabalho.

RESUMO

O presente estudo tem como principal foco corrigir um problema em um processo de uma indústria alimentícia em um trocador de calor placas, identificando-o com ferramentas da engenharia da produção, gerar plano de ação para correção, entre eles, realizar um estudo termodinâmico e otimização do equipamento, definindo suas temperaturas quentes e frias de entrada e de saída, bem como dimensionando sua área das placas. A partir dos cálculos teóricos foi obtido uma temperatura ótima de saída, não gerando mais falhas para o processo. Por fim, foi feita uma validação junto com o fornecedor do trocador de calor de placas, validando o dimensionamento do projeto utilizando um software interno.

Palavras-chave: trocador de calor, estudo termodinâmico, dimensionamento

ABSTRACT

The present study has as main focus to correct a problem in a process of a food industry in a plate heat exchanger, identifying it with production engineering tools, generate an action plan for correction, among them, carry out a study thermodynamics and equipment optimization, defining its hot and cold inlet and outlet temperatures, as well as sizing its area of the plates. From the theoretical calculations, an optimal outlet temperature was obtained, not generating more failures for the process. Finally, a validation was carried out together with the plate heat exchanger supplier, validating the design of the project.

Keywords: heat exchanger, thermodynamic study, design

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVOS.....	9
1.1.2 OBJETIVOS GERAIS	9
1.1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA NO BRASIL	10
2.2 INDÚSTRIA DE CHOCOLATES NO BRASIL	10
2.2.1. A IMPORTÂNCIA DO SETOR DE UTILIDADES NA INDÚSTRIA DE CHOCOLATE	11
2.3. PROCESSOS TÉRMICOS NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS	11
2.3.1. TROCADOR DE CALOR	11
2.3.2. BALANÇO DE ENERGIA EM UM TROCADOR DE CALOR	14
2.3.3. MÉTODO DA MÉDIA LOGARÍTMICA DAS DIFERÊNCIAS DE TEMPERATURA.....	16
3. METODOLOGIA	18
3.1 ANÁLISE DE CAUSA RAÍZA (ACR)	20
3.2. TIME MULTIDISCIPLINAR	21
3.3. BRAINSTORMING.....	22
3.4. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA 5W1H	23
3.5. DIAGRAMA ISHIKAWA	24
3.6. METODOLOGIA DOS 5 POR QUÊS.....	26
3.7. PLANO DE AÇÃO	27
3.8. ESTUDO TERMODINÂMICO	28
3.8.1. PARÂMETROS TERMODINÂMICOS.....	28
4. RESULTADOS.....	30
4.1. DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS, BALANÇO DE ENERGIA .	30
4.2. DETERMINAÇÃO DA ÁREA DAS PLACAS	35
4.2.1 CÁLCULO DA MÉDIA LOGARÍTMICA DAS TEMPERATURAS	35
4.3. CÁLCULO DA QUANTIDADE DE CALOR	36
4.3.1. CÁLCULO DA ÁREA DO TROCADOR DE CALOR	36
4.4. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	37
5. CONCLUSÕES	39
6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	39
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	40

8. ANEXOS.....	43
----------------	----

1.INTRODUÇÃO

Na Indústria alimentícia, a busca por melhoria de processo, qualidade do produto, segurança alimentícia não é difetente quando se fala em competitividade, a melhoria contínua é sempre necessária para garantir a satisfação do cliente Para isso, é ncessário garantir todos os parâmetros do produto, um deles é a temperatua de processo (GUTIERREZ, 2013).

Durante o tratamento térmico de alimentos, ocorrem diversas alterações químicas, físicas e bioquímicas que podem afetar a qualidade e aceitabilidade do alimento. Para minimizar a perda das propriedades nutricionais e sensoriais do alimento e garantir a segurança microbiológica, os processos térmicos têm que ser bem conduzidos. Os parâmetros tempo e temperaturas do processo são específicos para cada alimento a fim de atingir o micro-organismo ou enzima mais termo-resistente presente no mesmo” (GUTIERREZ, 2013).

Segundo a ABICAB (Associação Brasileira da Indústria de Chocolate, Amendoim, Bala e Derivados) o Brasil é o terceiro maior mercado de chocolates do mundo, consumindo um total de 2,8 kg per capita por ano. Mesmo o Brasil sendo um país tropical, com clima quente a maior parte do ano, metade da população consome chocolate uma vez a cada três meses, um quarto consome toda semana e a outra parte não gosta de chocolates, segundo pesquisa do Ibope. A data mais importante para o setor é a páscoa, seguido por natal e dia dos 2 namorados. Somos também o terceiro maior produtor de chocolates, onde 5% da produção é de chocolates de alto padrão (PEREIRA, 2017, p.7).

O processo de uma indústria alimentícia não é simples, há vários fatores que influenciam na qualidade do produto, desde o tipo da matéria prima, fabricação, até processo de embalagem, armazenamento e despacho do produto para o cliente final. Por isso, tudo deve ser controlado com seus devidos parâmetros dentro do padrão.

Tudo se inicia na chegada da matéria prima no armazém, em seguida tem-se a fabricação do recheio e da massa, é ai que a importância do acompanhamento das temperaturas de água gelada e quente entra, a viscosidade do chocolate não pode ser afetada para evitar falta de qualidade do produto e atraso na produção. No caso do atual trabalho, o tracador afeta a fabricação do waffer no forno, temperaturas elevadas provocarão a colagem da

massa nas placas dos fornos e irão gerar waffers com deformidades, causando um reprocesso, atraso do rendimento da linha ou até mesmo indo um produto de baixa qualidade para o cliente.

O presente trabalho buscou investigar os efeitos sobre a eficiência de um sistema de trocador de calor de placas do sistema produtivo da melhoria na eficiência da linha de produção e nos custos operacionais em uma empresa de alimentos. Para cumprir a inovação proposta na presente pesquisa foi realizada uma revisão da literatura para embasar teoricamente o presente estudo. Além da fundamentação teórica para direcionar o trabalho, perpassando pelos conceitos de análise de causa raiz (ACR) e suas ferramentas, funcionabilidade de trocadores de calor e aplicação de métodos para garantir a eficácia no rendimento e produtividade do sistema produtivo em uma empresa de alimentos da cidade de Vitória de Santo Antão.

A presente pesquisa científica se debruçou na otimização no processo produtivo em uma empresa de alimentos que fica localizada na cidade de Vitória de Santo Antão, no interior de Pernambuco. Com o intuito de indentificar a possível causa raiz da ineficiência da entrega da temperatura ideal para um processo de fabricação de uma indústria alimentícia.

1.1 OBJETIVOS

1.1.2 OBJETIVOS GERAIS

Analisar a ineficiência e dimensionar o trocador de calor a partir de um estudo termodinâmico.

1.1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Identificar a causa real de não conformidade da planta;
- b) Propor uma solução para o problema identificado;
- c) Realizar estudo termodinâmico
- d) Propor futuras melhorias

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA NO BRASIL

No Brasil, a indústria de alimentos possui grande importância na indústria de transformação, na participação no PIB e na geração de empregos. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Alimentação – ABIA (2020), a indústria de alimentos brasileira faturou, em 2018, R\$ 528,3 bilhões, o que é equivalente a 7,7% do PIB brasileiro daquele ano e 19,5% do valor bruto da produção (Proxy do PIB) da indústria de transformação. Já em 2019, O agregado das indústrias de alimentos e bebidas (também chamado de indústria de alimentação), teve faturamento de R\$ 699,9 bilhões, crescimento de 6,7% em relação a 2018 (ABIA, 2020), (VIANA, 2020,p.2).

A produção de alimentos é um dos pilares de qualquer economia, seja por sua abrangência e essencialidade, seja pela rede de setores direta e indiretamente relacionados, como o agrícola, o de serviços e o de insumos, aditivos, fertilizantes, agrotóxicos, bens de capital e embalagens (GOUVEIA, 2006, p.32).

2.2 INDÚSTRIA DE CHOCOLATES NO BRASIL

Segundo um levantamento da Associação Brasileira da Indústria de Chocolates, Amendoim e Balas (Abicab), de 2020 para 2021, a produção de chocolates apresentou um crescimento de 44% se comparado à produção de 2020. Este aumento é um reflexo da retomada da indústria chocolateira após um período de retração decorrente da pandemia.

Ainda de acordo com a Abicab, o Brasil tem um dos maiores mercados do mundo em volume de vendas de chocolate. O sucesso do chocolate no Brasil vem de uma consequência dos hábitos do brasileiro, que tem uma média de consumo de 2,6 quilos por pessoa/ano.

2.2.1. A IMPORTÂNCIA DO SETOR DE UTILIDADES NA INDÚSTRIA DE CHOCOLATE

Em uma indústria de chocolate, o setor de Utilidades é de extrema importância, é ele quem fornece ar comprimido a partir dos compressores de ar, água gelada a partir das Torres de Refrigeração, onde a função das Torres de Resfriamento é recuperar parte do calor rejeitado pelos equipamentos responsáveis pela refrigeração de ambientes e/ou processos (LIZARAZU, 2016) em conjunto com Chillers de Compressão, os quais “Utilizam um compressor mecânico, geralmente acionado por um motor elétrico, o qual é utilizado para comprimir o gás refrigerante que circula internamente ao Chiller” (LIZARAZU, 2016) e água potável que é originada da Estação de Tratamento de Água, localizada na área fabril.

