

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME VENTURI RONCHI

**METODOLOGIA DE PROJETO TÉRMICO DE UM TROCADOR DE CALOR
DUPLO TUBO**

GUARAPUAVA

2022

GUILHERME VENTURI RONCHI

**METODOLOGIA DE PROJETO TÉRMICO DE UM TROCADOR DE CALOR
DUPLO TUBO**

Thermal project of a double pipe heat exchanger

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Dalmás

GUARAPUAVA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GUILHERME VENTURI RONCHI

**METODOLOGIA DE PROJETO TÉRMICO DE UM TROCADOR DE CALOR
DUPLO TUBO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 23/11/2022

Doutor Sergio Dalmás
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Doutora Denise Alves Ramalho
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Doutora Carla Dantas da Silva
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2022

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus familiares e colegas, que de alguma forma me incentivaram a finalização deste curso.

RESUMO

Na indústria alimentícia, em destaque a indústria produtora de carne, a geração de rejeitos animais é uma das principais preocupações. Estima-se que mais da metade da massa do animal abatido se torne rejeito. Diante disso, a indústria de reciclagem animal ganhou destaque, automatizando processos e obtendo certificações reconhecidas mundialmente. Estudos revelam que praticamente todo o rejeito animal pode ser reaproveitado. Gorduras, gelatinas e farinhas são exemplos de produtos obtidos pela reciclagem. Na obtenção de farinhas, uma das etapas requer o resfriamento da água de cola, um fluido multifásico que contém proteína, gorduras e água. Nesse sentido, o projeto de trocador de calor (TC) é imprescindível para o arrefecimento adequado em muitos equipamentos desta indústria, inclusive devido a minimização dos riscos de contaminação a ela inerentes. Um projeto de um TC, satisfazendo requisitos do processo, além de garantir o funcionamento da indústria, pode minimizar custos. Dessa forma, o presente trabalho consiste no projeto de um TC do tipo duplo tubo (TCDT), utilizando os conceitos de metodologia de projeto de máquinas e, focando nas análises térmica e fluidodinâmica. Em vista dessa proposta, o estudo visa apresentar as principais etapas do projeto de produtos, desde a identificação do problema, até a obtenção do leiaute e o detalhamento dos procedimentos de produção. Para aplicar a metodologia de projeto de máquinas, um estudo de caso de uma linha de reciclagem animal foi apresentado. A partir de modelos matemáticos e perícia na área, desenvolveu-se um TCDT apresentando todas as considerações necessárias durante a fase de projeto. Note-se que durante o projeto, algumas limitações foram encontradas, dentre elas, citam-se a necessidade de equipes multidisciplinares, restrições comerciais e técnicas, entre outras. Conclui-se que o emprego de metodologias de projeto de máquinas garante um planejamento estruturado de todas as atividades ao longo do projeto.

Palavras-chave: trocador de calor; termodinâmica; modelagem; projeto.

ABSTRACT

In the food industry, especially the meat industry, the generation of animal waste is one of the main concerns. It is estimated that more than half of the mass of the slaughtered animal becomes tailings. In view of this, the animal recycling industry gained prominence, employing technological equipment, automating processes and obtaining globally recognized certifications. Studies show that virtually all animal waste can be reused. Fats, gelatins and flours are examples of products obtained by recycling. In obtaining flours, one of the steps requires the cooling of cola water, a multiphase fluid that contains protein, fats and water. In this sense, adequate cooling, minimizing the risks of contamination inherent in this industry, the design of heat exchangers (HE) are essential. A proper design of a HE, satisfying process requirements, in addition to guaranteeing the operation of the industry, can minimize costs. Thus, the present work consists of the design of a double tube HE (DPHE), using the concepts of machine design methodology and, focusing on thermal and fluid dynamics analyses. In view of this proposal, the study aims to present the main stages of product design, from problem identification, to obtaining the layout and detailing the production procedures. To apply the machinery design methodology, a case study of an animal recycling line was presented. From mathematical models and expertise in the area, a DPHE was developed presenting all the necessary considerations during the design phase. Note that during the project, some limitations were encountered. Among them, we mention the need for multidisciplinary teams, commercial and technical restrictions, among others. It is concluded that the use of machine design methodologies guarantees a structured planning of all activities throughout the project.

Keywords: heat exchanger; thermodynamics; modelling; project.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de reciclagem animal	19
Figura 2 – Trocador de calor compacto	21
Figura 3 – Trocador de calor casco e tubo	22
Figura 4 – Trocador de calor de placas	23
Figura 5 – Trocador de calor duplo tubo	23
Figura 6 – Trocador de calor duplo tubo de fluxo paralelo	29
Figura 7 – Trocador de calor duplo tubo de contra corrente	30
Figura 8 – Transferência de calor do fluido quente para o fluido frio	31
Figura 9 – Fluxograma de atividades previstas no projeto detalhado	35
Figura 10 – Diagrama de tubulação e instrumentação do processo de reciclagem animal	40
Figura 11 – Planilha eletrônica utilizada para os cálculos	49
Figura 12 – Modelagem em ambiente computacional do Trocador de calor duplo tubo de contra corrente	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperaturas e estado da água de cola em uma planta de reciclagem animal	42
Tabela 2 – Velocidades econômicas dos tipos de água	43
Tabela 3 – Composição de amostras de água de cola em baixas temperaturas	43
Tabela 4 – Resumo dos requisitos de projeto	46
Tabela 5 – Aços inox disponíveis	46
Tabela 6 – Velocidades da água de cola para os diferentes tubos comerciais, em m/s	48
Tabela 7 – Temperaturas de saída da água de resfriamento, em $^{\circ}C$	50
Tabela 8 – Vazões mássicas da água de resfriamento, em $kg/hora$	51
Tabela 9 – Número de passes do trocador de calor	52
Tabela 10 – Características obtidas no projeto detalhado do TC com 17 passes	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Acrônimos

ABRA	Associação Brasileira de Reciclagem Animal
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
DTML	Método da Diferença de Temperatura Média Logarítmica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FOA	Farinha de origem animal
OD	Outside Diameter
PID	Piping and Instrumentation Diagram
T	Temperatura
TC	Trocador de calor
TCDT	Trocador de calor duplo tubo
TIG	Tungsten Inert Gas

Siglas

A_s	Área da superfície de transferência de calor
C	Capacidade térmica do fluido
c	Calor específico
D	Comprimento característico
dq	Balço de energia dos elementos diferenciais
f	Fator de atrito de Darcy
g	Gravidade
L	Comprimento do Tubo
m	Vazão mássica
q	Calor

Q	Taxa de transferência de calor
U	Coeficiente global de transferência de calor
ΔT_m	Diferença de temperatura média entre os dois fluidos
ΔT	Diferença de temperatura local entre os fluidos quente e frio
ΔP_l	Perda de pressão
ΔH_l	Perda de carga
ν	Viscosidade cinemática do fluido
$\varepsilon - NTU$	Efetividade térmica
Re	Número de Reynolds
V_{med}	Velocidade média de escoamento
μ	Viscosidade dinâmica
ρ	Densidade
ε	Rugosidade
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
c	Subscrito frio (<i>cold</i>)
h	Subscrito quente (<i>hot</i>)
i	Subscrito entra (<i>in</i>)
o	Subscrito sai (<i>out</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Considerações iniciais	12
1.2	Objetivos	13
1.3	Justificativa	13
1.4	Estrutura do trabalho	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Indústria de Reciclagem Animal	15
2.1.1	O Processo de Reciclagem Animal	18
2.2	Trocadores de calor	19
2.2.1	Trocadores de calor compactos	20
2.2.2	Trocadores de calor casco e tubo	21
2.2.3	Trocadores de calor de placas	22
2.2.4	Trocadores de calor regenerativos	22
2.2.5	Trocadores de calor duplo tubo (TCDT)	23
2.3	Metodologia de projeto térmico de trocador de calor	24
2.4	Análise de um Sistema Térmico - Trocador de Calor	25
2.4.1	Cálculo de trocadores de calor duplo tubo - Análise fluidodinâmica	25
2.4.2	Cálculo de trocadores de calor duplo tubo - Análise de transferência de calor e massa	27
2.4.2.1	Coeficiente Global de Transferência de Calor	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Identificação do Problema	33
3.2	Desenvolvimento de Requisitos	33
3.3	Projeto Conceitual	34
3.4	Projeto Detalhado	34
3.5	Produção	38
3.5.1	Modelagem 3D	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	Identificação do Problema	39

4.2	Desenvolvimento dos Requisitos	41
4.2.1	Volume de produção	41
4.2.2	Temperatura alvo da água de cola	42
4.2.3	Requisitos fluidodinâmicos	42
4.2.4	Questões sanitárias	44
4.3	Projeto Conceitual	44
4.4	Projeto Detalhado	46
4.5	Produção	54
4.5.1	Modelagem 3D	54
5	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A indústria de alimentos processados e, principalmente a indústria de reciclagem animal (*rendering industry*) ganhou destaque nos últimos cem anos. Nesse período, produtos que muitas vezes eram descartados puderam ser beneficiados, em decorrência do avanço tecnológico, foram beneficiados, seu valor agregado se elevou e hoje representa um segmento importante no tratamento de resíduos agrícolas (NATES, 2006).

De acordo com Woodgate e Veen (2004), cerca de 50% da massa dos animais abatidos utilizados na produção de carne para o consumo humano na Europa se tornam subprodutos. Esses subprodutos possuem altos níveis de água e composição biológica e microbiológica que, caso não sejam manejados adequadamente, podem levar a decomposição e a poluição ambiental (BARROS; LICCO, 2007b).

No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Reciclagem Animal (2021), mais de 13 milhões de toneladas de resíduos de abate foram gerados no ano de 2021, os quais foram utilizados na produção de mais de 5,5 milhões de toneladas farinhas e gorduras. Estima-se que esse ramo industrial tem o maior potencial de reciclagem e, conforme a referência anterior, o Brasil recicla ao ano 100% dos resíduos provenientes de estabelecimentos de abate e varejistas. Nesse sentido, a reciclagem animal, além do importante aspecto ambiental, representa oportunidades no âmbito econômico e social.

A reciclagem animal pode ser realizada por dois sistemas principais e distintos: o sistema úmido (*wet system*) e sistema seco (*dry system*). Esses sistemas podem ter modo de produção contínuo ou por batelada.. Na prática, existem outros sistemas de produção, no entanto, eles são variações destes sistemas, a fim de atender os avanços tecnológicos e as legislações sanitárias vigentes (WOODGATE; VEEN, 2004).

Um ponto em comum de ambos os sistemas produtivos é a injeção de calor nos resíduos animais nos estágios iniciais do processo (WOODGATE; VEEN, 2004). Segundo Meeker (2009), durante o estágio de cozimento, a temperatura e o tempo de duração são críticos para a qualidade do produto acabado. Segundo a Instrução Normativa número 34, após os estágios iniciais da reciclagem animal, os resíduos animais devem esterilizados, isto é, devem ser aquecidos até atingirem uma temperatura de pelo menos 133°C, durante pelo menos vinte minutos ininterruptos, a uma pressão de pelo menos três bar, produzida por vapor saturado (MAPA, 2008).

Devido à injeção de calor durante o estágio de cozimento e esterilização, muitas vezes, trocadores de calor são necessários nas etapas posteriores do processo de reciclagem animal.

A primeira situação, segundo Sindt (2006), é destinada para o controle de odores. Os equipamentos usados produzem grandes quantidades de gases e vapores quentes, os quais podem ser difíceis de lidar ou descartar de forma responsável. Logo, os trocadores de calor são utilizados para trazerem os vapores rapidamente para a forma líquida, facilitando o manuseio

para o posterior tratamento. Comumente, trocadores de calor do tipo casco tubo são utilizados com essa finalidade.

A segunda situação que utiliza os trocadores de calor se refere a compatibilização da temperatura da mistura multifásica nas fases posteriores do processo de reciclagem animal, normalmente, empregada tanto em sistemas de produção contínua ou por bateladas.

Um das principais atividades em que os trocadores de calor são empregados é no resfriamento da água de cola, a qual será concentrada e utilizada na fabricação de farinhas de origem animal (FOA). Água de cola é um líquido que contém proteína e gordura e resultante das fases intermediárias da reciclagem animal.

Devido à mistura multifásica conter sólidos, a aplicação de trocadores de calor se torna restrita para essa finalidade. Por exemplo, os trocadores de calor de placas ou os trocadores de calor regenerativos, em função dos aspectos construtivos, não são indicados, pois, os sedimentos sólidos podem se acumular no interior do equipamento, ocasionando o seu entupimento. Nesse caso, os trocadores de calor do tipo duplo tubo são um dos mais indicados.

No entanto, o projeto de trocadores de calor, além de atender a principal função de resfriamento, deve se preocupar com outros requisitos, os quais variam para cada aplicação. No caso da indústria de reciclagem animal, considerado um sub-ramo da indústria alimentícia, por exemplo, requisitos de segurança alimentar são exigidos (ISO, 2015; ISO, 2018).

Desse modo, metodologias de projeto são difundidas e utilizadas com a finalidade de otimizar o equipamento à aplicação. Estas metodologias são conjunto de técnicas destinadas a dimensionar e dar forma às peças, escolher os materiais e os processos de manufatura apropriados, de modo que a máquina resultante possa desempenhar a função desejada sem falhar (NORTON, 2013).

Segundo Norton (2013), o sucesso de um projeto de qualquer natureza depende da validade e adequação dos modelos de engenharia utilizados para prever e analisar seu comportamento antes da construção de qualquer máquina. Nesse âmbito, o processo de projeto exige uma abordagem clara, organizada, concisa e principalmente de uma compreensão completa dos princípios básicos e dos fundamentos da engenharia.

Visto a importância dos trocadores de calor na indústria de reciclagem animal, e em um ambiente industrial competitivo, a necessidade de otimização de equipamentos para obter vantagens mercadológicas, o presente trabalho tem como objetivo realizar um projeto térmico de um trocador de calor do tipo duplo tubo utilizando conceitos de metodologia de projeto de máquinas.