2.3. PROCESSOS TÉRMICOS NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

Os processos térmicos de alimentos podem apresentar diferenças segundo a intensidade aplicada, estes podem ir desde processos suaves como é o caso da pasteurização, até processos mais rigorosos. A qualidade do alimento assim como a sua vida de prateleira do alimento, dependerão da intensidade aplicada ao processo (FELLOWS, 2006).

No mercado, estão disponíveis diversos sistemas para tratamento térmico, tais como trocadores de calor a placas, trocadores de calor tubulares e de superfície raspada, assim como sistemas de injeção direta de vapor e de esterilização de alimentos enlatados, entre outros (MABIT et al., 2008; TUCKER; HEYDON, 1998).

2.3.1. TROCADOR DE CALOR

Um trocador de calor é um equipamento que é usado para transferência de energia térmica entre dois ou mais fluidos, entre uma superfície sólida e um fluido, ou entre partículas sólidas e um fluido, em diferentes temperaturas e em contato térmico, geralmente sem calor externo e interações de trabalho. Na maior parte dos trocadores, os fluidos são separados por uma superfície de

transferência de calor e, idealmente, eles não se misturam. (ROHSENOW; et al, 1998)

Os trocadores de calor são classificados em função da configuração do escoamento e do tipo de construção. No trocador de calor mais simples, os fluidos quentes e frio se movem no mesmo sentido ou em sentidos opostos em uma construção com tubos concêntricos. (INCROPERA, et al, 2008).

Os fluidos podem se mover em escoamento cruzado (um fluido escoando perpendicularmente ao outro) pelos trocadores de calor tubulares, com e sem aletas. As duas configurações são tipicamente diferenciadas por uma idealização que trata o escoamento do fluido sobre os tubos como misturado e não-misturado. (INCROPERA, et al, 2008).

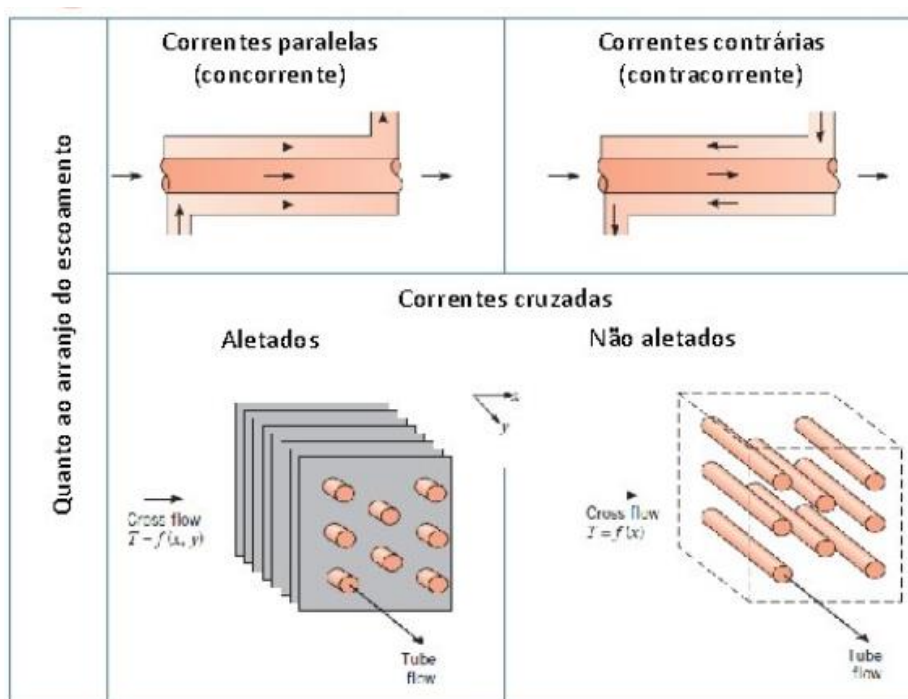


Figura 01. Tipos de trocadores de calor

Fonte: <https://slidetodoc.com/captulo-11-trocadores-de-calor-1-tipos-de/>.

Esses trocadores são geralmente construídos em placas finas. As placas são lisas ou têm alguma forma de ondulação e são planas ou ferida em um trocador. Geralmente, esses trocadores não podem acomodar pressões muito altas, temperaturas e diferenciais de pressão e temperatura. Esses trocadores podem ser classificados adicionalmente como trocadores de placa, placa espiral, lamela e bobina de placa (ROHSENOW; et al, 1998).

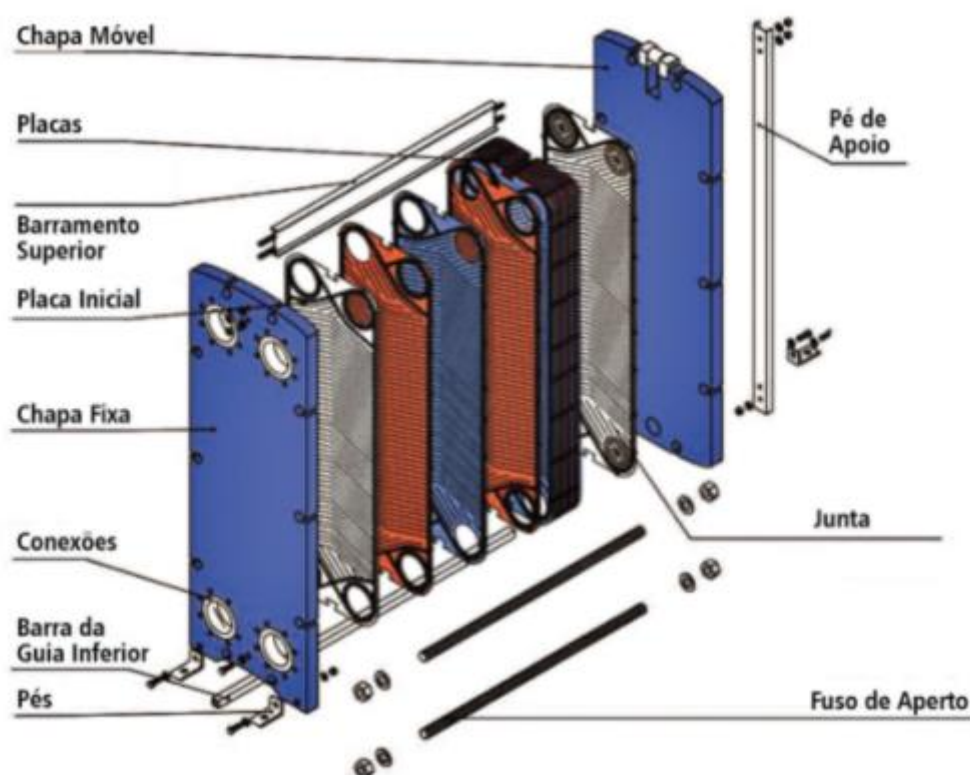


Figura 02. Componentes do Trocador de Calor. Fonte: <https://bermo.com.br/produtos/detalhes/bp6-trocador-de-calor-a-placas-gaxetado/>.

As vantagens dos trocadores de calor a placas em relação aos outros tipos de trocadores são apresentados a seguir:

- Higienização fácil e a inspeção completa de cada placa;
- Alta taxa de transferência de calor, o que permite uma boa eficiência térmica mesmo com pequeno diferencial de temperatura entre os fluidos;
- Viabilidade econômica para fabricação em aço inoxidável;
- Construção compacta e modular que permite acomodar várias seções de troca térmica em um mesmo pedestal;

- Flexibilidade, que permite mudanças em seu arranjo, número de placas e de passes visando uma otimização do processo (GUTIERREZ, 2013).

Segundo Abu-Khader, uma das principais desvantagem dos trocadores de calor a placas são os limites operacionais de pressão e temperatura, sendo cerca de 20,4 bar e 150 °C respectivamente. Para o processo estudado, a temperatura operacional é em média 12°C e a pressão operacional 2 bar.

Para Sabino (2008), neste tipo de trocador, as placas com relevos específicos, são posicionadas consecutivamente de forma a criar mais canais para a circulação dos fluidos de troca térmica. Como limitação, estes trocadores de calor necessitam de materiais especiais e ainda possuem pressões de operação limitadas em virtude dos problemas de vedação entre suas placas ou tampo plano (PEREIRA, 2012)

2.3.2. BALANÇO DE ENERGIA EM UM TROCADOR DE CALOR

A equação básica para trocador de calor é:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

U = Coeficiente global de transferência de calor $W/(m^2 \cdot K)$;

ΔT_m = Diferença média de temperatura entre os fluidos (K).

Para o início do estudo termodinâmico foi utilizada a equação fundamental da calorimetria, segundo Halliday, ela expressa a quantidade de calor sensível que um corpo pode ceder ou receber em relação à sua variação de temperatura, expressa pela Equação (1): (HALLIDAY et al. 2009).

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad \text{Equação (2)}$$

O lado direito da Equação (1) representa a taxa líquida de saída de entalpia (energia térmica mais trabalho de escoamento) para um gás ideal ou de saída de energia térmica para um líquido incompressível. (INCROPERA, 2008)

Q = Quantidade de calor cedida ou recebida (J ou cal)

m = Massa (kg)

c = Calor específico (cal/g°C ou J/kg.K)

ΔT = variação de temperatura (°C ou K)

Quando:

$Q > 0$: transferência de calor para o sistema;

$Q < 0$: transferência de calor do sistema.