1.1 Considerações iniciais

O projeto do TCDT seguirá uma metodologia pré-definida, a qual consiste em cálculos termodinâmicos e, em seguida, sua modelagem tridimensional. Devido à experiência do autor,

algumas aproximações serão utilizadas para garantir uma solução adequada para os requisitos de projeto.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é de se desenvolver o projeto mecânico de um trocador de calor duplo tubo (TCDT) para resfriamento de líquido multifásico, isto é, o que contém sólido e líquido.

Para cumprir com o objetivo geral do trabalho, os seguintes passos são necessários:

1. Revisão bibliográfica da indústria de Reciclagem Animal;
2. Revisão bibliográfica sobre trocadores de calor e suas aplicações;
3. Listagem de requisitos de projetos do trocador de calor duplo tubo;
4. Cálculos termodinâmicos necessários para o dimensionamento do trocador de calor duplo tubo;
5. Seleção de materiais adequados para o tipo de aplicação;
6. Projeto do modelo de trocador de calor via ferramenta CAD (*Computer Aided Design*);

1.3 Justificativa

O estudo e o desenvolvimento de novas soluções na indústria de reciclagem animal têm uma demanda crescente, sendo necessário a criação de equipamentos cada vez mais específicos para determinada aplicação.

Sabendo desta realidade, busca-se o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes e, no que tange aos trocadores de calor, além da eficiência de troca térmica, outras características são exigidas. Como o fluido a ser resfriado nas fases iniciais do processo possui alta concentração de sólidos, existe a necessidade de utilizar um trocador de calor com características geométricas que mitigue o acúmulo de material em seu interior, evitando a obstrução do canal. Para este tipo de aplicação, um dos trocadores de calor mais adequados é o do tipo duplo tubo. Diferentemente dos trocadores de placas e de casco tubo, apresenta uma seção maior para o escoamento da mistura multifásica, garantindo então o escoamento com menor perda de carga, o que nos outros trocadores pode ser dificultada pela pequena seção disponível para a passagem da mistura líquido-sólido.

Portanto, o presente trabalho visa dar suporte ao projeto de trocadores de calor duplo tubo, mostrando não somente os cálculos de troca de calor entre os fluidos, mas também apresentando a importância da metodologia de projeto para o projeto do equipamento, auxiliando o engenheiro na tomada de decisão para obter as melhores soluções.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho de conclusão de curso está estruturado em cinco capítulos. O presente capítulo, Introdução, apresentaram-se os conceitos iniciais sobre a indústria de reciclagem animal e o uso de trocadores de calor na planta de processo. Adicionalmente, delimitou o objetivo do trabalho, justificando sua escolha.

No Capítulo 2, Fundamentação teórica, realiza-se a revisão bibliográfica sobre a indústria de reciclagem animal, sobre trocadores de calor e, por fim, a metodologia de projeto de trocadores de calor.

Em Materiais e métodos, Capítulo 3, apresenta-se a metodologia utilizada neste trabalho para o projeto do trocador de calor do tipo duplo tubo, enquanto que no Capítulo 4, Resultados e discussões, são apresentados os cálculos termodinâmicos, a escolha de material e o modelo tridimensional do equipamento.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento do trabalho, assim como, propostas para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este Capítulo visa apresentar, descrever e conceituar os tópicos indispensáveis para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

Inicialmente, será apresentado e descrito o processo de reciclagem animal e as etapas onde os trocadores de calor são imprescindíveis. Consequente, definir-se-á trocadores de calor, os principais tipos e, a aplicação dos mesmos. Por fim, será apresentada a metodologia de projeto de um TC, isto é, os cálculos termodinâmicos, a escolha de material e, a modelagem por ferramenta de desenho assistida por computador.

2.1 Indústria de Reciclagem Animal

O Brasil, como um dos grandes produtores de carne do mundo (LUCIARI, 2006), sofre com uma grande questão debatida na indústria alimentícia, a dos resíduos animais, tornando-se um grande contribuinte para o alto índice poluidor na área de produção de carne, devido às suas características individuais e alta perecibilidade. Como principal alternativa para o descarte correto desses resíduos, se encontra a reciclagem animal, que trabalha com produtos não destinados ao consumo humano (SILVA, 2019).

A indústria brasileira de reciclagem animal, em 2018, transformou aproximadamente 12,5 milhões de resíduos de origem animal, produzindo, então, cerca de 5,3 milhões de toneladas de farinha e gorduras, produto destinado como principal recurso, à alimentação de animais de produção (Associação Brasileira de Reciclagem Animal, 2021).

Contudo, as empresas processadoras de rejeitos animais são, habitualmente, deixadas de lado pelas demais cadeias de carnes e suas derivações. Além, da falta de políticas públicas com o foco total no setor e suas derivações, estas empresas são prejudicadas pela falta de leis que facilitem a sua expansão. Também, há altas tributações fiscais e ambientais, e somado ao alto custo operacional usual do setor, ocorre a falta de interesse na área. Muito se tem a respeito da qualidade e preparação dos setores da carne, mas pouco se fala sobre a regulamentação sanitária dos rejeitos, seus perigos e o impacto ambiental do descarte incorreto do material (BARROS; LICCO, 2007b). Desta maneira, é notável a ameaça frequente onde o setor de reciclagem animal se encontra, demonstrando a necessidade crescente de articulação deste setor com seus compradores e fornecedores.

O investimento em estudos permite melhorar e avaliar os dados e informações e estabelecer a importância do processamento correto dos referidos resíduos, sendo então, fundamental para a competitividade brasileira a longo prazo no ramo da carne, mantendo uma qualidade e índice de destinação correta a esse tipo de material. Contudo, os dados da indústria de processamento de resíduos se encontram muito limitados, contribuindo então, para o seu afastamento de toda indústria de alimentos, mas, é necessário haver um levantamento profundo da sua importância, e do investimento em novas tecnologias (SILVA, 2019).

Materiais orgânicos quando expostos ao ambiente, sob condições normais, sofrem ação de fatores físicos e biológicos do meio em que se encontram, decompostos em substâncias mais simples. Esse processo de decomposição acontece pela ação de bactérias e enzimas, que precisam de certas condições de temperatura e umidade, mas também, de elementos com certo grau de nutrição para o seu funcionamento (BARROS; LICCO, 2007b).

Segundo Barros e Licco (2007b), outros fatores também afetam esses alimentos, como: desidratação, oxidação, ataque de parasitas, entre outras condições. Essas ações mudam a composição do alimento. A decomposição indesejada por bactérias e a facilidade que ocorrem o apodrecimento, varia com diversos fatores, como o que está diluída na água, no sangue do animal, entre outros processos devido ao seu meio.

O tecido animal, quando degradado, serve de ponto ideal para transmissão e perpetuação de doenças, assim, podendo atingir o homem e os próprios animais, sendo então, um grande meio para a proliferação de microrganismos, muitos dos quais, patogênicos. Mesmo com a evolução do sistema de controle de gestão dos alimentos, ainda ocorre casos de contaminação alimentar. Os chamados patógenos emergentes apresentam características semelhantes, devido ao fato de utilizarem os animais como reservatório natural, do qual, a partir deles, contaminam o homem (BARROS; LICCO, 2007b).

Ainda consoante com o estudo de Barros e Licco (2007b), o acúmulo de matéria orgânica com alto índice de apodrecimento, como carnes e produtos derivados do abate, em ambientes como casas de carnes, açougues, matadouros e supermercados, implica no acréscimo dos índices de riscos de várias ordens, como: risco laboral, risco ambiental, e, risco a saúde pública.

Nessa lógica, a utilização racional dos subprodutos e resíduos vindos da carne, além de apresentar grande importância econômica para o Brasil, é de suma importância o estudo e o controle aos aspectos laboral, ambiental e de saúde pública, pois, a falta de controle e descartes incorretos, transformam a matéria orgânica em poluentes de difícil trato e foco de proliferação de doenças (BARROS; LICCO, 2007b; Associação Brasileira de Reciclagem Animal, 2021).

O principal objetivo dessa indústria, é converter o máximo de dejetos do abate, em produtos secundários comercializáveis ou, co-produtos, tendo a finalidade de diminuir o impacto ambiental e melhorar o processo econômico, ou, diminuir também, o custo de gestão dos resíduos (BARROS; LICCO, 2007b).

De uma maneira geral, não existe regulamentação específica quanto à disposição dos dejetos de carne, ossos e gorduras produzidas pelo comércio da carne. Muitos comércios destinam seus resíduos com o lixo urbano, algo que nem sempre está a parte das leis municipais (FRANCO, 2002).

A reciclagem, geralmente realizada em graxarias, consiste na mudança dos restos animais em óleos, sebos, farinha de origem animal (FOA) e adubos, aumentando a proatividade do uso da matéria, preservando, então, a qualidade ambiental e ampliando as possibilidades de uso. É também, sendo a forma de destinação final mais equilibrada se comparando com a vi-

são de saneamento, economia e meio ambiente (Associação Brasileira de Reciclagem Animal, 2021).

Sendo unidades industriais, as graxarias são destinadas a processar restos de carcaças, apares de carnes, tendões, gorduras e ossos, produzindo FOA, adubos, óleos, sebo e gorduras industriais. A classificação das indústrias de reciclagem animal segundo Battistone e Daniello (1985), se encontram em:

- (a) Unidades integradas aos frigoríficos: processam o sangue capturado, vísceras, sebo e restos fragmentados de ossos e carnes na própria unidade fabril;
- (b) Unidades independentes: processam resíduos animais oriundos de açougues, casas de carne, supermercados, hotéis e restaurantes (BARROS; LICCO, 2007b).

Segundo Miranda (2020), a EMBRAPA estima que, o Brasil abate, por ano, aproximadamente cerca de 39 milhões de bovinos, 37 milhões de suínos, 3.2 milhões de ovinos e caprinos, mais de 6 bilhões de frangos e produz cerca de 700 milhões de toneladas de peixes. A carne para o consumo humano varia entre 50% e 60% do peso vivo desses animais.

Nas indústrias de reciclagem animal, o material sofre diversas transformações físicas e químicas, em processos envolvendo aquecimento, desidratação, separação e moagem de ossos, carnes, gorduras e outros materiais orgânicos. Como matéria-prima, têm-se os resíduos animais e o calor. Como saídas, ou produtos produzidos, têm-se os óleos, gorduras e sólidos ricos em proteínas, além dos efluentes e resíduos de transformação (Associação Brasileira de Reciclagem Animal, 2021).

Há duas vias de processamento dos resíduos animais: a úmida e a seca.

Segundo Sell (1992 apud BARROS; LICCO, 2007b), o processo por via úmida, gera efluente líquido com alta carga orgânica, tornando o método obsoleto. Podendo ser utilizado em casos específicos de matéria animal comestível, cujo concentrado do efluente líquido, rico em proteínas, e sendo comercializado na indústria farmacêutica.

Gunstone e Norris (1983 apud BARROS; LICCO, 2007b), mostram que, o processo a seco, o material graxo é aquecido sozinho liberando a umidade natural e a gordura. O processo a seco é mais utilizado para matéria animal não comestível, em que o sabor e o odor dos resíduos sólidos proteicos são secundários e as produções de grandes quantidades de farinhas, com alta qualidade, são importantes.

Durante o processo de melhoramento das pesquisas na fabricação de gorduras de fabricação de origem animal, a partir dos anos 1960, os processos contínuos têm sido instalados para substituir os sistemas por batelada. Há variações de processos, mas os sistemas contínuos não se distanciam do processo por batelada, mudando, ocasionalmente, apenas no mecanismo de digestão (WOODGATE; VEEN, 2004).

O sistema contínuo apresenta menor exposição da matéria-prima ao calor, menor espaço físico de instalação e menor consumo de energia, além de permitir maior automatização

do sistema, assim, controlando a relação temperatura, tempo de residência e taxa de carga do digestor. Esse maior controle faz com que o material permaneça por poucos minutos a altas temperaturas no digestor (WOODGATE; VEEN, 2004).

A destinação imprópria dos restos de carne, aparas de tecido animal, sebo e ossos podem gerar um grande impacto ambiental e à saúde pública. As devidas medidas necessárias para conter o avanço de poluentes devem ser combatidas, atualmente, tendo dois tipos de soluções: incineração ou reciclagem (BARROS; LICCO, 2007b).

Segundo Barros e Licco (2007b), como prática não recorrente, tem-se a incineração, pois, apresenta custos elevados de operação e de controle de poluentes, utilizada geralmente como última opção nos casos de material contaminado ou com suspeitas de doenças infecto-contagiosas. Dessa forma, a reciclagem apresenta-se como o melhor método de destinação tanto ambiental e de saúde pública, como também, financeira, a transformação dos resíduos em produtos comerciais se tornam produtos de vendas, gerando receita. Além disso, o armazenamento desse material é mais estável, possibilitando o uso a longo prazo. Então, quanto mais se aproveitam dos resíduos do abate, menor será o impacto ambiental e maior a valorização do sacrifício animal.

A falta de manuseio correto da industrialização da produção de produtos de origem animal, podem acarretar um grande empecilho a geração de itens de consumo, interferindo, então, no segmento que movimenta grandes cifras de valores e causando enormes impactos sociais (BARROS; LICCO, 2007b; Associação Brasileira de Reciclagem Animal, 2021).

O setor, hoje, enfrenta seu maior desafio, alcançar o balanço econômico entre os custos de produção e controle de emissões, além, da sua rentabilidade de suas atividades. Porém, não é discutido de maneira profunda, o quanto a reciclagem animal é benéfica indiretamente à saúde pública (BARROS; LICCO, 2007b; SILVA, 2019).

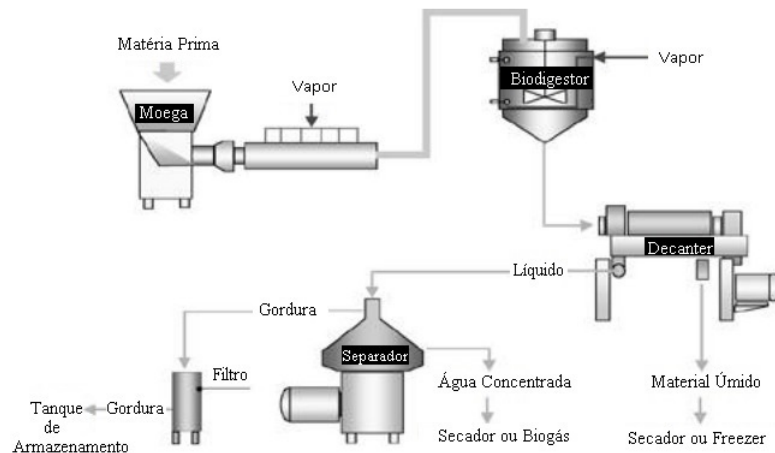
2.1.1 O Processo de Reciclagem Animal

O processo de reciclagem pode ser encontrado em processo úmido, e processo a seco (WOODGATE; VEEN, 2004). A Figura 1 apresenta o fluxo de atividade da reciclagem animal.

Os resíduos são coletados em frigoríficos e açougues e chegam na indústria em até 24 horas em caminhões vedados, contando também com total rastreabilidade da origem do resíduo até a venda do produto acabado (BARROS; LICCO, 2007b; Associação Brasileira de Reciclagem Animal, 2021). Essa recepção dos resíduos acontece em um lugar chamado área úmida, após ser recebido, passa por um triturador, e por tubulações e roscas chega ao digestor (WOODGATE; VEEN, 2004).

O digestor é um equipamento onde o material é aquecido a altas temperaturas, sendo onde se elimina a presença de microrganismos e a água é separada do material sólido e gorduroso, esse equipamento é monitorado por sistemas modernos que garantem o tratamento térmico ideal (MEEKER; HAMILTON *et al.*, 2006). Mas, a partir do digestor, o produto estéril en-

Figura 1 – Processo de reciclagem animal



Fonte: Woodgate e Veen (2004)

tra em uma nova área, chamada de área seca, onde é necessário o uso de roupas adequadas e passar pela barreira sanitária, seguindo os procedimentos padrões de higiene operacional.

Saindo do digestor, o material passa para outra máquina, a prensa, resultado em dois produtos diferentes, a parte sólida, é encaminhada para o moinho, onde se torna farinha de origem animal. A parte gordurosa, passa por um processo de decantação. A farinha pronta é embalada e as gorduras são encaminhados para tanques aquecidos para transporte, e esses produtos são comercializados para diversas indústrias no Brasil e no exterior. Ao longo desse processo, a equipe de controle de qualidade e seu laboratório na indústria realizam diversos testes, onde garantem a padronização dos produtos e a segurança sanitária, atendendo as vigências legais e dos consumidores (Associação Brasileira de Reciclagem Animal, 2021).

Um dos grandes fatores que ocorrem durante o processo, são os odores característicos, tratados em filtros, antes de serem liberados para a atmosfera, se tornando então, totalmente livres de contaminantes (BARROS; LICCO, 2007a).

A reciclagem animal brasileira, é exportada para todo o mundo, em mais de 50 países, sendo exemplo de proteção ambiental e de uso de todo animal. Engenheiros e cientistas brasileiros, estão, cada vez mais, descobrindo métodos e novas tecnologias de melhoramento no processo da área, tornando assim, o país um centro de referência para tal procedimento (Associação Brasileira de Reciclagem Animal, 2021).

2.2 Trocadores de calor

Os TC são equipamentos utilizados para transferir calor entre dois fluidos que estão em diferentes temperaturas. De acordo com Çengel (2012), as correntes de fluidos escoam separadas fisicamente dentro de um dispositivo e, a troca térmica ocorre no sentido do fluido de maior temperatura para o fluido de menor temperatura.

Embora não seja comum a denominação de trocadores de calor, existem dispositivos que realizam a troca térmica pelo contato direto, ou seja, os dois fluidos que realizarão a troca térmica se misturam. Normalmente, esses trocadores de calor são chamados de câmara de mistura e exemplificados pelos chuveiros a gás (ÇENGEL, 2012).

Neste trabalho, considerar-se-á como TC o dispositivo de transferência de calor entre dois fluidos, que estão separados fisicamente.

A transferência de calor entre os fluidos pode envolver alguns mecanismos, dentre eles, citam-se a convecção e a condução (ÇENGEL, 2019). A convecção ocorre em decorrência da movimentação dos fluidos, a qual também envolve transporte de matéria. Por outro lado, a condução ocorre por meio do contato direto entre os átomos dos materiais envolvidos. No caso do TC, em ambos os mecanismos de troca térmica, como não há contato direto entre os fluidos, a troca térmica entre os fluidos ocorre através de um material intermediário, isto é, a parede da tubulação ou placa que os separam (ÇENGEL, 2019; INCROPERA, 2007).

Trocadores de calor são comumente usados em várias aplicações, desde situações cotidianas quanto no âmbito industrial. Por exemplo, podem ser utilizados sistemas de aquecimento e ar condicionamento de residências. Em escala industrial, podem ser utilizados em plantas de geração de energia, de recuperação de calor e em processos químicos. Existe uma grande variedade de TC, os quais podem ser classificados segundo o arranjo de escoamento dos fluidos (corrente paralela ou corrente cruzada) ou pelo tipo construtivo (ÇENGEL, 2012; ÇENGEL, 2019).

Segundo Çengel (2019), cada aplicação exige um projeto adequado de TC, os quais podem ter as mais diversas restrições. Em decorrência das mais variadas aplicações e requisitos de projeto, numerosos tipos de TC foram desenvolvidos.

Conforme os aspectos construtivos, citam-se os seguintes tipos de TC: compactos, casco e tubo, de placas, regenerativos, duplo tubo, e muitas outras variações (ÇENGEL, 2019). Nas próximas subseções serão apresentados os principais tipos de TC segundo o tipo construtivo.

2.2.1 Trocadores de calor compactos

Os TC compactos são projetados para conter uma grande área de transferência de calor por unidade de volume. A área de troca térmica desses TC é obtida por placas finas espaçadas ou aletas fixadas às paredes que separam os fluidos. Essa característica construtiva permite realizar grandes trocas térmicas entre fluidos em volumes limitados (ÇENGEL, 2012; ÇENGEL, 2019).

Nesse sentido, esses equipamentos são empregados em situações em que há restrições de peso e volume, a exemplo de radiadores de automóveis, regeneradores de motores Stirling, e TC vitrocerâmicos de turbinas a gás (ÇENGEL, 2012; ÇENGEL, 2019). Ainda de acordo com os autores em referência, esses dispositivos são empregados quando os fluidos são gás-gás

ou gás-líquido visando minimizar a influência do baixo coeficiente de transferência de calor associado ao fluxo de gás por meio da grande área de contato. A Figura 2 apresenta o arranjo de um TC compacto.

Figura 2 – Trocador de calor compacto



Fonte: Laval (2022)

2.2.2 Trocadores de calor casco e tubo

O TC do tipo casco e tubo é considerado o mais comum em aplicações industriais. Esses dispositivos contêm um grande número de tubos, chegando à casa das centenas de tubos, dentro de um casco com seus eixos paralelos com o do eixo do casco (ÇENGEL, 2012; KAKAC; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2002).

Normalmente, o casco desse equipamento possui em suas extremidades saliências denominadas *headers*, onde um dos fluidos se acumula logo na entrada e antes da saída do dispositivo. Devido a essa característica, o peso e o volume desse TC são consideráveis, tornando-os inadequados para aplicações automotivas e aeronáuticas. Por outro lado, indica-se seu uso para aplicações que exigem altas pressões, a exemplo dos super aquecedores de caldeiras flamotubulares (KAKAC; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2002).

A troca de calor ocorre com um fluido que escoar nos tubos e o outro fluido escoar fora dos tubos (INCROPERA, 2007; ÇENGEL, 2012; ÇENGEL, 2019). A Figura 3 apresenta o arranjo de um TC casco e tubo.

Figura 3 – Trocador de calor casco e tubo



Fonte: Kontinuer (2022)

2.2.3 Trocadores de calor de placas

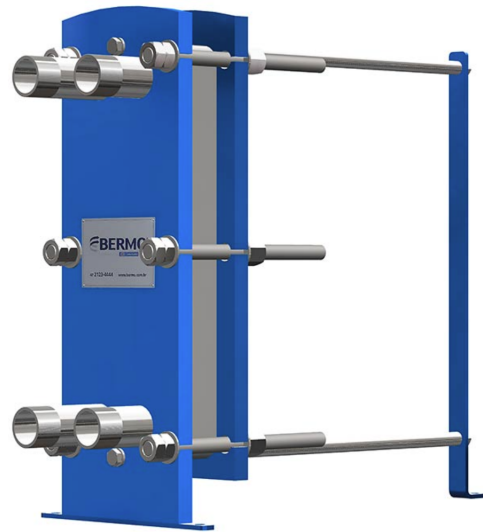
O TC de placas é um dos projetos compactos com excelente rendimento de troca térmica. Esses dispositivos são indicados tanto para o condicionamento de ambientes, quanto para o uso em comércios de bebidas, refrigerando líquidos em temperaturas de consumo (KAKAC; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2002).

O TC de placas, consiste em uma série de placas com passagens de fluxo plano corrugado. O fluido quente e frio fluem alternativamente entre estas passagens, e então cada linha de fluxo frio é cercado por duas linhas de fluxo quente, resultando em uma transferência de calor mais efetiva (INCROPERA, 2007; ÇENGEL, 2012; ÇENGEL, 2019). A Figura 4 mostra um arranjo de um TC de placas.

2.2.4 Trocadores de calor regenerativos

TC regenerativos são dispositivos que funcionam com o princípio capacitivo da energia, onde o líquido ou o vapor passa por um meio poroso, que por hora armazena a energia do fluido quente e por outra hora libera a energia armazenada para o fluido frio (ÇENGEL, 2012). Um bom exemplo de TC regenerativos é o incinerador de gases com partículas voláteis orgânicas.

Figura 4 – Trocador de calor de placas

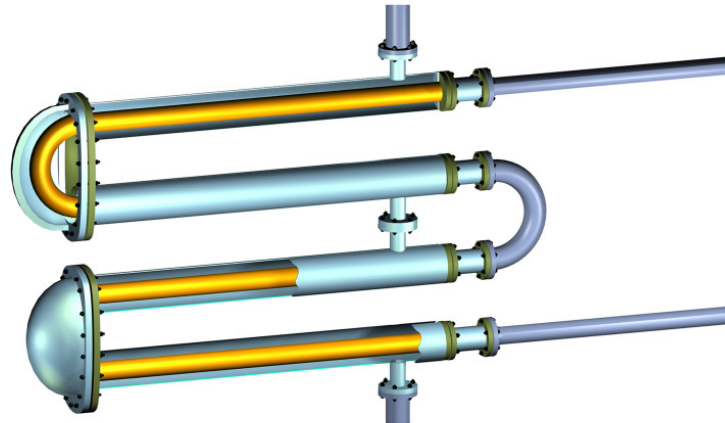


Fonte: Bermo (2022)

2.2.5 Trocadores de calor duplo tubo (TCDT)

Segundo Çengel (2019), os Trocadores de Calor Duplo Tubo (TCDT) possuem os aspectos construtivos mais simplificados. A Figura 5 mostra como é o arranjo de um TCDT.

Figura 5 – Trocador de calor duplo tubo



Fonte: Parisher e Rhea (2012)

Esse equipamento consiste em dois tubos de diâmetros diferentes, concêntricos unidos nas extremidades, garantindo o suporte estrutural, a estabilidade, a centralização do tubo interno e a promoção da saída ou o retorno do fluido no caso de um TCDT com vários passes (KAKAC; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2002), como mostra a Figura 5.

Seu funcionamento implica no escoamento de um dos fluidos pelo tubo interno, enquanto o outro fluido escoar na região anular entre o tubo interno e externo. A transferência de

calor nesse dispositivo ocorre por convecção entre o fluido quente e a parede, por condução através da parede e, novamente, por convecção entre a parede e o fluido frio (ÇENGEL, 2019).

Esses TC podem ser classificados em relação ao fluxo dos escoamentos, isto é, fluxo paralelo quando os fluidos quente e frio entram e saem pelas extremidades de mesma direção, e fluxo de contracorrente quando os fluidos quente e frio entram e saem por direções opostas (INCROPERA, 2007).

Em geral, o TCDT é indicado para aplicações que dispõem de espaço, pois, devido à pequena área de troca térmica do equipamento, requerem diversos passes (ÇENGEL, 2012; KAKAC; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2002). Adicionalmente, para diversos segmentos possuem vantagens consideráveis, principalmente, quanto ao controle e distribuição de fluxo e limpeza interna facilitada.

2.3 Metodologia de projeto térmico de trocador de calor

De acordo com Wickert e Lewis (2020), a metodologia de projeto de produtos, de maneira macroscópica, possui 4 estágios bem definidos e, são eles:

1. Desenvolvimento de requisitos
2. Projeto Conceitual
3. Projeto Detalhado
4. Produção

No desenvolvimento de requisitos, uma necessidade é identificada. Nessa fase, um conjunto de requerimentos são levantados, os quais podem ser funcionais, de impacto ambiental, de manufatura, econômicos, de ergonomia, de mercado global, o ciclo de vida de produto, entre outros aspectos (WICKERT; LEWIS, 2020). Em outras palavras, nessa fase, delimita-se o escopo do projeto.

Na fase de projeto conceitual, o engenheiro ou grupo de engenheiros apresentam possíveis soluções e convergem para a melhor solução. Em termos gerais, muitas soluções para problemas industriais já existem. No entanto, precisam ser adequadas para cada aplicação.

Nesse sentido, a fase de projeto detalhado tem como objetivo otimizar a solução para o requisito de projeto. Isto é, desenvolver o melhor leiaute e configuração, selecionar material, desenvolver modelos digitais e simulá-los em ambientes digitais empregando modelos matemáticos, entre outros pontos (WICKERT; LEWIS, 2020).

Por fim, no último estágio da metodologia de projeto, o engenheiro avalia a viabilidade de produção do produto. Por exemplo, ao concluir todas as fases anteriores do projeto, obteve-se a melhor solução disponível. Entretanto, para produzi-lo são necessários materiais caros,

assim como, operações de manufaturas complexas. Nesse sentido, essa fase visa determinar os meios para obter o produto, balanceando custo e qualidade (WICKERT; LEWIS, 2020).