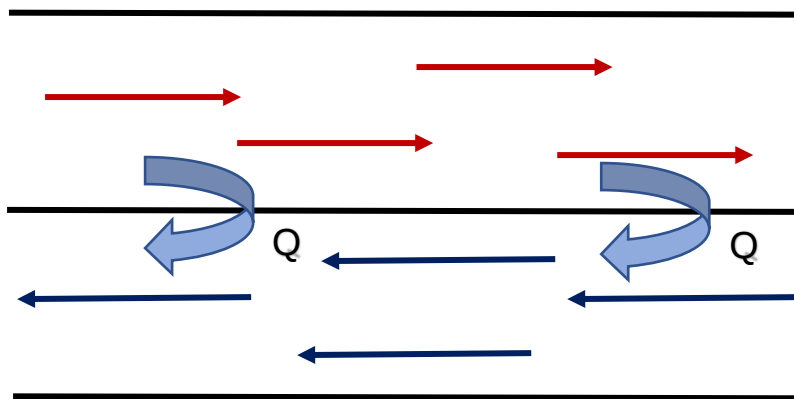


Figura 03. Troca de calor entre meios quente e frio. Fonte: O Autor (2022).

Considerando uma superfície de um meio, as superfícies de controle estão localizadas em ambos os lados da fronteira física e não envolvem massa ou volume, temos que a conservação de energia é dada por:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = 0 \quad \text{Equação (3)}$$

“Embora possa estar ocorrendo geração de energia térmica no meio, esse processo não afeta o balanço de energia na superfície de controle. Além disso, essa exigência de conservação vale tanto para condições de regime estacionário como de regime transiente.” (INCROPERA, 2008)

Uma etapa essencial, e frequentemente a mais imprecisa de qualquer análise de trocadores de calor é a determinação do coeficiente global de transferência de calor. Esse coeficiente é definido em função da resistência térmica total à transferência de calor entre dois fluidos. A resistência térmica para a condução em uma parede plana (eq. 2) é a razão entre um potencial motriz e a correspondente taxa de transferência. (INCROPERA, 2008)

2.3.3. MÉTODO DA MÉDIA LOGARÍTMICA DAS DIFERÊNCIAS DE TEMPERATURA

De acordo com Kakaç e Liu (1997), existem duas principais metodologias para análise de desempenho e dimensionamento de trocadores de calor: O método ε -NUT, conhecido como o método da efetividade, de acordo com Çengel, ele é baseado em um parâmetro adimensional chamado efetividade da transferência de calor ε , definido como:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\text{Taxa de transferência de calor real}}{\text{Taxa de transferência de calor máximo possível}}$$

Equação (4)

“A taxa real de transferência de calor em um trocador de calor pode ser determinada a partir do balanço de energia sobre o fluido quente ou frio, expressa por:”. (ÇENGEL, 2012).

$$Q = C_c \cdot (T_{c,sai} - T_{c,ent}) = C_k \cdot (T_{k,ent} - T_{k,sai}) \text{ Equação (5)}$$

Taxas de capacidade térmica dos fluidos frios e quentes, respectivamente

- $C_c = \dot{m}_c \cdot C_{pc}$
- $C_h = \dot{m}_h \cdot C_{ph}$

Segundo Çengel “para determinar a taxa de transferência de calor máxima possível no trocador de calor, primeiro reconhecemos que a diferença de temperatura máxima do trocador de calor é a diferença entre as temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio. Isto é:”

$$\Delta T_{max} = T_{q,ent} - T_{f,ent} \text{ Equação (6)}$$

Para atingir o valor máximo da transferência de calor tem-se dois cenários, quando o fluido frio é aquecido até a temperatura de entrada do fluido quente ou quando o fluido quente é resfriado até a temperatura de entrada do fluido frio. Se para uma condição de capacidades térmicas dos fluidos quente e

frio serem idênticas, $C_c = C_k$, as condições para atingir o valor máximo serão atingidas simultaneamente, caso contrário nunca acontecerá que é o caso de $C_c \neq C_k$, o fluido com menor taxa de capacidade térmica sofrerá uma mudança de temperatura maior e, assim, será o primeiro a experimentar a temperatura máxima. Sendo assim, a taxa de transferência de calor será máxima quando:

Outro método quando são conhecidas as temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio ou podem ser determinadas a partir do balanço de energia é o da média logarítmica das diferenças de temperatura, é o caso do presente trabalho. Outro ponto importante deste método é de selecionar as exigências prescritas de transferência de calor (ÇENGEL, 2012).

Uma diferença de temperatura cria uma transmissão de calor de uma fonte a um receptor. Um corpo mais quente irá transferir seu calor para o corpo mais frio, afim de igualar as temperaturas.

Considerando um sistema contracorrente, o gráfico para as variações de temperatura nem sempre são lineares quando plotadas contra o comprimento. A curva $T - t$ contra L permite identificar a diferença de temperatura em qualquer parte ao longo do comprimento do tubo, porém as seguintes hipóteses devem ser feitas. (RISTOF, 2013)

- O coeficiente total de transmissão de calor é constante em todo o comprimento da trajetória;
- O calor específico é constante em todos os pontos da trajetória;
- Não existem mudanças de fase parciais no sistema;
- As perdas de calor são desprezíveis. (RISTOF, 2013)

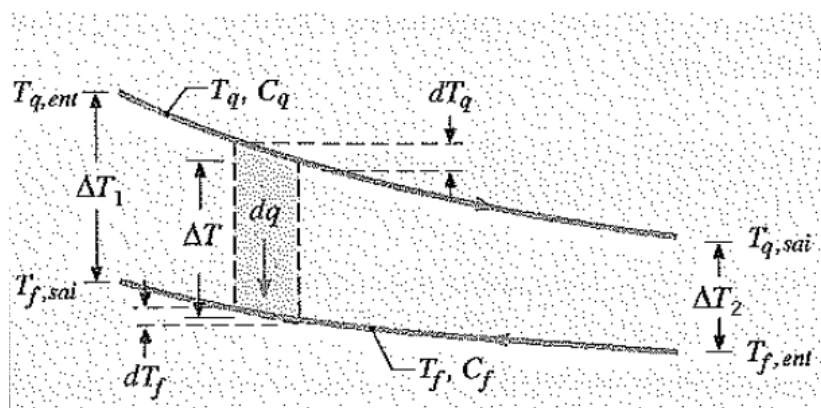


FIGURA 03. Gráfico das temperaturas quentes e frias de entrada e saída.

Fonte: ÇENGEL, 2012.

Analisando o gráfico temos:

$$\Delta T_{ent} = (T_{qe} - T_{fs})$$

$$\Delta T_{sai} = (T_{qs} - T_{fe})$$

Então:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_{ent} - \Delta T_{sai}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{ent}}{\Delta T_{sai}}\right)} \quad \text{Equação 7}$$

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa foram usadas ferramentas da engenharia de controle para identificar as desconformidades e possíveis soluções. A segunda etapa consiste na análise termodinâmica dos trocadores de calor.

Após os fornos, tem-se a área da fabricação do produto, onde é introduzido o recheio, cortadeira para o corte nas dimensões exatas do produto e a cobertura do chocolate. O Controle de água é bem presente neste setor, tubulações encamisadas que controlam a temperatura da massa e recheio são bem presentes, por isso que o setor de utilidades deve ter um controle bem rigoroso na central de água gelada, garantindo a integridade dos equipamentos realizando as manutenções adequadas e mantendo os parâmetros no padrão necessário no processo. Na figura 04 é mostrado um exemplo da linha de tubulações encamisadas da fábrica. A linha funciona como vários Trocadores de Calor de Tubo Duplo posicionados em série, onde o recheio passa na seção interna ao tubo e a água passa pela seção externa ao tubo.

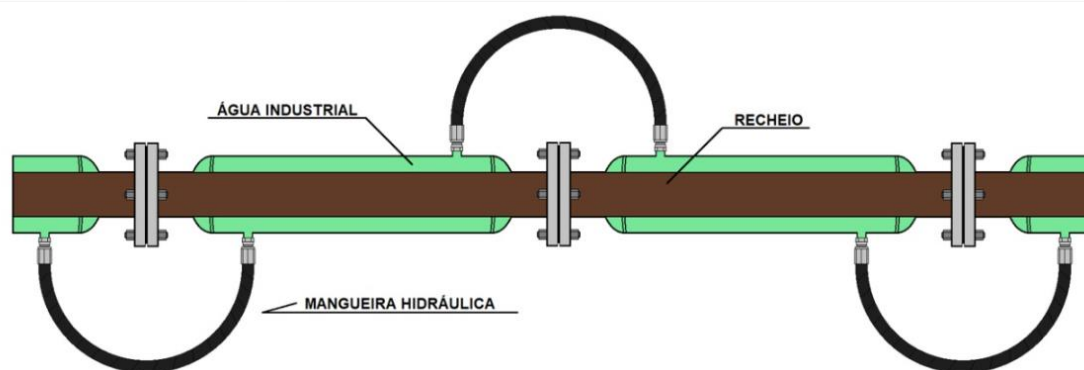


Figura 04. Recorte de uma tubulação encamisada demonstrando o sistema de encamisado onde circula a água industrial e o recheio para o processo.