2.4 Análise de um Sistema Térmico - Trocador de Calor

Para o cálculo de trocadores de calor do tipo duplo tubo, é necessário entender o comportamento dos fluidos dentro dos dois tubos concêntricos. Esta subseção tem por finalidade a análise para o cálculo fluidodinâmico e termodinâmico de um TCDT, consoante com a etapa 3 da metodologia de projeto de produto, projeto detalhado.

Para esta metodologia, será realizada primeiramente a revisão bibliográfica do comportamento fluidodinâmico e posteriormente o comportamento termodinâmico do TC.

2.4.1 Cálculo de trocadores de calor duplo tubo - Análise fluidodinâmica

Como falado na seção de tipos de trocadores de calor, um TCDT consiste em um tubo dentro do outro, logo na análise fluidodinâmica, deve ser realizada somente uma análise de escoamento interno dos fluidos, considerando o tipo de regime do fluido para ser conhecido a perda de pressão ocorrida no trocador e posteriormente para ser possível os cálculos do coeficiente de transferência de calor por convecção de ambos os fluidos (ÇENGEL, 2012; KAKAC; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2002).

Para um fluido atravessando um escoamento interno é importante entender os tipos de regime que ele pode apresentar. No primeiro tipo de regime, é dito que o fluido está em um regime laminar, ou seja, as linhas de corrente apresentam suavidade e um movimento altamente ordenado. O segundo regime, é o regime turbulento, onde as linhas de corrente e seus movimentos são altamente desordenados. Há ainda um terceiro regime, chamado escoamento de transição, onde é que ocorre a transição do regime laminar para o regime turbulento (ÇENGEL, 2015).

Para se determinar se em um escoamento interno o fluido está em um regime laminar, transitório ou turbulento, é necessário analisar as variáveis que podem contribuir para a decisão deste regime. Osborne Reynolds, descobriu que a transição do regime laminar para o turbulento, depende da geometria, rugosidade da superfície, da velocidade do escoamento, da temperatura da superfície, e do tipo do fluido. Tais variáveis dão a razão entre as forças inercias e as forças viscosas do fluido, onde tal razão é chamada de, Número de Reynolds (ÇENGEL, 2015), dada pela fórmula abaixo:

$$Re = \frac{V_{med} \cdot D}{\nu} = \frac{\rho \cdot V_{med} \cdot D}{\mu} \quad (1)$$

Onde:

V_{med} = Velocidade média de escoamento (m/s);

D = Comprimento característico (Diâmetro hidráulico em m);

$\nu = \mu/\rho$ = viscosidade cinemática do fluido (m^2/s);

ρ = densidade do fluido (kg/m^3); e

μ = viscosidade dinâmica do fluido (kg/ms)

Para definir o número de Reynolds quanto ao tipo de regime que ele está, é considerado na maioria das condições os seguintes valores de referência:

$Re < 2300$ escoamento laminar;

$2300 < Re < 4000$ escoamento de transição; e

$Re > 4000$ escoamento turbulento.

Outra análise importante para trocadores de calor duplo tubo, é a análise de perda de pressão e carga (KAKAC; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2002). A finalidade dessa análise é o dimensionamento adequado de bombas para o escoamento interno dos fluidos do TC.

Segundo Çengel (2015), a perda de pressão ocorre dentro de um tubo devido às forças viscosas que o fluido realiza em uma superfície rugosa, isto é, o atrito. Consoante com o autor, caso não houvesse atrito, não haveria perda de pressão. Para escoamentos laminares e turbulentos, a perda de pressão ΔP_l é dada pela seguinte equação:

$$\Delta P_l = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot V_{med}^2}{2} \quad (2)$$

onde f é o fator de atrito de Darcy e, L é o comprimento do tubo. Para um escoamento laminar é dado pela Equação 3:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

Para um regime laminar totalmente desenvolvido o fator de atrito só depende do número de Reynolds e é independente da rugosidade da superfície do tubo. A perda de carga h_l é comumente utilizada para sistemas de tubulação, sendo que com base na perda de pressão, ela expressa a altura equivalente em termos de coluna do fluido (ÇENGEL, 2015). A perda de carga é expressa pela Equação 4:

$$\Delta h_l = \frac{\Delta P_l}{\rho \cdot g} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_{med}^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

Portanto, a perda de carga retorna o valor necessário a altura adicional que o fluido precisa ser elevado por uma bomba para superar as perdas de atrito no sistema. Para um sistema com escoamento turbulento totalmente desenvolvido, a rugosidade é um fator importante, nesse sentido, deve-se determinar o fator de atrito. Neste caso o fator de atrito depende tanto do número de Reynolds, quanto da rugosidade relativa ϵ/D , que é a razão entre a rugosidade média do tubo e o diâmetro do tubo (ÇENGEL, 2015).

O fator de atrito para sistemas com escoamento transitório ou turbulento foi experienciado por Cyril F. Colebrook (ÇENGEL, 2015), retornando a então equação de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (5)$$

Experimentos posteriores foram realizados e tiveram muito sucesso, um deles foi o diagrama de Moody, que retorna a informação do coeficiente de atrito com base no número de Reynolds, diâmetro do tubo e rugosidade; onde este diagrama é um dos diagramas mais aceitos na engenharia, pelo fato de sua simplicidade (ÇENGEL, 2015).

A Equação 5 é uma equação implícita, ou seja, que exige a necessidade de interações matemáticas para que se obtenha o valor do fator de atrito. Uma equação explícita que retorna com baixo erro em relação à equação de Colebrook, é a equação de Souza-Cunha-Marques (ARAÚJO *et al.*, 2021), dada pela fórmula abaixo:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left[\frac{\epsilon}{3,7 \cdot D} - \frac{5,16}{Re} \cdot \log \left(\frac{\epsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,09}{Re^{0,87}} \right) \right] \quad (6)$$

A equação acima retorna um resultado com um erro aproximado de 0,123% em relação aos valores obtidos pela equação de Colebrook (ARAÚJO *et al.*, 2021).

2.4.2 Cálculo de trocadores de calor duplo tubo - Análise de transferência de calor e massa

A análise térmica de um TC visa entender e prever uma mudança de temperatura ou fase de um fluido com base na sua vazão mássica, estimando as temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio. Com esse intuito, existem dois métodos muito difundidos e, são eles o Método da Diferença de Temperatura Média Logarítmica (DTML) e o método da efetividade-NTU, ou simplesmente, ϵ -NUT (ÇENGEL, 2012).

Pelo fato deste trabalho visar modelar um TCDT que realiza o resfriamento de um fluido, no qual necessita prever as temperaturas de saída do fluido a ser resfriado, foi escolhido o método da DTML, que, segundo Çengel (2012) é o método mais adequado para este tipo de situação.

Antes de iniciar as análises de troca térmica de um TC, é necessário considerar algumas idealizações no volume de controle do trocador, para que o cálculo do trocador seja simplificado, sendo que tais simplificações não acarretam de perda de precisão do mesmo Çengel (2012).

Essas idealizações são:

- Escoamento em regime permanente;
- Variações desprezíveis da energia cinética do fluido,
- Em uma faixa de temperatura específica, o calor específico é constante;
- A condução de calor axial e desprezível; e
- A superfície externa do trocador de calor é perfeitamente isolada.

Diante destas idealizações, segunda a primeira lei da termodinâmica, a taxa de transferência de calor trocado, Q , pelo fluido frio e quente deve ser o mesmo, resultando em:

$$Q = \dot{m}_c \cdot c_c \cdot (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (7)$$

$$Q = \dot{m}_h \cdot c_h \cdot (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (8)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica, c é o calor específico, T é temperatura, e os subscritos c , h , i e o significam, respectivamente, frio (do inglês *cold*), quente (do inglês *hot*), entra (do inglês *in*) e sai (do inglês *out*).

Como a taxa de transferência de calor entre o fluido frio e quente são equivalentes, é possível notar que com o aumento da temperatura do fluido frio, a resultante é a diminuição da temperatura do fluido quente.

Outra forma de representar a taxa de transferência de calor de um fluido quente e frio, é utilizando o método da diferença de temperatura média logarítmica, que pode ser expressa por uma forma análoga à lei de Newton de resfriamento:

$$Q = U \cdot A_s \cdot \Delta T_m \quad (9)$$

onde U é o coeficiente global de transferência de calor, A_s a área de transferência de calor e ΔT_m a diferença de temperatura média entre os dois fluidos (ÇENGEL, 2012).

Considerando um TCDT com corrente paralela da Figura 6, nota-se que as distribuições de temperatura no início do trocador são grandes e com o passar do comprimento do trocador, decaem tendendo a um valor assintoticamente, onde neste tipo de trocador, a temperatura de saída do fluido frio nunca excede o do fluido quente.

Da Figura 6 os subscritos 1 e 2 designam os lados opostos do TC.

Considerando as idealizações dadas para o TC no início desta subseção, deduz-se a Equação 9 por meio da aplicação de um balanço de energia dos elementos diferenciais da Figura 6:

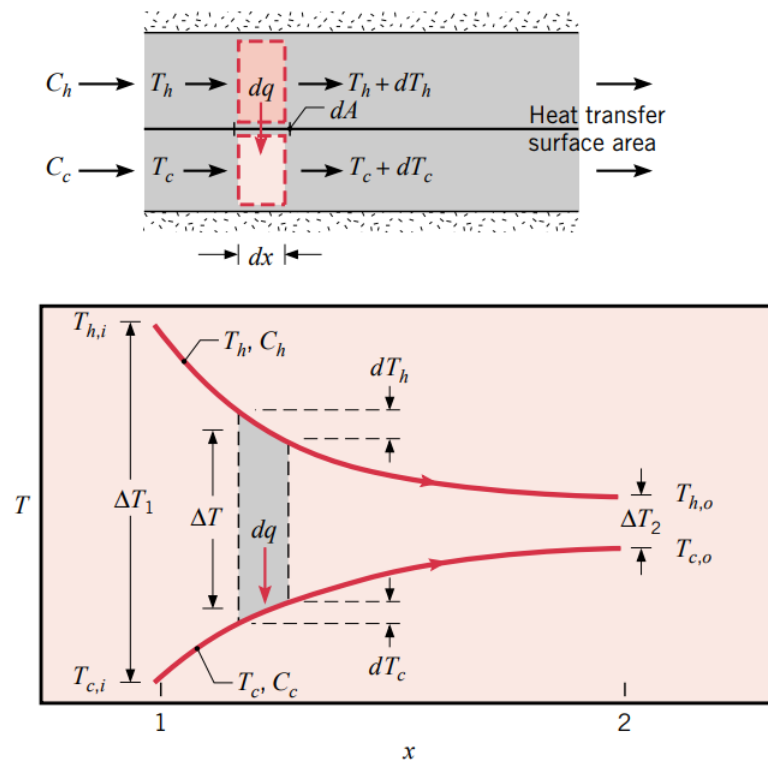
$$dq = -\dot{m}_h \cdot c_{p,h} \cdot dT_h = -C_h \cdot dT_h \quad (10)$$

$$dq = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} dT_c = C_c \cdot dT_c \quad (11)$$

onde C_h e C_c são as capacidades térmicas dos fluidos quentes e frio, onde tal valor representa a taxa de transferência de calor necessária para alterar 1 °C de um fluido escoando no TC.

As equações 10 e 11 devem ser integradas através do TC para se obter o balanço de energia geral dada pelas equações 8 e 7, que podem ser expressas como:

Figura 6 – Trocador de calor duplo tubo de fluxo paralelo



Fonte: Incropera (2007)

$$dq = U \cdot \Delta T \cdot dA \quad (12)$$

onde $\Delta T = T_h - T_c$ é a diferença de temperatura local entre os fluidos quente e frio. Considerando isso, a partir das equações 10 e 11 se obtém:

$$d(\Delta T) = -dq \cdot \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad (13)$$

Substituindo dq da Equação 12 e integrando através do TC, é obtido:

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \cdot \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \int_1^2 dA \quad (14)$$

ou

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -U \cdot A \cdot \left(\frac{(T_{h,i} - T_{h,o})}{q} + \frac{(T_{c,o} - T_{c,i})}{q} \right) \quad (15)$$

Reconhecendo que para um TC de fluxo paralelo $\Delta T_1 = (T_{h,i} - T_{c,i})$ e $\Delta T_2 = (T_{h,o} - T_{c,o})$, obtém-se:

$$q = U \cdot A \cdot \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} \quad (16)$$

Comparando a equação 16, com a expressão 9, concluí-se que a diferença média de temperatura apropriada é a diferença média de temperatura logarítmica ΔT_{lm} , onde:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} \quad (17)$$

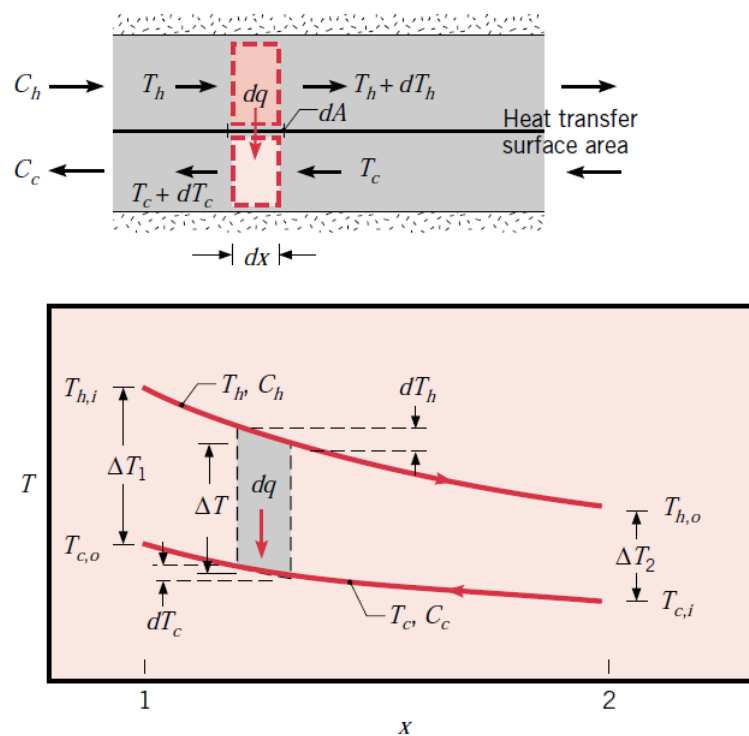
onde para um fluxo paralelo:

$$\Delta T_1 = T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,i}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,o}$$

Por outro lado, para um TC contra corrente, as distribuições de temperatura do fluido frio e quente são mostradas na Figura 7.