Fone: O Autor (2022).

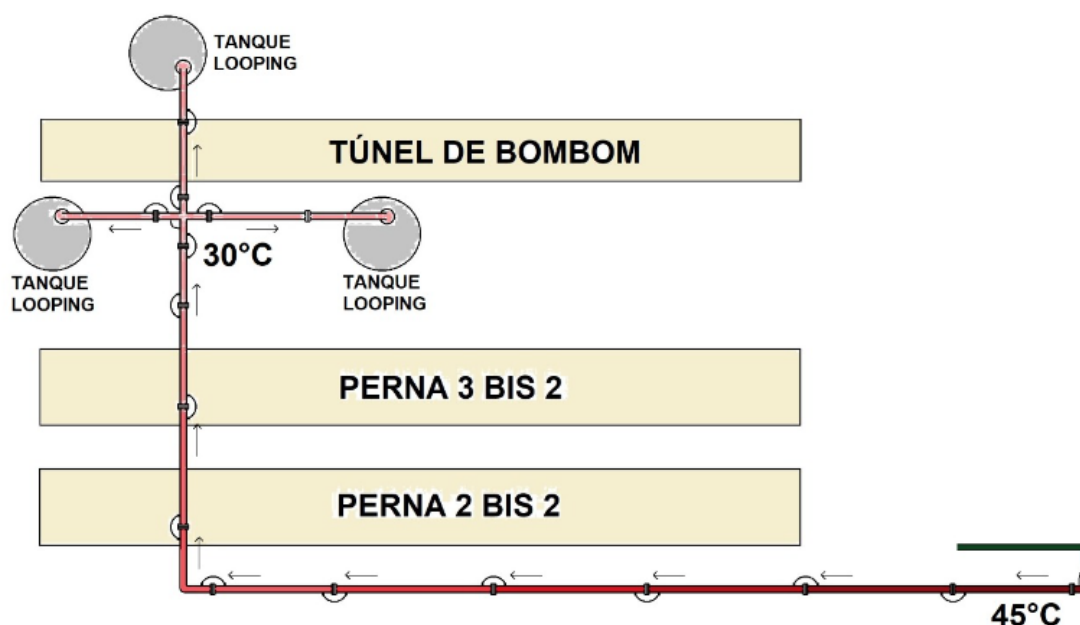


Figura 05. Exemplo de uma distribuição da tubulação encamisada para os equipamentos do processo, água industrial proveniente de aquecedores.

Fonte: O Autor (2022).

Seguindo para a embalagem, o controle de temperatura nas águas passa a ser para o processo de climatização da área pelos fancoils, garantindo que os chocolates não derretam afetando a qualidade. Em alguns pontos como no controle de temperatura das esteiras também há a necessidade de atenção. Após efetuadas as embalagens primárias e secundárias, segue para a central de paletização onde a logística é responsável por enviar todos os produtos para os clientes finais.

3.1 ANÁLISE DE CAUSA RAIZA (ACR)

O trocador de calor em estudo, distribui água gelada para o processo de resfriamento das placas dos fornos da fábrica, o qual tem uma enorme importância, pois, qualquer variação da temperatura ideal afeta a qualidade do produto, ocasionando falha no processo inicial do produto. Sendo assim, o controle das temperaturas de água gelada é essencial para garantir a entrega com qualidade do produto final para o consumidor.

Com isso, após algumas paradas de linha pela temperatura do trocador de calor estar fora do padrão, foi-se necessário encontrar a causa raiz e gerar ações para que o “set point” esteja ideal para a produção.

A temperatura de processo, oriunda dos trocadores de calor, não atende a necessidade da produção, estão ocorrendo pequenas paradas no forno com o produto fixado nas placas internas gerando perda de volume de produção

Para que a resolução da problemática seja eficaz, foi proposto a metodologia de análise de causa raiz – ACR. Em termos simples, a ACR é uma ferramenta projetada para ajudar a identificar não apenas o que e como um evento ocorreu, mas também porque aconteceu. Somente quando investigadores são capazes de determinar por que um evento ou falhas correram eles serão capazes de especificar viáveis medidas corretivas que evitem eventos futuros do tipo observado. (ROONEY, 2004)

Identificar as causas raízes é a chave para prevenir recorrências semelhantes. Um benefício adicional de um eficaz ACR é que, ao longo do tempo, as causas-raiz identificadas em toda a população de ocorrências podem ser usados para visar as principais oportunidades de melhoria. (ROONEY, 2004)

Abaixo segue o roteiro seguido e quais as ferramentas serão utilizadas para se chegar até a causa raiz e os planos de ação para mitigar o problema dado.

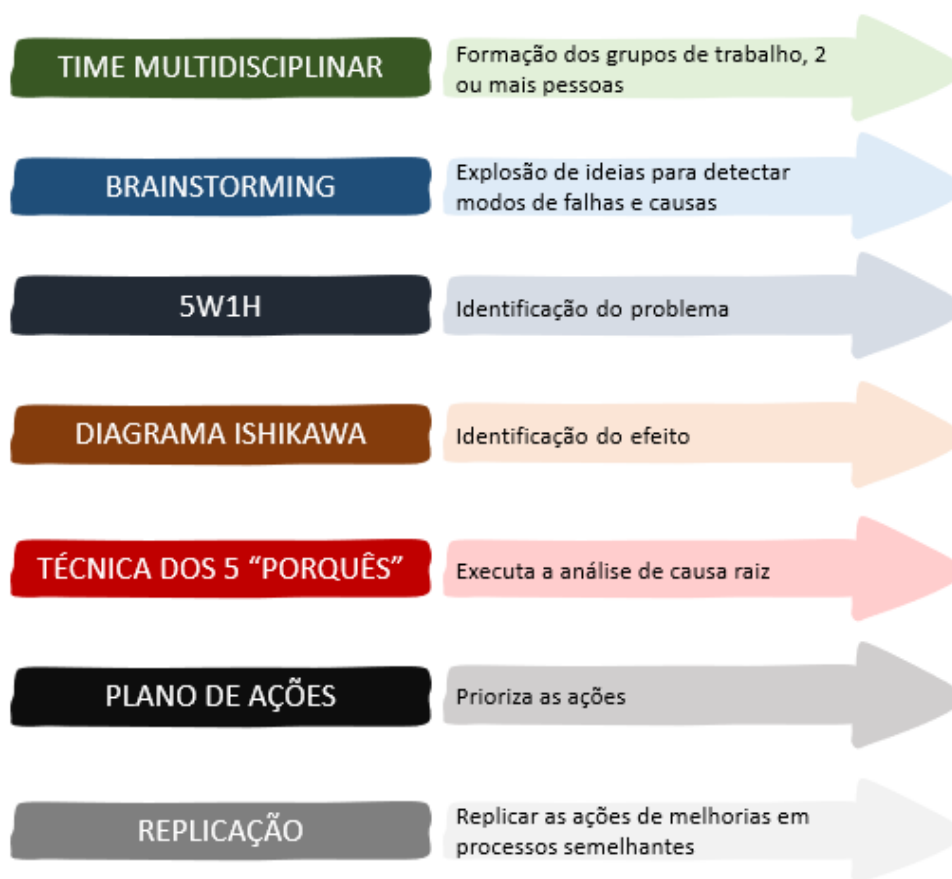


Figura 06. Roteiro para execução da análise de causa raiz.
Fonte: O Autor (2022).

3.2. TIME MULTIDISCIPLINAR

A seleção das pessoas que irão realizar este trabalho é de suma importância, pois, é necessário que o time multidisciplinar seja composto de pessoas com expertises em áreas distintas, as quais surjam ideias que colaborem para o bom desenvolvimento da ferramenta e que consigam ser assertivos com os planos de ações. Para tal tarefa foi escolhido o seguinte time multidisciplinar:

Colaborador	Responsabilidade
Engenheiro do Projeto	Responsável pelas informações da construção do projeto, parâmetros e desenhos do projeto.
Especialista de Manutenção	Responsável pelas atividades corretivas do projeto.
Planejador de Manutenção	Responsável pelas atividades preventivas, criação de plano de manutenção do projeto.
Especialista de Processo	Responsável pro processo da área dos fornos.
Especialista de Qualidade	Responsável pelo controle de qualidade do produto.

Tabela 01. Lista do time multidisciplinar. Fonte: O Autor (2022).

3.3. BRAINSTORMING

O *brainstorming* ou “tempestade de ideias” é uma das ferramentas de criatividade, realizada em grupo, a qual ajuda a encontrar melhores soluções para os problemas que a organização enfrenta. É desenvolvida uma lista de ideias, espontaneamente pelos participantes do grupo multidisciplinar. (NAVAS, 2016).