Figura 7 – Trocador de calor duplo tubo de contra corrente



Fonte: Incropera (2007)

De posse da Figura 7 e aplicando as equações 7 e 8, as diferenças de temperatura para um TC de contra corrente, as diferenças de temperatura são definidas como:

$$\Delta T_1 = T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,o}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,i}$$

Analisando os dois tipos de trocadores de calor, paralelo e contra corrente, é possível notar que com as equações finais dadas, a diferença de temperatura logarítmica do TC contra corrente, é maior que o do trocador paralelo, logo a superfície de área necessária para uma

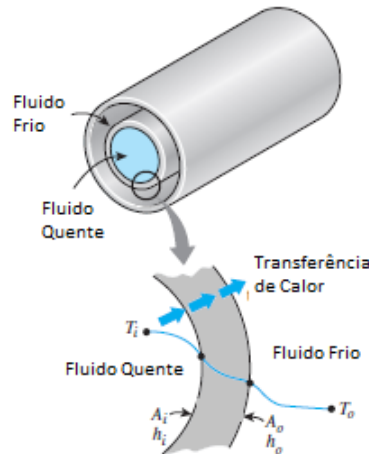
transferência de calor dada, é menor para o trocador contra corrente, assumindo o mesmo valor para o coeficiente global de transferência de calor.

2.4.2.1 Coeficiente Global de Transferência de Calor

Ao analisar a Equação 9, observa-se que a taxa de transferência de calor, além da área de transferência de calor A_s e a diferença média de temperatura ΔT_m , é dependente do coeficiente global de transferência de calor.

Segundo Çengel (2012), o calor é transferido do fluido quente para a parede do tubo por convecção, através da parede do tubo por condução, e da parede do tubo para o fluido frio, novamente, por convecção, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Transferência de calor do fluido quente para o fluido frio



Fonte: Adaptado de Çengel (2012)

Ainda conforme o autor, ao utilizar o conceito de resistência térmica, o processo de transferência de calor apresentado na Figura 8 envolve duas resistências convectivas (dos fluidos quente e frio) e uma resistência condutiva (da parede do tubo).

O autor ainda salienta que na análise de trocadores de calor, é conveniente combinar as resistências térmicas e, desse modo, observa-se uma equivalência entre o coeficiente global de transferência de calor e a resistência do sistema.

$$R = \frac{1}{U \cdot A_s} = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{1}{h_o \cdot A_o} \quad (18)$$

onde h_i , h_o , A_i e A_o são, respectivamente, o coeficiente convectivo do fluido quente, o coeficiente convectivo do fluido frio, a área de transferência de calor no diâmetro interno, e a área de transferência de calor diâmetro externos, esses dois últimos ambos do tubo interno.

Adicionalmente, D_o , D_i , k e L são, respectivamente, o diâmetro externo do tubo interno, o diâmetro interno do tubo interno, a condutividade térmica e o comprimento do tubo.

Visto que as áreas, os diâmetros, o comprimento e a condutividade térmica são funções das características geométricas e térmicas do tubo, a obtenção do coeficiente global de transferência de calor é dependente dos coeficientes convectivos dos fluidos (ÇENGEL, 2012).

Nos estudos de transferência de calor, em geral, emprega-se o número de Nusselt, Nu , com o objetivo de determinar o coeficiente convectivo h . Segundo Çengel (2012), o número de Nusselt é adimensional e definido pela Equação 19

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (19)$$

onde k é a condutividade térmica do fluido, e L_c é o comprimento característico do tubo.

Quando se trata de transferência de calor em regimes de escoamento turbulentos, a partir de estudos datados de 1930, de Dittus e Boelter, foi observado uma correlação entre o número de Nusselt, o número de Reynolds, e o número de Prandtl (WINTERTON, 1998).

Esse último número, o número de Prandtl, Pr , exprime a relação da espessura relativa da velocidade e as camadas limite térmicas, sendo definido como:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (20)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica, c_p é o calor específico, e k é a condutividade do fluido.

Dittus e Boelter verificaram que o número de Nusselt pode ser obtido pela Equação 21

$$Nu = C \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^m \quad (21)$$

Onde C e m são constantes que dependem do fluido, isto é, se o fluido está sendo resfriado ($C = 0,0265$ e $m = 0,3$) ou aquecido ($C = 0,0243$ e $m = 0,4$).

Visto a equivalência entre as equações 19 e 21, é possível determinar o coeficiente convectivo de cada fluido, portanto, o coeficiente global de transferência de calor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este Capítulo tem como propósito apresentar a metodologia utilizada para projetar um trocador de calor destinado ao arrefecimento de água de cola proveniente de um processo de reciclagem animal.

A metodologia utilizará o processo sistemático, normalmente, empregado no projeto mecânico e térmico, conforme apresentado na Seção 2.3. Embora, os passos delimitados anteriormente sejam utilizados no desenvolvimento de novos produtos, esses também podem ser empregados no projeto de produtos já existentes.

Nesse sentido, o presente capítulo será estruturado em cinco seções. Na primeira Seção, 3.1, apresenta-se como é realizada a identificação do problema ou da necessidade de um processo industrial.

A Seção 3.2, conhecido o problema ou a necessidade, apresenta-se o desenvolvimento de os requisitos do equipamento.

Na sequência, Seção 3.3, diante dos requisitos dos produto, apresenta-se a metodologia de triagem da melhor solução dentre um conjunto de soluções.

A Seção de projeto detalhado, 3.4, por outro lado, apresenta-se a determinação dos parâmetros e das características geométricas do equipamento através de análise matemática, concebendo assim, um memorial de cálculo.

A fase de produção, Seção 3.5, tem como intuito apresentar as referências normativas dos processos de fabricação, principalmente, aquelas destinadas à indústria alimentícia.

3.1 Identificação do Problema

Essa fase é caracterizada pela apresentação do processo e a identificação do problema ou necessidade. Para auxiliar nessa etapa, um diagrama de tubulações e instrumentação (PID) deverá ser elaborado.

Com o processo compreendido, identifica-se em qual estágio do processo existe a necessidade de um TC.

3.2 Desenvolvimento de Requisitos

Considerada a necessidade de um equipamento que realize o resfriamento de um fluido, nessa etapa da metodologia, são desenvolvidos os requisitos funcionais do TC.

Esses requisitos funcionais serão caracterizados pelos seguintes itens:

1. Vazão mássica de água de cola que deverá ser resfriada;
2. Temperatura de entrada e de saída da água de cola;

3. Temperatura de entrada do fluido arrefecedor;
4. Velocidade de escoamento dos fluidos;e
5. Material do tubo interno e externo.

Para a vazão mássica de água de cola, o valor utilizado será escolhido com base na experiência do autor no segmento.

Para o item 2, a temperatura de entrada da água de cola, novamente, contará com a experiência do autor em relação ao processo de reciclagem animal. Por outro lado, para temperatura do fluido resfriado, buscar-se-á referências que indiquem a temperatura ótima em função das características fluidodinâmicas e sanitárias. Uma pesquisa bibliográfica será conduzida em banco de dados de empresas, em revistas e, periódicos.

O item 3, temperatura de entrada do fluido de arrefecimento, depende de diversos fatores, como época do ano, região da qual é coletada a água, entre outros aspectos. Nesse ponto, o autor arbitrará um valor com base em plantas de reciclagem animal da região.

Quanto ao item 4, existem referências clássicas sobre velocidades econômicas de fluidos em redes de tubulação. Livros-textos de Telles (2012) e Telles (2001) serão utilizadas para obter os valores de velocidades econômicas para ambos os fluidos do trocador de calor.

Por fim, o item 5, o material do TC será requisitado conforme as exigências das normas vigentes de gestão de qualidade e segurança alimentar (ISO, 2018; ISO, 2015), visando, principalmente, a não-contaminação da água de cola, isto é, materiais resistentes à corrosão.

3.3 Projeto Conceitual

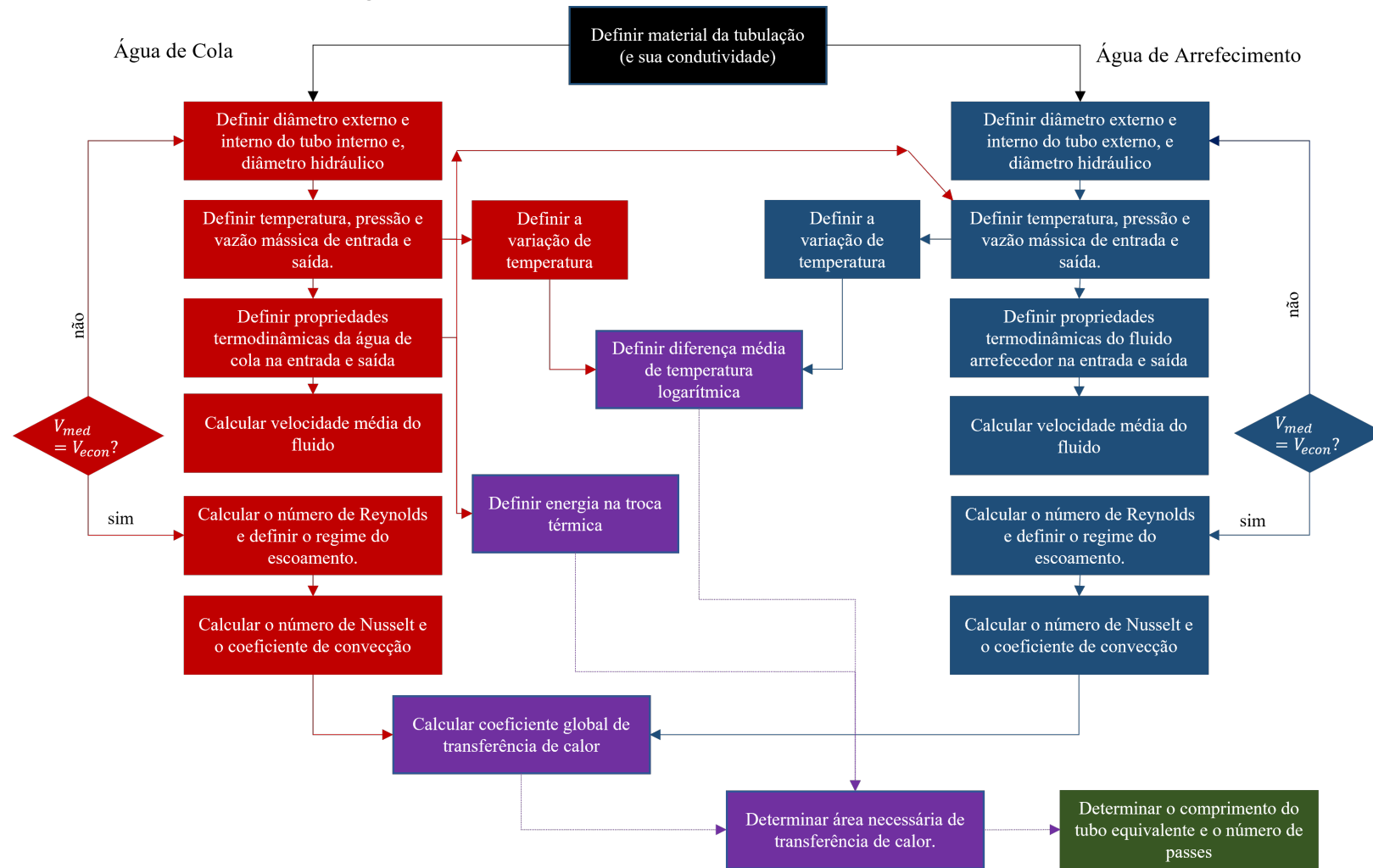
Visto os requisitos que o equipamento deve possuir ou, precisa garantir o funcionamento, na fase de projeto conceitual, avaliar-se-ão os tipos de trocadores de calor disponíveis no mercado e, dessa forma será escolhido o mais adequado com a aplicação.

Serão considerados aspectos construtivos, os tipos de fluidos que TC permitem, custos, entre outros fatores.

3.4 Projeto Detalhado

No projeto detalhado, orientado pelos requisitos de projeto e, por modelos matemáticos, são determinadas as características do equipamento. A Figura 9 traduz as etapas do projeto detalhado.

Figura 9 – Fluxograma de atividades previstas no projeto detalhado



Fonte: Autoria própria

Pela Figura 9, observa-se que existe uma interdependência dos dados da água de cola e dos dados da água de arrefecimento. Nesse sentido, para auxiliar no projeto detalhado, emprega-se uma planilha eletrônica a fim de automatizar os cálculos (Microsoft Corporation, 2019).

Inicialmente, conforme o fluxograma da Figura 9, determina-se um material para os tubos tanto interno quanto externo. Com base no material escolhido, obtém-se através de catálogos ou ficha de dados as propriedades térmicas do material.

Na sequência, seja para a água de cola quanto água de arrefecimento, arbitra-se um diâmetro e uma espessura para os tubos. Salienta-se que nesse trabalho, o tubo interno é destinado para o escoamento do fluido quente (água de cola), enquanto no tubo externo escoar fluido frio.

No passo seguinte, primeiramente, determina-se temperatura, pressão e a vazão mássica para a água de cola. Nesse trabalho, esses itens são requisitos de projeto e variam para cada aplicação.

Por outro lado, nota-se que, embora a temperatura de entrada da água de arrefecimento seja requisito de projeto, a temperatura de saída depende das temperaturas da água de cola. Por meio da manipulação das equações 7 e 8, define-se a temperatura de saída do fluido refrigerante.

De posse das temperaturas, dos fluidos na entrada e na saída, nota-se que o fluxograma tem uma ramificação. Em ambos os lados, determina-se as diferenças de temperatura, as quais são utilizadas para o cálculo da diferença média de temperatura logarítmica, equação 17.

Na sequência, de posse das temperaturas e pressões de entrada e saída, utilizando a biblioteca de propriedades termodinâmicas CoolProp (BELL *et al.*, 2013), determina-se as propriedades de ambos os fluidos. Dentre as propriedades dos fluidos, citam-se os calores específicos, as condutividades térmicas, as viscosidades cinemáticas e dinâmicas, e o número de Prandtl, Pr.

Com as temperaturas da água de cola, o calor específico e a vazão mássica, é possível determinar a energia transferida, equação 8. Visto que as equações 7 e 8 são equivalentes, nesse estágio é possível determinar a vazão mássica de fluido refrigerante.

Consequente, determina-se a velocidade média para ambos os fluidos, equação 22.

$$V_{med} = \frac{\dot{m} \cdot \frac{1}{\rho}}{A} \quad (22)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica do fluido, ρ é a densidade do fluido e A é a área da seção transversal através da qual escoar o fluido.

Destaca-se que as velocidades médias são requisitos de projeto. Nesse sentido caso elas não estejam de acordo os requisitos de projeto, um novo diâmetro e uma nova espessura para os tubos interno e externo devem ser escolhidos. Em geral, os valores dos passos se-

guintes à determinação do diâmetro e da espessura não variam, podendo assim, determinar novamente a velocidade média.

Após as velocidades médias obtidas estarem de acordo com os critérios de aceitação, calcula-se o número de Reynolds, equação 1 ou 3. De acordo com o regime de escoamento, realiza-se o cálculo do número de Nusselt, Nu , para cada escoamento. Para o regime turbulento, o número de Nusselt pode ser obtido conforme a expressão 23 para o fluido resfriado, e a expressão 24 para o fluido aquecido (WINTERTON, 1998).

$$Nu = 0,0265 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \quad (23)$$

$$Nu = 0,0243 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (24)$$

De posse dos números de Nusselt, é possível determinar o coeficiente de convecção h para cada escoamento, conforme a equação 25, (ÇENGEL, 2012).

$$h = \frac{k_{esc}}{\frac{D}{1000} \cdot Nu} \quad (25)$$

onde k_{esc} é a condutividade do fluido escoando.

Com os coeficientes convectivos para ambos os escoamentos, além da condutividade do metal dos tubos interno e externo, determina-se o coeficiente global de transferência de calor, U , equação 26, (ÇENGEL, 2012).

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{esc1}} + \frac{1}{h_{esc2}} + \frac{\ln\left(\frac{D}{D-2t}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \quad (26)$$

onde t é a espessura da tubulação

Manipulando a equação 9, é possível determinar a área necessária para transferência de calor, equação 27.

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{lm}} \quad (27)$$

De posse da área de transferência de calor, a equação 28 é utilizada para determinar o comprimento equivalente do tubo, L .

$$L = \frac{A}{\frac{D \cdot 1000}{\pi}} \quad (28)$$

O número de tubos, ou passes, é obtido através da divisão do comprimento equivalente pelo comprimento do tubo comercializado.

3.5 Produção

Foge do escopo deste trabalho fabricar o TCDT. Porém, dentro da metodologia do projeto, é papel do engenheiro determinar processos de fabricação empregados na manufatura do equipamento.

Diante disso, conduziu-se uma revisão bibliográfica das normas que especificam o padrão que os tubos devem seguir para aplicações sanitárias.

Adicionalmente, como o TCDT possui diversos passes de tubos, é necessário que os segmentos sejam unidos. Será conduzida uma revisão de processos de fabricação, principalmente de soldagem, que atendam os requisitos sanitários.

3.5.1 Modelagem 3D

De posse das dimensões de diâmetros e espessuras dos tubos interno e externo do TCDT, e da quantidade de passes necessários, ambos obtidos pelo projeto térmico, além do material empregado, utilizou-se a ferramenta de desenho assistida por computador (do inglês, *Computer Aided Design*) Inventor Autodesk (INVENTOR, 2014) para a modelagem tridimensional do equipamento.

Como foge do escopo do projeto a seleção de válvulas e outros acessórios, buscou-se nas bibliotecas disponíveis no software válvulas e acessórios compatíveis com as bitolas dos tubos escolhidos por meio da metodologia de projeto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo visa apresentar os resultados e as discussões do projeto térmico do TC destinado ao estágio de recuperação de água de cola no processo de reciclagem animal, aplicando a metodologia proposta no Capítulo 3.

O Capítulo está dividido em 5 Seções. Na Seção 4.1, é contextualizado o processo de obtenção e recuperação da água de cola em uma indústria de reciclagem animal, indicando o uso do TC.

No Capítulo 4.2, os requisitos são desenvolvidos conforme a necessidade do processo em questão. Por outro lado, o Capítulo 4.3 elenca e seleciona o TC segundo os aspectos construtivos mais adequados à aplicação.

As duas últimas seções, 4.4 e 4.5, apresentam o memorial de cálculo, as tomadas decisões e, por fim, o modelo tridimensional do TC, e as recomendações de processos de fabricação do mesmo.

4.1 Identificação do Problema

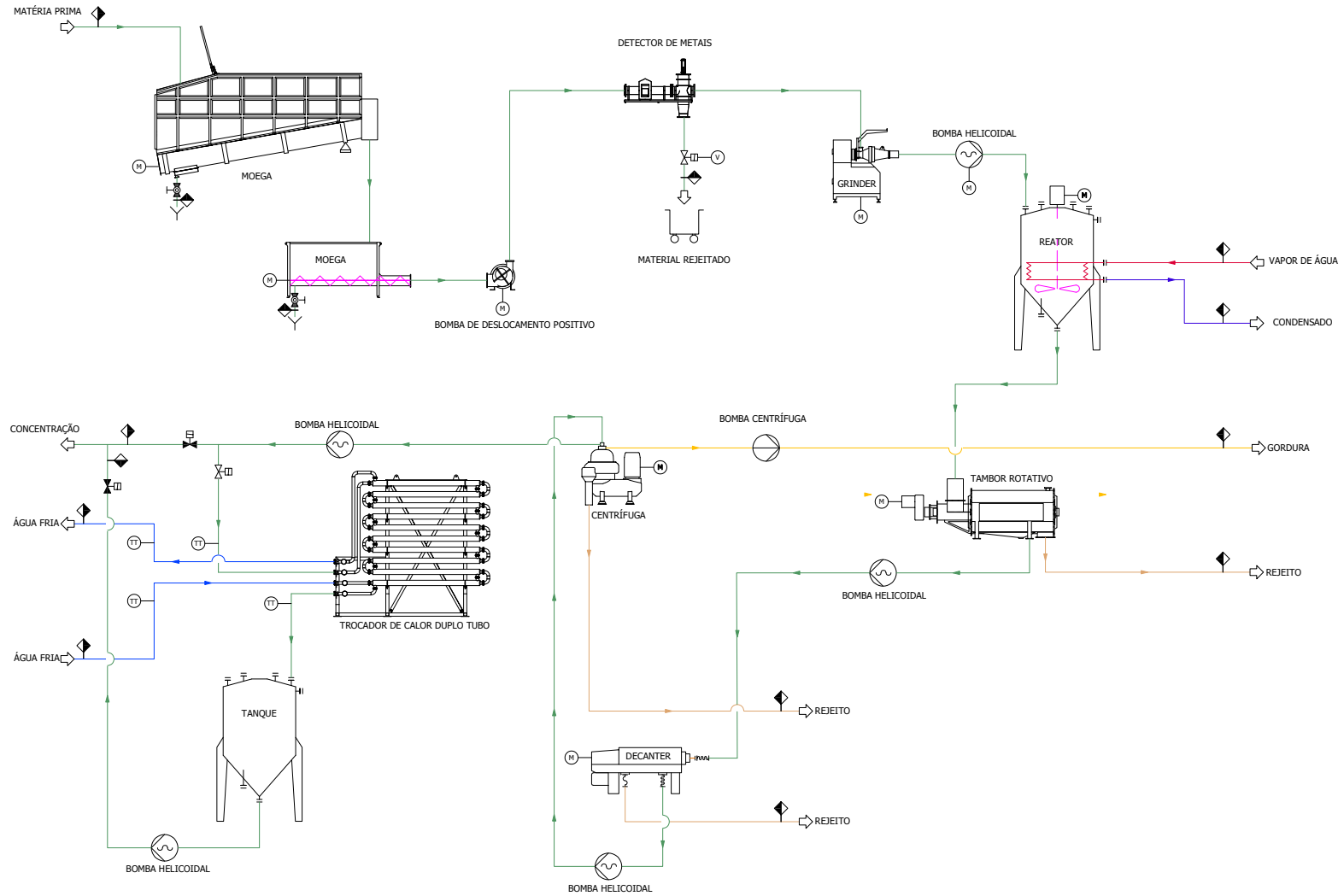
Esta seção visa contextualizar o processo de reciclagem animal e identificar o problema e/ou a necessidade, no qual será aplicado trocador de calor. A Figura 10 apresenta o diagrama de tubulação e instrumentação (do inglês, *Piping and Instrumentation Diagram - PID*) do processo de reciclagem animal do qual o autor está na equipe de projeto.

No processo estudado, inicialmente, os resíduos animais são direcionados para um conjunto de moegas visando reduzir o tamanho das partes sólidas. Na sequência, o produto resultante é bombeado para um detector de metais, etapa do processo que visa rejeitar materiais que contenham impurezas metálicas que possam prejudicar o produto final do processo.

O material que atende os requisitos sanitários é direcionado para um reator. Nesse reator o material é cozido a seco, uma vez que o vapor saturado não entra em contato direto com os resíduos animais triturados. Esse processo visa eliminar agentes patógenos e permitir a factibilidade das demais etapas do processo.

Após o cozimento no reator, a matéria-prima é destinada para a etapa de separação da fase sólida da fase líquida, atividades estas que são realizadas pelo tambor rotativo, pelo decanter, e pela centrífuga, respectivamente. A fase sólida separada nesses equipamentos é destinada para outra finalidade produtiva. Entre um equipamento e outro, o material é transportado por bombas helicoidais.

Figura 10 – Diagrama de tubulação e instrumentação do processo de reciclagem animal



Fonte: Autoria própria

Após a centrifuga, a gordura é separada do líquido e, essa matéria líquida resultante, muitas vezes denominada como água de cola, pode ser recuperada, concentrada e empregada na fabricação, por exemplo, de farinhas.

Normalmente, a água de cola é constituída por três frações distintas, sendo elas, água, gorduras e sólidos. Essas duas últimas frações, em geral, estão presentes porque a eficiência dos processos anteriores da reciclagem animal não é de 100%. Estima-se que a fração de gordura e sólidos não ultrapasse 20% da mistura multifásica (Meat & Livestock Australia, 2001).

Quando a produção é realizada continuamente, a água de cola vai diretamente para a concentração. Por outro lado, em situações que não há matéria suficiente para o processo de concentração, ou ainda, por motivos produtivos, esse líquido pode ser armazenado.

Em ambas as situações de produção, a água de cola pode sair do processo de centrifugação com temperaturas superiores à 50°C (Meat & Livestock Australia, 2001). No processo em questão, a temperatura de saída da água de cola é de 80°C.

Tanto por questões produtivas quanto por questões sanitárias, esse líquido não pode ser armazenado ou utilizado na concentração em temperaturas superiores que 38°C.

Reconhecida essa necessidade no processo de reciclagem animal, as próximas seções visam apresentar a metodologia adotada para o projeto térmico de um equipamento para o resfriamento da água de cola utilizada no processo de recuperação, isto é, um trocador de calor.

4.2 Desenvolvimento dos Requisitos

Como apresentado na seção metodológica, após reconhecida a necessidade, deve-se delimitar o conjunto de características que o equipamento deve possuir. Em outras palavras, definir as características funcionais do equipamento.

Nas próximas subseções, com base na experiência do autor e a revisão bibliográfica conduzida, são apresentados os requisitos de processo e funcionais.

4.2.1 Volume de produção

Conforme experiência do autor, a vazão mássica de água de cola que deve ser resfriada varia do processo, e do porte da indústria de reciclagem animal. Em indústrias de reciclagem animal de médio porte, nota-se que uma vazão mássica de água de cola de 8.500kg/hora é um valor razoável.

Nesse sentido, o primeiro requisito é que o TC consiga resfriar uma vazão mássica de 8.500kg/hora.

4.2.2 Temperatura alvo da água de cola

Após o processo de centrifugação, segundo a companhia Meat & Livestock Australia (2001), a temperatura da água de cola, normalmente, é superior à 50°C. Ainda consoante com a empresa australiana, essa temperatura é inadequada para a concentração ou armazenamento da mistura multifásica.

Segundo o livro-texto de Meriluoto, Spooft e Codd (2017), em temperaturas superiores à 38°C, pode ocorrer a proliferação de cianobactérias e, conseqüentemente, o desenvolvimento de cianotoxinas, contaminando a água de cola.

Por outro lado, um resfriamento agressivo pode mudar o estado da mistura multifásica. A Tabela 1 apresenta a temperatura e o estado da água de cola para amostras contendo e não contendo lodo.

Tabela 1 – Temperaturas e estado da água de cola em uma planta de reciclagem animal

	Amostra excluindo o lodo	Amostra incluindo o lodo
Natural à 25°C	Gel sólido	Gel sólido
Natural à 27°C	Semi líquido como o mel	Semi líquido com alguns sedimentos
Natural à 30°C	Líquido com escoamento livre	Líquido com escoamento livre

Fonte: Adaptado de Meat & Livestock Australia (2001).

Nota-se que em temperaturas inferiores à 30°C, a viscosidade da água de cola é comprometida, podendo dificultar o escoamento do fluido e a troca de calor. Desse modo, o TC deve conseguir resfriar a água de cola entre as temperaturas 30 e 38°C.

Para esse projeto, visto que, quanto menor a temperatura de saída da água de cola, mais recursos serão necessários (tubos, refrigerante, entre outros), utilizou-se o limite superior como requisito de projeto. Sendo assim, o TC deve resfriar o líquido até uma temperatura de 38°C.