Segundo o autor do *brainstorming*, Alex Faickney Osborn, os dois princípios mais importantes para a eficácia na aplicação são adiar a discussão das idéias e garantir a quantidade de ideias geradas. Para a estimulação da geração de ideias criativas do grupo, Alex estabeleceu sempre buscar a quantidade, reter críticas, receber bem as ideias radicais e combinar as ideias entre si e melhorá-las. (NAVAS, 2016)

Para resolução de um problema simples, a utilização da técnica individual é uma opção, mas para um problema mais complexo e com a busca de mais ideias criativas, o *brainstorming* em grupo é a melhor opção, devido à participação, às opiniões e às experiências acumuladas de todos do grupo. (NAVAS, 2016). Com isso, pela complexidade do estudo da causa raiz, o time de manutenção, fabricante do equipamento e o time de qualidade foram envolvidos para utilização desta ferramenta.

3.4. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA 5W1H

Esse plano ajuda a identificar ações e responsabilidades na melhoria dos processos (CARDIN et al., 2014).

“O plano de ação *5W1H* permite considerar todas as tarefas a serem executadas ou selecionadas de forma cuidadosa e objetiva, assegurando sua implementação de forma organizada” (LENZI; KIESEL; ZUCCO, 2010, p.185).

Após a identificação dos problemas, deve ser elaborado um plano com melhorias para eliminar as causas dos problemas, esse plano deve ser feito de maneira estruturada e concreta, para que isso seja possível recomenda-se aplicar o *5W1H* que vai auxiliar a esclarecer todas as etapas (MAGALHÃES; BRITO, 2007).

Sendo assim, para a descrição do problema deve se ir em campo onde o problema ocorre, buscando evidências e trabalhar com fatos e dados. Para o nosso atual problema tivemos:

<i>WHAT</i> - O quê aconteceu? Descreva o modo de falha.	Temperatura de processo não atende a necessidade da produção
<i>WHERE</i> - Onde aconteceu? Máquina, linha, componente, processo, etc.	Nos trocadores de calor
<i>WHEN</i> - Quando aconteceu? Início de produção, produção normal, pós troca de produto, etc.	Durante produção normal
<i>WHO</i> - Quem foi envolvido ou afetado? Ocorre com algum turno/operador específico? Tem alguma relação com habilidade?	O produto que está saindo dentro do forno
<i>WHICH</i> - Qual a tendência na ocorrência do problema? Geralmente acontece em qual situação?	Geralmente ocorre durante a produção normal
<i>HOW</i> - Como ocorreu a falha? De que forma a máquina e/ou operador se comportou para gerar o problema?	Estão ocorrendo pequenas paradas no forno com o produto fixado nas placas internas

Tabela 02. Descrição do problema 5W1H. Fonte: O Autor (2022).

Com isso, resultou na descrição completa do problema “A temperatura de processo, oriunda dos trocadores de calor, não atende a necessidade da produção, estão ocorrendo pequenas paradas no forno com o produto fixado nas placas internas gerando perda de volume de produção”

3.5. DIAGRAMA ISHIKAWA

Esta ferramenta consiste em uma forma gráfica usada como metodologia de análise para representar fatores de influência (causas) sobre um determinado problema (efeito). Também é denominada de Diagrama de Ishikawa, devido ao seu criador, ou Diagrama Espinha de Peixe, devido à sua forma (MIGUEL, 2006).

O diagrama de causa-efeito pode ser elaborado perante os seguintes passos:

- Determinar o problema a ser estudado (identificação do efeito);
- Relatar sobre as possíveis causas e registrá-las no diagrama;
- Construir o diagrama agrupando as causas em “6M” (máquina, mão de obra, método, material, medida e meio ambiente);
- Analisar o diagrama, a fim de identificar as causas verdadeiras;
- Correção do problema.

(JUNIOR, 2010)

Basicamente, o resultado do diagrama é fruto de um brainstorming (significa tempestade de idéias), ou seja, pensamentos e idéias que cada membro de um grupo de discussão expõe sem restrições e democraticamente. Sendo o diagrama, o elemento de registro e representação de dados e informação (MIGUEL, 2006).

O Diagrama Ishikawa 6M	
Máquina	Trocador de calor com placas e gaxetas obstruídas
	Gaxetas ressecadas
	Trocador de calor mal dimensionado
	Válvulas de controle danificadas
Mão de obra	Operador não seguiu o procedimento
Meio Ambiente	Temperatura da alimentação de 6 graus elevada
Medição	Termômetro descalibrado
	Válvulas de controle descalibradas
Método	-
Material	Isolamento térmico fora da especificação

Tabela 03. Diagrama de Ishikawa. Fonte: O Autor (2022).

Após todo o Brainstorming de possíveis causas do atual problema, discussões e avaliações técnicas entre a equipe multidisciplinar resultou-se que tivemos 3 problemas plausíveis na máquina:

- Trocador de calor com placas e gaxetas obstruídas;
- Trocador de calor mal dimensionado
- Válvulas de controle danificadas.

Para os demais descartados não foi constatado no local que as gaxetas internas dos trocadores estavam com sinais de ressecamento, foi verificado na geração da água de gelada que não havia nenhuma variação considerável, todas as válvulas com calibração em dia, isolamentos térmicos em bons estados e nenhuma operação da máquina foi descumprida pela operação.

Tendo as possíveis causas da ineficiência do trocador de calor, o próximo passo é analisar a causa raiz de cada uma, afim de gerar um plano de ação para que o problema seja sanado com mais eficácia. Com isso será analisado via a metodologia 5 por quês.

3.6. METODOLOGIA DOS 5 POR QUÊS

Criada no sistema Toyota de Produção pelo Taiichi Ono, consiste em gerar questionamentos sobre o problema até encontrar a verdadeira causa raiz. Pergunta-se por que e a resposta forma a base para a próxima pergunta.

O número cinco vem da observação de Ono de que seja, em média, o suficiente para definir a causa raiz. Contudo, não é uma regra, pode-se chegar, por exemplo, em um resultado com 2 por quês, o importante é continuar até que se encontre a causa e efeito de uma falha específica. (COSTA et al, 2018).

Nem todas as falhas contêm uma única causa raiz, é feito o mesmo processo para todas as possíveis retiradas do Diagrama Ishikawa, começando sempre com uma observação distinta.

Após finalizados todos os questionamentos dos 5 por quês é gerado um plano de ação informando qual é a ação, o responsável e o prazo. É importantíssimo que esses prazos sejam acompanhados semanalmente para que não tenha atraso e venha a se repetir a falha. Após conclusão de todas as ações deve-se realizar o mesmo para a replicação caso tenham oportunidades, focando sempre em mitigar o problema.



Possível causa	Trocadores de calor com placas e gaxetas obstruídas	Válvulas de controle ineficientes	Trocador de calor mal dimensionado
1 Por quê?	Não há plano de manutenção	Válvulas de controle muito oxidadas	Produto com taxa de reprocesso alta
2 Por quê?	Vazamentos de águas pelas placas dos trocadores de calor	Não há plano de manutenção	Qualidade baixa das placas de waffles
3 Por quê?	Oxidação e sujeiras nos trocadores de calor		Placas de waffle colando nas placas dos fornos e qualidade baixa para o processo
4 Por quê?	Trocadores de calor com placas e gaxetas obstruídas		Temperatura da água de resfriamento das placas alta gerando o derretimento da placa de waffle e colando nas placas dos fornos
5 Por quê?			Trocador de calor mal dimensionado sem atingir a temperatura ideal
Causa Raíz	Trocadores de calor com placas e gaxetas obstruídas	Não há plano de manutenção	Trocador de calor mal dimensionado sem atingir a temperatura ideal

Tabela 04. Aplicação da Metodologia 5 por quês. Fonte: O Autor (2022).

3.7. PLANO DE AÇÃO

Os planos de ações são essenciais para atacar diretamente nas possíveis causas raízes do problema. A determinação de cada ação é feita utilizando um time multidisciplinar com conhecimentos técnicos reunindo todas as evidências da quebra e/ou defeito, neste caso foi envolvido o Especialista de Manutenção, Planejador de Manutenção, Técnico mecânico e o representante do fabricante do trocador de calor.

Com as análises dos 5 por quês foi verificado que a causa raiz mais crítica é “Trocador de calor mal dimensionado sem atingir temperatura ideal”. Com isso, o presente trabalho terá um foco neste tema, realizando um dimensionamento do trocador de calor para atender os parâmetros necessários para o processo, evitando perdas de produto por qualidade baixa.

Causa Raíz	Descrição da Ação	Responsável
Não há plano de manutenção	Criar plano de manutenção baseado nas indicações do fornecedor e necessidades do processo	Planejador de Manutenção
Trocador de calor mal dimensionado sem atingir a temperatura ideal	Realizar estudo termodinâmico e dimensionar o trocador de calor	Especialista de Manutenção
Trocadores de calor com placas e gaxetas obstruídas	Programar manutenção para uma parada de linha	Planejador de Manutenção
	Realizar a compra das placas e gaxetas de acordo com o novo dimensionamento do trocador de calor	Planejador de Manutenção
	Troca das placas obstruídas e gaxetas ressecadas	Técnico Mecânico
	Acompanhar o rendimento do trocador de calor	Especialista de Manutenção

Tabela 05. Plano de ação. Fonte: O Autor (2022).