4.2.3 Requisitos fluidodinâmicos

A determinação do diâmetro de uma tubulação é uma das atividades mais importantes no segmento industrial, pois, além do custo presente de aquisição, ao longo de sua vida útil, provavelmente, possuirá um custo de manutenção associado (ZOCOLER *et al.*, 2004).

Para instalações complexas, onde as tubulações são os principais ativos e exigem a maior economia, existem equações do diâmetro ótimo que são provenientes de manipulações matemáticas das funções de custos de empresas.

Por outro lado, onde as tubulações não são os principais ativos da indústria, de acordo com Telles (2001) e Telles (2012), existem valores de velocidades recomendadas para os tipos de escoamento, as quais são baseadas na densidade e viscosidade do fluido.

Na Tabela 2, são apresentadas as velocidades de escoamentos consideradas econômicas, normalmente, empregadas para a determinação de diâmetros de tubulações em empresas de médio porte.

Tabela 2 – Velocidades econômicas dos tipos de água

	Aplicação	Velocidade (m/s)
Água doce:	Redes em cidades	1 a 2
	Redes em instalações industriais	2 a 3
	Alimentação de Caldeiras	4 a 8
	Sucção de bombas	1 a 1,5
Água salgada:	Tubos de aços com revestimentos	1,5 a 2,5
	Tubos de latão	1,5
	Tubos de metal	1,5
	Monel	3

Fonte: Adaptado de Telles (2001).

Nesse sentido, visando economia no processo de bombeamento da água de cola e do fluido refrigerante, utiliza-se como referência uma velocidade econômica.

Como requisito, visa-se que as velocidades da água de cola corresponda com as velocidades econômicas para água doce em redes em instalações industriais, isto é, entre 2 e 3m/s, mesmo para a água de cola.

Essa consideração parte, principalmente, da inexistência de velocidades econômicas para todos os fluidos, a exemplo da água de cola. Porém, como evidenciado pela Meat & Livestock Australia (2001) e apresentado na Tabela 5, a água de cola tem mais de 90% de água em sua composição, então, a hipótese utilizada é coerente.

Tabela 3 – Composição de amostras de água de cola em baixas temperaturas

	Água de Cola	Água de Cola e Lodo
% média		
Água	93,72	91,63
Sólidos (gordura, proteína e outros)	6,28	8,37

Fonte: Adaptado de Meat & Livestock Australia (2001).

Visando simplificar os cálculos e, também garantir que a água de arrefecimento escoe em uma velocidade econômica, será imposto que a mesma seja igual a 2m/s. Essa implicação de velocidade econômica para o fluido refrigerante será melhor observada no projeto detalhado do TC. Salienta-se ainda que a temperatura de entrada da água de arrefecimento foi tomada como 20°C, porém, o valor pode variar conforme a região e a época do ano.

Ambos os fluidos se encontram em pressão atmosférica.

4.2.4 Questões sanitárias

Segundo a Associação Brasileira de Reciclagem Animal (2021), os produtos provenientes da reciclagem animal são seguros, pois, as indústrias são certificadas, isto é, seus processos possuem características alinhadas com normas que visam garantir altos padrões de qualidade, gestão e questões ambientais.

A indústria de reciclagem, como um sub-ramo da indústria de alimentos, normalmente, segue as normas sistemas de gerenciamento de qualidade e gestão de segurança alimentar (ISO, 2015; ISO, 2018).

Conforme a norma de gestão de segurança alimentar, (ISO, 2018), na indústria de reciclagem animal, os perigos pertinentes à segurança de alimentos são aqueles que podem ser transferidos direta ou indiretamente para o alimento.

Nesse sentido, como requisitos do material empregado na construção do TC, aspectos como facilidade de limpeza, resistência à corrosão, não alteração do gosto e do odor do alimento, e reciclabilidade do metal são fatores importantes na escolha do material e, são requisitos do projeto.

Desse modo, os aços inoxidáveis são as opções mais adequadas para esse propósito. Segundo Telles (2012), embora esses materiais sejam consideravelmente mais caros, eles são indispensáveis para fins que exigem não-contaminação do fluido devido à resistência ao processo de degradação por corrosão. Portanto, como requisito do projeto, o TC deve ser fabricado em aço inoxidável.

4.3 Projeto Conceitual

Visto as necessidades apresentadas, e os requisitos do projeto, é preciso determinar um trocador de calor adequado para essa finalidade. Na indústria de reciclagem animal, sub-ramo da indústria de alimentos, necessita-se um trocador de calor que realize o controle eficaz de temperatura das misturas multifásicas do processo.

O controle inadequado da temperatura pode acarretar diversos problemas, dentre eles, a qualidade do produto final ou funcionamento do processo.

Portanto, o estudo e o indicativo de qual maquinário usar, deve ser efetuado com extrema importância. Conforme a proposta estabelecida, citam-se os seguintes tipos de TC:

- (a) Trocadores de calor compactos: contêm uma grande área de transferência de calor por unidade de volume. Empregados em situações em que ocorre restrições de peso e volume. Dispositivos empregados quando os fluidos são gás-gás ou gás-líquido, com a função de minimizar a influência do baixo coeficiente de transferência de calor ligado ao escoamento de gás por meio da grande área de contato. Como os requisitos do

projeto, exige um trocador de calor para fluidos líquido-líquido, TC compactos não são indicados para a indústria alimentícia.

- (b) Trocadores de calor casco e tubo: mais utilizado em aplicações industriais, contendo abundância de tubos. O peso e o volume desse TC são consideráveis. São indicados para uso em aplicações que exigem altas pressões. Como a água de cola que será recuperada está em pressão atmosférica, o uso do TC casco e tubo seria superdimensionado, agregando altos custos.
- (c) Trocadores de calor de placas: projeto compacto com excelente rendimento de troca térmica. Indicados tanto para o condicionamento de ambientes, quanto para o uso em comércios de bebidas. Tendo uma área de passagem pequena, indicado para líquidos com viscosidade baixas, a água de cola, sendo um material multifásico, com sedimentos sólidos e gordura, pode ocasionar a redução da seção de escoamento do TC de placas, dificultando a troca térmica, e aumentando os custos de manutenção;
- (d) Trocadores de calor regenerativos: dispositivos que funcionam com o princípio capacitivo da energia. Incinerador de gases com partículas voláteis orgânicos, são, um bom exemplo de TC regenerativos. Frequentemente usados em engenharia de energia, para aumentar a eficiência geral dos ciclos termodinâmicos. Seu gasto de instalação e manutenção geram custos altos, o difícil manuseio do equipamento também, necessita de mão de obra qualificada, usada em indústrias específicas a partir de avaliações quanto a sua utilização, se tornando então, inviável economicamente para indústria alimentícia.
- (e) Trocadores de calor duplo tubo: possuem aspectos construtivos mais simplificados. Seu funcionamento implica no escoamento de um dos fluidos pelo tubo interno, enquanto o outro fluido escoar na região anular entre o tubo interno e externo. Utiliza-se a denominação de fluxo paralelo, quando os fluidos quente e frio entram e saem pelas extremidades de mesma direção, e fluxo de contracorrente quando os fluidos quente e frio entram e saem por direções opostas. Indicado para aplicações que dispõem de espaço, vantagem quanto ao controle e distribuição de fluxo e limpeza interna facilitada.

Esse último aspecto, de limpeza facilitada, faz o TCDT recomendável para a indústria de reciclagem animal. Como a mistura multifásica contém sedimentos sólidos, gorduras e outros componentes, pode ocorrer a deposição nas paredes da tubulação. Esse fenômeno, além de reduzir a eficiência de troca térmica, reduz o fluxo da mistura sólido-líquido. Por exemplo, em trocadores do tipo placas, devido à pequena área de seção transversal para o escoamento da mistura, a deposição de matéria nas paredes das placas resultaria na obstrução do fluxo, ocasionando paradas indesejáveis de produção.

4.4 Projeto Detalhado

Dados os requisitos de projeto, resumidos na Tabela 4, e o TC escolhido na fase de projeto conceitual, esta Seção visa obter as características geométricas do TCDT.

Tabela 4 – Resumo dos requisitos de projeto

Vazão Mássica		
Água de cola		8500 kg/h
Temperaturas		
Água de Cola	Entrada	80 °C
	Saída	38 °C
Água de Resfriamento	Entrada	20 °C
Velocidades dos Fluidos		
Água de Cola		2 a 3 m/s
Água de Resfriamento		2 m/s
Material do tubo		
Tubo interno		Aço Inox
Tubo externo		Aço Inox

Fonte: Autoria própria.

Nesse sentido, a primeira fase do projeto do TCDT é determinar a composição do material. Utilizando como referência o catálogo de tubos inox do tipo OD do Grupo Aço Tubo (2016), têm-se os seguintes tipos de aços inox:

Tabela 5 – Aços inox disponíveis

Austeníticos	Ferríticos	Martensíticos
301	409	420
304	410	
304L	430	
310S/H	439	
316	441	
316L	444	
317L		
321		

Fonte: Grupo Aço Tubo (2016).

Segundo Callister e Rethwisch (2020), a diferença das classes dos aços inox está ligada com a estrutura cristalina de cada um. Por outro lado, a numeração de cada classe se refere a porcentagem de elementos de liga em sua composição. O que garante a maior resistência à corrosão, em geral, é a quantidade de cromo, níquel e molibdênio nesses aços. Contudo, quanto mais elementos de liga, mais caro é o material.

Segundo Outokumpu (2013) os aços Inoxidáveis do tipo 304 e 304L são os tipos mais comuns de aço inox mundialmente, onde eles são conhecidos por serem muito versáteis e por apresentarem as características de não magnéticos, boa formabilidade, boa soldabilidade, e são dúcteis até em baixas temperaturas. No entanto, são sensíveis a a estresse por corrosão, quebrando em certo ambientes. As principais aplicações destes aços inoxidáveis são na indústria alimentícia, construção, arquitetura e transporte.

Conforme experiência do autor e recomendação do Grupo Aço Tubo (2016), o aço inox 304 (o qual é comercializado em tubos de diversos comprimentos, e nesse trabalho escolhido o comprimento de 2 metros) é amplamente empregado na indústria de alimentos e fornece excelente custo-benefício.

Desse modo, o aço inox escolhido é o aço inox 304, em tubos de 2 metros, possuindo condutividade térmica de $16,2 \frac{W}{m.K}$.

Determinado o material dos tubos, o segundo passo é a determinação do diâmetro do tubo interno. Para isso, utilizando novamente como referência o catálogo de tubos inox do tipo OD do Grupo Aço Tubo (2016), calculou-se a velocidade da água de cola no tubo interno. Salieta-se que os tubos disponíveis nesse catálogo possuem comprimento de 2 m.

A Tabela 6 apresenta as velocidades da água de cola no interior dos tubos inox de diferentes bitolas e espessuras para a vazão mássica requisitada. Embora os tubos OD possuam diâmetros de até 12 polegadas, observa-se que a partir de bitolas de 2 polegadas, as velocidades do fluido no interior da tubulação são inferiores à $2m/s$.

Tabela 6 – Velocidades da água de cola para os diferentes tubos comerciais, em *m/s*

Diâmetro \ Espessura	Espessura											
	0,5 mm	0,7 mm	0,89 mm	1 mm	1,2 mm	1,24 mm	1,5 mm	1,65 mm	2 mm	2,11 mm	2,5 mm	3 mm
1/4 in (6,35 mm)	108,70	126,24	148,11	163,47	198,25	206,53	275,63	332,52	560,11	681,79	1697,25	25250,86
3/8 in (9,53 mm)	42,51	46,80	51,50	54,55	60,85	62,23	72,54	79,70	101,15	109,70	150,74	248,23
1/2 in (12,7 mm)	22,60	24,22	25,94	27,02	29,16	29,61	32,88	35,10	40,87	43,02	52,17	68,91
3/4 in (19,05 mm)	9,49	9,93	10,37	10,64	11,16	11,27	12,01	12,74	13,66	14,06	15,67	18,16
1 in (25,4 mm)	5,20	5,37	5,54	5,65	5,85	5,89	6,16	6,33	6,75	6,90	7,43	8,22
1.1/4 in (31,75 mm)	3,27	3,36	3,44	3,49	3,59	3,61	3,74	3,82	4,02	4,08	4,32	4,67
1.1/2 in (38,1 mm)	2,25	2,30	2,34	2,37	2,43	2,44	2,51	2,55	2,66	2,69	2,82	3,00
2 in (50,8 mm)	1,25	1,27	1,29	1,30	1,32	1,32	1,35	1,37	1,41	1,43	1,47	1,54
2.1/2 in (63,5 mm)	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,85	0,85	0,87	0,88	0,90	0,94
3 in (76,2 mm)	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57	0,57	0,58	0,58	0,59	0,60	0,61	0,63

Fonte: Autoria própria

Nota-se que para o diâmetro de $1\frac{1}{2}$ polegadas, independente da espessura da parede do tubo, todas as velocidades obtidas concordam com os requisitos de projeto. Nesse sentido, a espessura do tubo interno dependerá também das características do tubo externo. Assim, utiliza-se a planilha eletrônica desenvolvida.

Para cada espessura disponível do tubo interno de diâmetro de $1\frac{1}{2}$, seleciona-se uma bitola e uma espessura do tubo externo, e, utilizando a ferramenta *solver* da planilha eletrônica desenvolvida, Figura 11, fixa-se a velocidade de escoamento da água de arrefecimento como 2 m/s e, variando sua vazão mássica de água, obtendo assim, a temperatura de saída da água, a vazão mássica, e o número de passes do TC.