3.8. ESTUDO TERMODINÂMICO

3.8.1. PARÂMETROS TERMODINÂMICOS

A termodinâmica estuda a troca de energia entre fluidos de diferentes temperaturas. Para o início de todo estudo termodinâmico, é necessário compreender como todo processo funciona e quais são os parâmetros envolvidos. O nosso sistema é composto de um trocador tipo placa que é alimentado por água gelada em uma temperatura padrão de 6,0°C, proveniente do Chiller da central de água gelada da planta e troca calor com água potável em temperatura ambiente 30°C, proveniente da estação de tratamento de água.

Para o processo em estudo, a temperatura fria de saída do trocador deverá estar entre 9 e 10 °C, esta é a temperatura que não afetará na etapa seguinte de fabricação do produto. Esta água gelada tem como finalidade resfriar as placas dos fornos, evitando que a massa se aloje nos moldes, evitando que diminua a qualidade e afete no produto final, gerando reclamações dos consumidores quando o chocolate é adquirido com falhas visíveis.

De acordo com a Equação 1, a vazão é um fator importante para a determinação do calor envolvido, no nosso sistema a vazão foi medida com a ajuda de um medidor ultrassônico e tivemos os valores aproximados de 7,8 m^3/h e 8 m^3/h para a água gelada e a água potável respectivamente, para o presente estudo iremos utilizar estes valores fixados.



Figura 07. Exemplo da medição da vazão da água potável utilizando o medidor ultrassônico de vazão. Fonte: O Autor (2022).

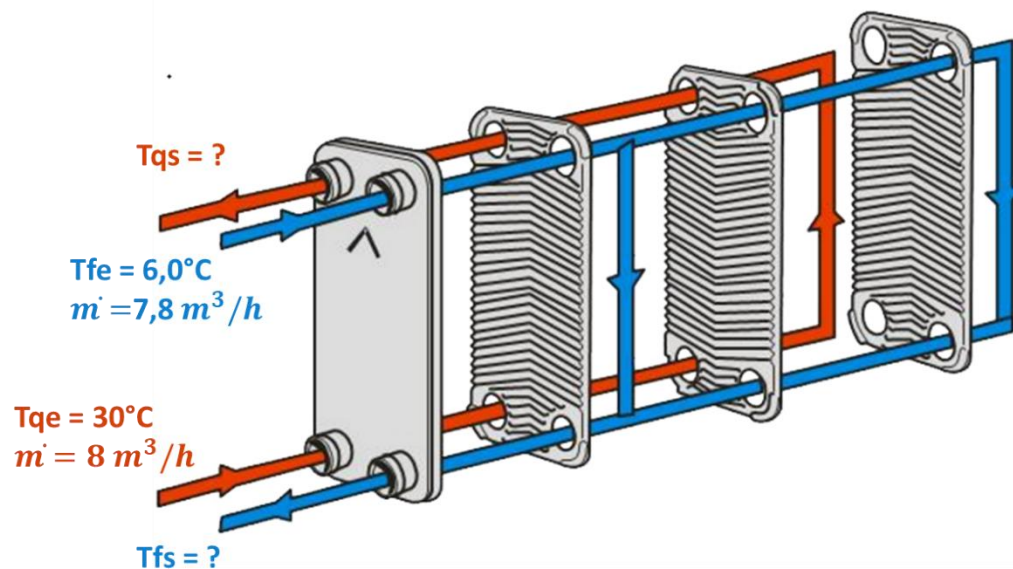


Figura 08. Trocador de calor de placas e suas temperaturas de entrada e saída. Fonte: <https://loja.weconsultoria.com.br/trocador-de-calor-swep-p50970/>.

Os cálculos para determinação das temperaturas de saída e dimensionamento da área do trocador de calor serão demonstrados no capítulo de Resultados a seguir:

4. RESULTADOS

4.1. DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS, BALANÇO DE ENERGIA

O principal objetivo no projeto térmico de trocadores de calor é a determinação da área superficial necessária para transferir o calor numa determinada configuração, conhecidas as vazões e as temperaturas dos fluidos. Este trabalho é facilitado pelo uso do coeficiente global de transmissão de calor, U . (MOREIRA, 2018).

Para a determinação da área, será necessário realizar um estudo para encontrar as temperaturas quente e fria de saída do trocador em questão, para isso, será realizado um balanço de energia, criando um volume de controle na reação do trocador de calor, teremos:

$$Q = \dot{m}_f \cdot C_{pq} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) = \dot{m}_q \cdot C_{pq} \cdot (T_{qe} - T_{qs})$$

$$T_{fs} = T_{fe} + \frac{\dot{m}_q \cdot C_{pq} \cdot (T_{qe} - T_{qs})}{\dot{m}_f \cdot C_{pf}} \quad \text{Equação (8)}$$

Como T_{qs} é desconhecida e T_{qe} é conhecida, realizando um balanço de energia, de modo que teremos um valor de referência para obter um valor para o valor de C_p da água quente, tem-se a T_q de referência, média das temperaturas de entrada e saída:

$$T_{qref} = \frac{T_{qe} + T_{qs}}{2} \quad \text{Equação (9)}$$

A temperatura de água gelada é proveniente dos chillers, onde distribui para vários processos da fábrica, como os fancoils e demais trocadores de calor da produção que atende à fábrica de chocolate. Sendo assim, teremos que essa temperatura é constante, não é possível ajustar pois irá afetar outros processos,

bem como a água quente de entrada que é proveniente da estação de tratamento de água potável.

No sistema foi instalado válvulas proporcionais, possibilitando a abertura e fechamento das entradas e saídas de água alterando as vazões. No presente trabalho, iremos realizar a interpolação para encontrar o valor ótimo da temperatura quente de saída para o sistema, ou seja, atender 10°C para o processo a temperatura fria de saída. Para isso, é necessário obter o CpA para essa temperatura

$$\dot{m}_f \cdot C_{pf} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) = \dot{m}_q \cdot C_{pq} \cdot (T_{qe} - T_{qs})$$

$$\frac{\dot{m}_f \cdot C_{pf}}{\dot{m}_q \cdot C_{pq}} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) = T_{qe} - T_{qs}$$

$$\frac{\dot{m}_f \cdot C_{pf}}{\dot{m}_q \cdot C_{pq}} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) = T_{qe} - T_{qs}$$

$$K = \frac{\dot{m}_f \cdot C_{pf}}{\dot{m}_q \cdot C_{pq}} \text{ Teremos:}$$

$$K \cdot (T_{fs} - T_{fe}) = T_{qe} - T_{qs}$$

$$K \cdot T_{fs} + T_{qs} = T_{qe} - K \cdot T_{fe}$$

Temos que $T_{qe} - K \cdot T_{fe} = \text{Constante}$, pois as temperaturas T_{qe} e T_{fe} são de entradas constantes por serem derivadas de uma fonte contínua sem variações de temperatura, então podemos observar que a temperatura fria de saída (T_{fs}) é inversamente proporcional a temperatura quente de saída (T_{qs}), para uma maior temperatura quente de saída, tem-se uma menor temperatura fria de saída

$$K \cdot T_{fs} + T_{qs} = Cte$$



T_{qs}

$= Cte -$



$K \cdot T_{fs}$

Equação (10)

Sendo assim, para diminuir a temperatura fria de saída, deve-se aumentar a temperatura quente de saída, utilizando a Equação 8, será encontrado uma temperatura quente de referência para definir qual o Cp de referência que chegará a uma temperatura fria de saída ideal para o processo de 10°C.

Com isso, tem-se os seguintes parâmetros iniciais:

Temperaturas	Celsius	Kelvin
T_{fs}	?	?
T_{fe}	6°C	279
T_{qe}	30°C	303
T_{qs}	?	?

Vazões	m^3/h	Cp	J/kg.K
$\dot{m}_f$	7,8	Cpf	4198
$\dot{m}_q$	8	Cpq	4179

Tabela 06. Parâmetros. Fonte: O Autor (2022).

Para determinar os valores das temperaturas de saída, utilizamos uma análise paramétrica. Variamos os valores de T_{qs} e calculamos por meio de iterações os valor de T_{fs} .

Utilizando a interpolação, foram definidos vários valores para uma possível T_{qs} , a qual, levando em consideração a Equação 9, atenderá à necessidade do processo. Posto isso, a partir da Tebela A6 de água saturada (INCROPERA, 2008) do Anexo 01, para encontrar T_{fs} ideal tem-se:

TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada^a

Temperatura, T (K)	Pressão, p (bar) ^b	Volume Específico (m ³ /kg)		Calor de Vaporização, h_{fg} (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		β
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	
273,15	0,00611	1,000	206,3	2502	4,217	1,854	
275	0,00697	1,000	181,7	2497	4,211	1,855	
280	0,00990	1,000	130,4	2485	4,198	1,858	
285	0,01387	1,000	99,4	2473	4,189	1,861	
290	0,01917	1,001	69,7	2461	4,184	1,864	
295	0,02617	1,002	51,94	2449	4,181	1,868	
300	0,03531	1,003	39,13	2438	4,179	1,872	
305	0,04712	1,005	29,74	2426	4,178	1,877	
310	0,06221	1,007	22,93	2414	4,178	1,882	
315	0,08132	1,009	17,82	2402	4,179	1,888	

Tabela A6 Propriedades termofísicas da água saturada. Fonte: Incropera 6^a Edição.

Primeira iteração, considerando $T_{qs} = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$:

$$T_{ref} = \frac{T_{qs} + T_{qe}}{2}$$

$$T_{ref} = \frac{293 + 303}{2}$$

$$T_{ref} = 298 \text{ K}$$

Consultando a Tabela A6:

$T_1 = 295 \text{ K}$; $C_{p1} = 4181 \text{ J/kg.K}$

$T_{ref} = 298 \text{ K}$; $C_{pref} = ?$

$T_2 = 300 \text{ K}$; $C_{p2} = 4179 \text{ J/kg.K}$

Interpolando para o cálculo do C_{pref} :

$$C_{pref} = C_{p1} + (C_{p2} - C_{p1}) \cdot \frac{(T_{ref} - T_1)}{(T_2 - T_1)}$$

$$C_{pref} = 4181 + (4179 - 4181) \cdot \frac{(298 - 295)}{(300 - 295)}$$

$$C_{pref} = 4179,70 \text{ J/kg.K}$$

Conhecido C_{pref} , será utilizada a Equação (8) para o cálculo da T_{fs} utilizando os seguintes parâmetros.

- $T_{fe} = 279 \text{ K}$
- $\dot{m}_q = 8 \text{ m}^3/\text{h}$
- $C_{pqs} = C_{pref} = 4179,7 \text{ J/kg.K}$
- $T_{qe} = 303 \text{ K}$
- $T_{qs} = 273 \text{ K}$

- $\dot{m}_f = 7,8 \text{ m}^3/h$
- $C_{pfe} = 4198 \text{ J/kg.K}$

$$T_{fs} = T_{fe} + \frac{\dot{m}_q \cdot C_{pref} \cdot (T_{qe} - T_{qs})}{\dot{m}_f \cdot C_{pf}}$$

$$T_{fs} = 279 + \frac{8.4179,7 \cdot (303 - 293)}{7,8 \cdot 4198}$$

$$T_{fs} = 289,21 \text{ K}$$

$$T_{fs} = 16,21^\circ\text{C}$$

Desta forma, utilizando $T_{qs} = 20^\circ\text{C}$ foi obtido uma $T_{fs} = 16,21^\circ\text{C}$ sendo uma temperatura superior a desejada no processo, entre 9 e 10°C . Com isso, serão realizadas as iterações necessárias até encontrar o valor ótimo.

Após realizar 10 iterações foram obtidos os seguintes resultados da tabela 07:

Tqs1	289	Tref1	296	Cp'1	4180,6
Tqs2	280	Tref2	291,5	Cp'2	4176,4
Tqs3	280,7	Tref3	291,85	Cp'3	4176,26
Tqs4	281,3	Tref4	292,15	Cp'4	4176,14
Tqs5	282,2	Tref5	292,55	Cp'5	4175,98
Tqs6	283,9	Tref6	293,45	Cp'6	4175,62
Tqs7	284,2	Tref7	293,6	Cp'7	4175,56
Tqs8	295,3	Tref8	299,15	Cp'8	4179,34
Tqs9	298	Tref9	300,5	Cp'9	4178,8
Tqs10	300	Tref10	301,5	Cp'10	4178,7

Tabela 07. Iterações. Fonte: O Autor 2022

Cálculo Tfs			
Tfs'1(K)	293,2995	Tf1'1(°C)	20,29946
Tfs'2(K)	302,4684	Tfs'2(°C)	29,46837
Tfs'3(K)	301,7533	Tfs'3(°C)	28,75335
Tfs'4(K)	301,1405	Tfs'4(°C)	28,14052
Tfs'5(K)	300,2214	Tfs'5(°C)	27,22143
Tfs'6(K)	298,4853	Tfs'6(°C)	25,48531
Tfs'7(K)	298,179	Tfs'7(°C)	25,17898
Tfs'8(K)	286,8623	Tfs'8(°C)	13,86233
Tfs'9(K)	284,1048	Tfs'9(°C)	11,10475
Tfs'10(K)	282,0628	Tfs'10(°C)	9,062777

Tabela 08. Iterações. Fonte: O Autor 2022.

Com isso, após os devidos cálculos obtivemos os parâmetros do sistema para atender ao processo:

- $T_{fe} = 279 \text{ K}$
- $\dot{m}_q = 8 \text{ m}^3/h$
- $C_{pqs} = 4178,7 \text{ J/kg.K}$
- $T_{qe} = 303 \text{ K}$
- $T_{qs} = 300 \text{ K}$
- $\dot{m}_f = 7,8 \text{ m}^3/h$
- $C_{pfe} = 4198 \text{ J/kg.K}$
- $T_{fs} = 282,06 \text{ K}$

4.2. DETERMINAÇÃO DA ÁREA DAS PLACAS

4.2.1 CÁLCULO DA MÉDIA LOGARÍTIMICA DAS TEMPERATURAS

Para a determinação da área das placas, será utilizado o método da média logarítmica das diferenças de temperatura, como já é conhecida as temperaturas de entrada e saída quente e fria, esse método irá fornecer a partir das equações 6 e 7, qual é área das placas dos trocadores necessária para atender a demanda do processo entre 9 e 10°C.

$$Qx = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$$

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{lm}}$$

- $\Delta T_{ent} = (T_{qe} - T_{fs}) = (303 - 282,06) = 20,93 \text{ K}$
- $\Delta T_{sai} = (T_{qs} - T_{fe}) = (300 - 279) = 21 \text{ K}$

$$\text{Onde } \Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_{ent} - \Delta T_{sai}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{ent}}{\Delta T_{sai}}\right)}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{21 - 20,93}{\ln\left(\frac{21}{20,93}\right)} = \frac{0,07}{0,003338}$$

$$\Delta T_{lm} = 20,97K$$

4.3. CÁLCULO DA QUANTIDADE DE CALOR

Para o cálculo da quantidade de calor do sistema, será utilizada a Equação 1.

$$Q = \dot{m}_f \cdot C_{pf} \cdot (T_{fs} - T_{fe})$$

$$Q = 7,8 \cdot 4178,7 \cdot (282,06 - 279)$$

$$Q = 99,827 KJ$$

4.3.1. CÁLCULO DA ÁREA DO TROCADOR DE CALOR

Para o cálculo da área, é necessário o Coeficiente global de transferência de calor, para isso foi consultado o fornecedor do trocador de calor, $U = 3095 \text{ W/(m}^2 \cdot K)$ e que cada placa tem uma área de $0,08 \text{ m}^2$.

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{lm}}$$

$$A = \frac{99827,73}{3095 \cdot 20,97}$$

$$A = 1,53 \text{ m}^2$$

$$\text{Número de placas} = \frac{1,53}{0,08} = 19,125$$

Teremos um trocador de placas com 20 placas, arredondando para garantir a melhor eficiência.



Figura 09. Trocador de calor de placas Modelo T5M. Fonte: <https://www.alfaengenharia.com.br/pdf/trocadores-de-calor-gaxetados/industriais/trocador-de-calor-placa-e-quadro-com-gaxetas-alfa-laval-t5.pdf>.

4.4. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A fim de validar os resultados obtidos com os cálculos teóricos, foi solicitado junto ao fabricante do trocador de calor um estudo utilizando um software proprietário para dimensionamento de trocadores de calor, onde os parâmetros das temperaturas de entrada foram utilizados. A área calculada e a temperatura fria final para o processo no estudo do presente trabalho foi de $A=1,53 \text{ m}^2$ e $9,06^\circ\text{C}$, respectivamente, já para o estudo do fabricante, os valores foram bem próximos, $A=1,764 \text{ m}^2$ e $9,5^\circ\text{C}$, obtendo valores bem satisfatórios, um erro na temperatura calculada menor que 5% e um erro na área de 13%. Falando da quantidade de placas, de acordo com o fabricante, a área de uma placa é de $0,08 \text{ m}^2$, com isso, pelos resultados teóricos chegou-se a 20 placas e pelos resultados do fornecedor, 21 placas. Uma das recomendações do fabricante para melhorar a efetividade dos equipamentos, aumentando a área de troca térmica dos equipamentos, em um total de 22%, assim, aumentando a garantia de temperatura final, chegando a 26 placas aproximadamente.

The software interface displays the following data:

Left Panel (Inputs):

- Rating: 69.32 kW
- Water flow: 5.0 m³/h
- Hot water inlet: 32.0 °C
- Hot water outlet: 25.0 °C
- Cold water inlet: 9.5 °C
- Cold water outlet: 6.5 °C
- Water flow: 7.9 m³/h
- ΔT = 0.8532/0.8440
- LMTD: 14.1 K
- Material: T5M, ALLOY 316, 0.50 mm

Right Panel (Sorted selection):

- 1 T5M ALLOY 316 0.50 mm 1.00
- 21 plates 1.764 m²
- 0.50 mm ALLOY 316
- Margin: 2.00 % k = 3095 W/(m²·K)

	Side 1	Side 2
Design temp	85.0 °C	85.0 °C
Design press	10.00 bar	10.00 bar
Pressuredrop	7.713 kPa	8.002 kPa
Grouping	1* (6MH+4L)	1* (6ML+4L)
Dp(p+co)	0.3009 kPa	0.3055 kPa
v (co)	0.7074 m/s	0.7094 m/s

Bottom Panel:

- Buttons: Rating, More...
- Buttons: Grouping, More...
- Buttons: Edit mode, More..., Ph. prop.

Figura 10. Resultados obtidos utilizando *software* interno do fabricante do trocador de calor. Fonte: O fornecedor do trocador de calor (2022).

5. CONCLUSÕES

As informações e dados apresentados neste trabalho contribuem de forma significativa o campo do estudo, pois a partir das análises e princípios de funcionamento e aplicação da metodologia ACR conheceu-se mais detalhadamente o sistema analisado e mapeou-se as melhores oportunidades a partir das ferramentas 5W1H, Diagrama de Ishikawa e 5 por quês. Foi realizado um estudo termodinâmico, reformulou-se os planos de manutenção e feita uma manutenção geral nas placas e gaxetas, erradicando as pequenas paradas pelo mal dimensionamento do trocador de calor.

Conforme apresentado ao longo do trabalho, foi possível atingir todos os objetivos propostos. Dentre eles o mais importante, a realização de um estudo termodinâmico para a adequação do mal dimensionamento do trocador de calor, tendo um resultado teórico com um erro de 5% na temperatura fria de saída para o processo, um erro de 13% na área do trocador de calor e apontou um número de 20 placas do trocador de calor coerente com o número de 21 placas sugerido pelo *software* interno do fabricante. Sendo assim, garantindo um bom dimensionamento em comparado e melhorando o processo da indústria estudada

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trocador de calor recebe água gelada a 6,0°C de um Chiller A que envia esta água industrial para vários equipamentos da fábrica, como por exemplo, Fancoils, termorreguladores, outros trocadores de calor, uma mudança na temperatura de envio irá afetar todos estes equipamentos dificultando a possibilidade de variação de temperatura caso necessário para pontos específicos. Este Chiller tem uma importância enorme no processo de toda fábrica, quaisquer modificação em seus parâmetros irá afetar a fábrica em grande escala.

Sendo assim, sugere-se um estudo para modificar a alimentação atual para outro Chiller B com a capacidade de diminuir a temperatura de 6,0°C. Esta modificação poderá melhorar as possibilidades de controle de temperatura para

o processo, o qual irá melhorar o processo do forno e não impactar em outros processos.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABU-KHADER, M. M. Plate heat exchangers: Recent advances. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 4, p. 1883-1891, 2012.

BEHR, A.; MORO, E. L. S.; ESTABEL, L. B. Gestão da biblioteca escolar: metodologias, enfoques e aplicação de ferramentas de gestão e serviços de biblioteca. *Revista Ciência da Informação*, 2008, v.37, n.2, p.32-42.

CARDIN, G.; CARDIN, H.; CHAVES, C.; ZARATIN, M.; NETO, A.; CAMARGO, E. Aplicação do desdobramento da função qualidade em um serviço de alimentação. *Revista Soluções Para o Desenvolvimento do País*, 2014, v. 9, n. 97, p 47-52.

CARDOSO DIAS, Penha Maria. A (Im) Pertinência da História ao Aprendizado da Física (Um Estudo de Caso). P. 231. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

COSTA, Taiane Barbosa da Silva*; MENDES, Meirivone Alves; Análise da causa raiz: Utilização do diagrama de Ishikawa e Método dos 5 Porquês para identificação das causas da baixa produtividade em uma cacauicultura; Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Universidade do Estado do Pará, p.6. 2018
DE OLIVEIRA, Mário José. Termodinâmica, p.13, 44. São Paulo, 2005.

ÇENGEL, Yunus A, Afshin J. Ghajar. Transferência de Calor e Massa; Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos da Unicamp; 4 Ed. 2012.

FERREIRA, Antônio Carlos, ESTUDO COMPARATIVO DA TROCA TÉRMICA EM TROCADORES DE CALOR DOS TIPOS CASCO/TUBOS E DE PLACAS; Unoesc & Ciência-ACET; 2014; p. 58.

GUTIERREZ, Carola Gean Carla Caverio; ANÁLISE DINÂMICA DE UM PROCESSO CONTÍNUO DE PASTEURIZAÇÃO EM TROCADORES DE CALOR A PLACAS; USP; 2013. p. 30.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009 vol 4.

INCROPERA, Frank P, Dewitt, David P; Bergman, Theodore L; Lavine, Adrienne S. Fundamentos de transferência de calor e de massa, Rio de Janeiro, 2008.

JUNIOR, Celso Carlino Maria Fornari. Aplicação da Ferramenta da Qualidade (Diagrama de Ishikawa) e do PDCA no Desenvolvimento de Pesquisa para a reutilização dos Resíduos Sólidos de Coco Verde. Universidade Federal de Santa Cruz (UESC), 2010.

LENZI, Fernando C.; KIESSEL, Daniel M.; ZUCCO, Fabricia D. Ação empreendedora: como desenvolver e administrar o seu negócio com excelência. São Paulo: Gente, 2010.

LIZARAZU, Marcelo Silveira Dantas. Otimização Multiobjetivo Aplicada à Eficiência Energética de Torres de Resfriamento. 8, 39. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MAGALHÃES, Ivan L.; BRITO, Walfrido. Gerenciamento de serviços de TI na prática: uma abordagem com base na ITIL. São Paulo: Novatec, 2007. (Série Gerenciamento de TI).

Mercado brasileiro de chocolates cresce 44% em 2021. Terra, 2022. Disponível em <https://www.terra.com.br/noticias/mercado-brasileiro-de-chocolates-cresce-44-em-2021,c70895c35792f175e508e712ad4537fahi7nndd59.html>. Acesso em: 08 de outubro de 2022.

MIGUEL, P.A.C. Qualidade: enfoques e ferramentas.. 1 ed. São Paulo: Artliber, 2006.

MOREIRA, José R. Simões, Notas de aula de Processos de Transferência de Calor. Universidade de São Paulo. p.1. 2008.

NAVAS Helena V.G. Brainstorming – gerador de ideias criativas. Vida Economica, Newsletter N.78. Dezembro 2016.

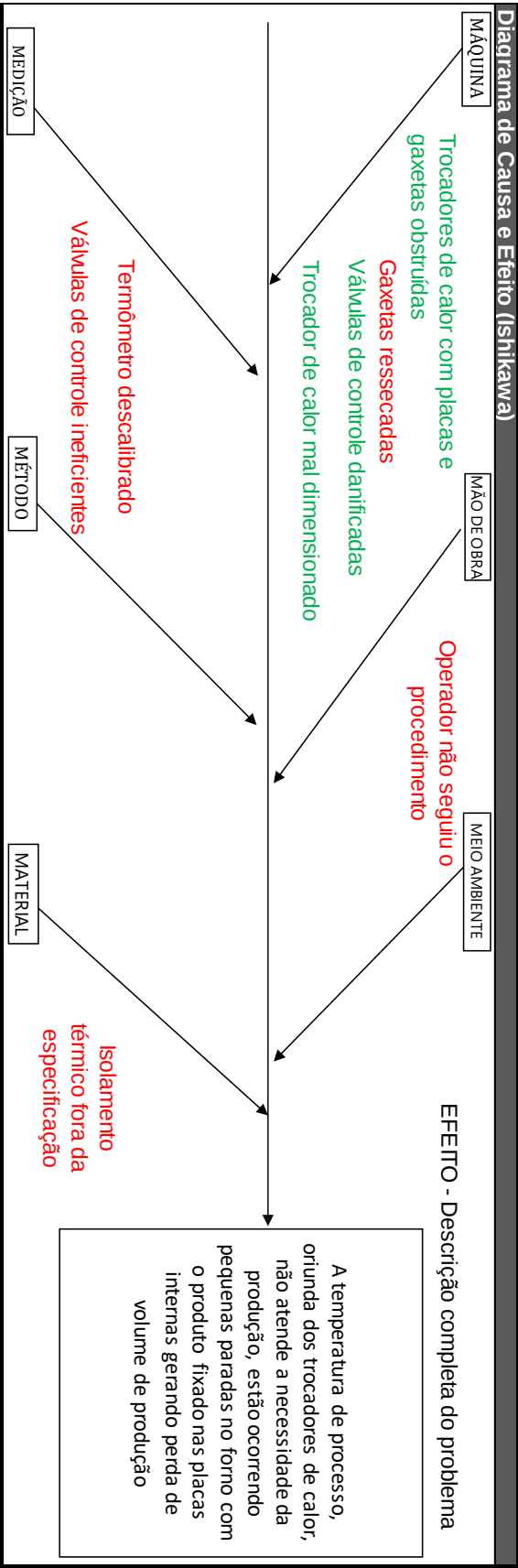
RISTOF, Clovis Adelar Mattjie Renato, Dimensionamento de um trocador de calor para resfriamento de fluido em um circuito hidráulico utilizado em uma plantadeira, Faculdade Horizontina, Horizontina, 2013.

ROHSENOW, Warren M; Hartnett, James P; Cho, Young I, Handbook of heat transfer. New York, 1998).

ROONEY, J. J.; VANDEN HEUVEL, L. N. Root Cause Analysis For Beginners. SABINO, Ricardo Schayer. Inspeção de Feixes Tubulares de Trocadores de Calor. 2008. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2008.

WEISS, A.E. Key business solutions: essential problem-solving tools and techniques that every manager needs to know. Grã-Bretanha: Pearson Education Limited, 2011.

8. ANEXOS.



Anexo 01. Diagrama de Ishikawa. Fonte: O Autor (2022).