Figura 11 – Planilha eletrônica utilizada para os cálculos

TUBO INTERNO			TUBO EXTERNO		
Bitola	-	1.1/2 in	Bitola	-	4 in
OD	-	0,5 -	OD	-	3 -
Diâmetro externo	D _e	38,1 mm	Diâmetro externo	D _e	101,6 mm
Parede	T	0,5 mm	Parede	T	3 mm
Diâmetro interno	D _i	37,1 mm	Diâmetro interno	D _i	95,6 mm
Material	-	Aço AISI 304 -	Material	-	Aço AISI 304 -
Condutividade	k	16,2 W/mK	Condutividade	k	16,2 W/mK
Diâmetro Hidráulico	D _h	37,1 mm	Diâmetro Hidráulico	D _h	58,5 mm

FLUIDO INTERNO - ENTRADA			FLUIDO EXTERNO - ENTRADA		
Fluido	-	Water	Fluido	-	Water
Temperatura entrada	T _{eq}	80 °C	Temperatura entrada	T _{ef}	20 °C
Pressão	P	101325 Pa	Pressão	P	101325 Pa
Massa	m	8500 kg/h	Massa	m	19318,27 kg/h
Velocidade média	V	2,25 m/s	Velocidade média	V	2,00 m/s
Calor específico	C _p	4,20 kJ/(kg.K)	Calor específico	C _p	4,18 kJ/(kg.K)
Densidade	ρ	971,8838 kg/m ³	Densidade	ρ	998,2380 kg/m ³
Condutividade térmica	k _w	0,66690 W/(m.K)	Condutividade térmica	k _w	0,59775 W/(m.K)
Viscosidade dinâmica	η	0,00035472 Pa.s	Viscosidade dinâmica	η	0,00100529 Pa.s
Viscosidade cinemática	ν	0,00000036 m ² /s	Viscosidade cinemática	ν	0,00000101 m ² /s
Prandtl	Pr	2,23215	Prandtl	Pr	7,03689

FLUIDO INTERNO - SAÍDA			FLUIDO EXTERNO - SAÍDA		
Fluido	-	=E15	Fluido	-	=K15
Temperatura saída	T _{sq}	38 °C	Temperatura saída	T _{sf}	38,46 °C
Pressão	P	101325 Pa	Pressão	P	101325 Pa
Massa	m	8500 kg/h	Massa	m	19318,2689 kg/h
Calor específico	C _p	4,18 kJ/(kg.K)	Calor específico	C _p	4,18 kJ/(kg.K)
Densidade	ρ	971,8838 kg/m ³	Densidade	ρ	998,2380 kg/m ³
Condutividade térmica	k _w	0,66690 W/(m.K)	Condutividade térmica	k _w	0,59775 W/(m.K)
Viscosidade dinâmica	η	0,00035472 Pa.s	Viscosidade dinâmica	η	0,00100529 Pa.s
Prandtl	Pr	2,23215	Prandtl	Pr	7,03689

Fonte: Autoria própria

As Tabelas 7, 8 e, 9 apresentam, respectivamente, a temperatura de saída da água de arrefecimento, a vazão mássica, e o número de passes do TC para um tubo interno com espessura de $0,5\text{ mm}$.

Tabela 7 – Temperaturas de saída da água de resfriamento, em °C

Espessura		0,5 mm	0,7 mm	0,89 mm	1 mm	1,2 mm	1,24 mm	1,5 mm	1,65 mm	2 mm	2,11 mm	2,5 mm	3 mm
Diâmetro													
	3 in (76,2 mm)	63,52	64,44	65,35	65,89	66,90	67,11	68,47	69,29	71,27	71,92	74,32	77,66
	4 in (101,6 mm)	35,67	35,87	36,06	36,17	36,38	36,42	36,70	36,87	37,26	37,38	37,84	38,46
	5 in (127 mm)	27,99	28,07	28,13	28,18	28,25	28,27	28,36	28,42	28,56	28,60	28,76	28,97
	6 in (152,4 mm)	24,84	24,87	24,90	24,92	24,96	24,96	25,01	25,04	25,10	25,12	25,19	25,29
	8 in (203,2 mm)	22,32	22,33	22,34	22,35	22,36	22,36	22,37	22,38	22,40	22,41	22,43	22,46
	10 in (254 mm)	21,36	21,36	21,37	21,37	21,37	21,37	21,38	21,38	21,39	21,40	21,41	21,42

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Vazões mássicas da água de resfriamento, em *kg/hora*

Diâmetro	Espessura												
	0,5 mm	0,7 mm	0,89 mm	1 mm	1,2 mm	1,24 mm	1,5 mm	1,65 mm	2 mm	2,11 mm	2,5 mm	3 mm	
3 in (76,2 mm)	8194	8023	7862	7770	7603	7570	7356	7235	6955	6868	6564	6185	
4 in (101,6 mm)	22762	22476	22206	22050	21769	21713	21350	21143	20662	20512	19984	19318	
5 in (127 mm)	44613	44212	43833	43615	43219	43140	42628	42334	41653	41440	40689	39736	
6 in (152,4 mm)	73748	73233	72745	72463	71952	71850	71190	70810	69927	69651	68676	67437	
8 in (203,2 mm)	153869	153124	152418	152011	151270	151123	150164	149612	148328	147925	146503	144690	
10 in (254 mm)	263125	262151	261227	260639	259723	259530	258272	257548	255863	253335	253465	251079	

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Número de passes do trocador de calor

Espessura		0,5 mm	0,7 mm	0,89 mm	1 mm	1,2 mm	1,24 mm	1,5 mm	1,65 mm	2 mm	2,11 mm	2,5 mm	3 mm
Diâmetro													
	3 in (76,2 mm)	26	27	28	28	29	29	31	32	35	36	41	57
	4 in (101,6 mm)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	5 in (127 mm)	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	6 in (152,4 mm)	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	8 in (203,2 mm)	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	10 in (254 mm)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17

Fonte: Autoria própria

Salienta-se que foram realizados os cálculos para as demais espessuras do tubo interno. Contudo, visto que a espessura de $0,5\text{mm}$ é a mais adequada, conforme as considerações do autor, as tabelas com os resultados para as demais espessuras do tubo interno serão omitidas.

Nota-se que para quaisquer dimensões de diâmetro e de espessura avaliada para o tubo externo, os requisitos de projeto são atendidos. Nesse sentido, qualquer tubo escolhido dentro o rol dos diâmetros estaria adequado.

No entanto, em uma indústria, sempre se visa a redução de custos. Desse modo, analisando as Tabelas 7, 8 e, 9, as seguintes considerações nas escolhas dos tubos interno e externo são feitas.

A primeira consideração é em relação à temperatura de saída da água de arrefecimento. Conforme experiência do autor, quando utiliza-se água como arrefecedor e esse líquido não tem utilidade posterior no processo de reciclagem animal, deseja-se que a temperatura de saída seja em torno de 40°C . Essa temperatura da água permite que ela seja destinada, por exemplo, para a limpeza de cozinhas e refeitórios das indústrias, limpeza de utensílios e instalações, entre outros, sem a necessidade de nenhum procedimento.

A segunda consideração é em relação ao número de passes do trocador de calor. Quanto maior o número de passes, mais tubos são necessários, requerendo-se mais materiais consumíveis na união entre os tubos, entre outros custos.

Por fim, a última consideração e talvez mais importante, é a vazão mássica de água de arrefecimento. Em geral, a água utilizada é proveniente de rios e possuem concentrações de minerais que, devido à temperatura do meio e outros fatores, podem incrustar na parede da tubulação do TC, reduzindo a eficiência térmica do equipamento. Como abordado por Tijjing *et al.* (2011) e Cho e Lee (2005), a água deve ser tratada antes de ser utilizada no TC. Nesse sentido, quando maior a vazão mássica de água, maior o custo em tratamento de água.

Diante dessas considerações, a Tabela 10 apresenta as dimensões de diâmetro e espessura dos tubos interno e externo, além das temperaturas de entrada e saída dos fluidos.

Tabela 10 – Características obtidas no projeto detalhado do TC com 17 passes

Diâmetro e Espessura dos Tubos		
Tubo interno		
Diâmetro	1 1/2 polegada	
Espessura	0,5 mm	
Tubo externo		
Diâmetro	4 polegadas	
Espessura	3 mm	
Temperaturas de Entrada e Saída		
Água de Cola		
Entrada	80 °C	
Saída	38 °C	
Água de Resfriamento		
Entrada	20 °C	
Saída	38,46 °C	

Fonte: Autoria própria

4.5 Produção

De posse das características geométricas da tubulação (número de passes, diâmetro e espessura dos tubos interno e externo), do material utilizado e, a aplicação do TCDT numa indústria alimentícia, técnicas especiais de fabricação devem ser utilizadas.

A Especificação Padrão para Tubos Sanitários de Aço Inoxidável Austenítico e Ferrítico/Austenítico Sem Costura e Soldado (ASTM, 2019) apresenta os requisitos de fabricação, de tratamento térmico, de composição, de análise, teste mecânicos, teste hidrostáticos, testes não-destrutivos e tolerâncias de fabricação.

Foge do escopo desse trabalho descrever as especificações dessa norma, entretanto, ressalta-se a importância que os materiais adquiridos correspondam a ela.

Por fim, visto que existem vários passes de tubulação, é necessário que haja a união dos mesmos. De acordo com a norma que rege os equipamentos de bioprocessos (ASME, 2022), a solda do tipo tungstênio gás inerte (do inglês, *Tungsten Inert Gas* - TIG) é a mais indicada, pois, é considerada uma solda limpa, isto é, deixa poucos resíduos e não requer limpeza, com bom acabamento, excelentes propriedades mecânicas e estanqueidade. A principal vantagem de seu uso na indústria alimentar, é a prevenção de um foco possível de acúmulo de resíduos de alimentos e a possibilidade de formação de biofilmes. Desse modo, também é indicado que a união dos tubos utilize solda sanitária do tipo TIG.

4.5.1 Modelagem 3D

Diante do exposto nas seções anteriores, na Figura 12 temos a modelagem tridimensional do TCDT.

Figura 12 – Modelagem em ambiente computacional do Trocador de calor duplo tubo de contra corrente



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho desenvolveu um projeto térmico de um trocador de calor destinado ao resfriamento de água de cola proveniente da indústria de reciclagem animal. O projeto utilizou os passos apresentados no fluxograma de atividades destinadas ao projeto e/ou a concepção de novos produtos apresentado por Wickert e Lewis (2020).

Inicialmente, um diagrama de tubulação e instrumentação foi apresentado, indicando a necessidade de um equipamento específico para o resfriamento da água de cola. Na sequência, com base nos requisitos do volume de água de cola a ser resfriado, sua temperatura de saída, das velocidades dos fluidos (água de cola e fluido refrigerante), e de material, selecionou-se dentre diferentes TC o mais adequado, isto é, um trocador de calor duplo tubo.

Posteriormente, no projeto detalhado, além dos cálculos térmicos, considerações baseadas na experiência do autor foram utilizadas para guiar a tomada de decisão. Por fim, recomendaram-se processos de fabricação, principalmente, solda sanitária, imprescindível para a maioria dos equipamentos da indústria alimentícia, e, por fim, apresentou-se o leiaute do trocador de calor desenvolvido.

Concluiu-se que o uso de uma metodologia de projeto direciona os esforços para encontrar uma solução de um problema, ao passo que planeja as etapas e otimiza tempo de execução do mesmo. No caso da indústria de reciclagem animal, especificamente, a recuperação e concentração da água de cola, o trocador de calor duplo se mostrou uma solução eficaz.

Adicionalmente, o presente trabalho também permitiu concluir que o projeto de equipamentos também possui considerações e limitações que o engenheiro deve ter ciência.

Quanto as considerações, salienta-se que muitos equipamentos necessitam de uma equipe multidisciplinar para realização do projeto. Na indústria de reciclagem animal, por exemplo, necessita um profissional que conheça da legislação que rege esse segmento, as normas, entre outros aspectos. Além disso, um profissional que conheça as características do fluido que será resfriado, permitindo sua modelagem e/ou aproximações adequadas.

Quanto as limitações, a maioria delas são comerciais ou técnicas. Por exemplo, diâmetros de tubulações, em geral, são catalogadas, obrigando o engenheiro a projetar o equipamento com as opções disponíveis. Por outro lado, no caso da necessidade de trabalhar com dimensões específicas, devido à importância do ativo no processo, custos adicionais surgem com processos de fabricação específicos, mão de obra qualificada, entre outros.

Para trabalhos futuros, sugere-se o projeto de um trocador de calor utilizando as equações de diâmetro econômico. Com isso, na fase de produção, avaliar o impacto de se fabricar tubulações sob medida e, se existe uma vantagem ante o projeto que emprega as velocidades econômicas.

Sugere-se, também, a análise de viabilidade de um trocador de calor com raspador para o processo de resfriamento da água de cola. Como apresentado no Capítulo 4, modelou-se o fluido multifásico aproximando suas propriedades com as propriedades da água. Visto que a

água de cola possui proteína, gorduras e outros sedimentos em sua composição, sua reologia pode ser mais complexa.

Ticona (2007) indica que para fluidos com reologia complexa, normalmente, encontrados na indústria alimentícia ou química, os TC com raspadores são boas opções, pois, intensificam a troca de calor e minimizam os efeitos da viscosidade e/ou incrustações. O autor referência apresenta um modelo matemático de transferência de calor para um gerador de pasta de gelo que utiliza um TC com raspador e, uma vez que esse equipamento dispõe de um elemento móvel, o comportamento fluido dinâmico e térmico é alterado. Nesse sentido, sugere-se a determinação de um modelo matemático de transferência de calor para a água de cola em TC com raspador.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, R. S. de A. *et al.* Comparação para o fator de atrito no dimensionamento de redes de distribuição utilizando equações explícitas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 24689–24704, 2021.
- ASME. **Bioprocessing Equipment**. [S.l.]: American Society of Mechanical Engineer, 2022.
- Associação Brasileira de Reciclagem Animal. **Conheça o Setor**. 2021. <https://abra.ind.br/conheca-o-setor/>. [Online; accessed 19-July-2008].
- ASTM. **Standard Specification for Seamless and Welded Austenitic and Ferritic/Austenitic Stainless Steel Sanitary Tubing**. [S.l.]: ASTM, 2019.
- BARROS, F.; LICCO, E. Graxaria e a geração de odores. **Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. Disponível em:** < <http://www.maua.br/arquivos/artigo/h/85752aaed72>. **Acesso em**, v. 5, n. 1, p. 2010, 2007.
- BARROS, F. D.; LICCO, E. A. A reciclagem de resíduos de origem animal: uma questão ambiental. **Revista Nacional da Carne**, v. 31, n. 365, p. 166–172, 2007.
- BATTISTONE, N.; DANIELLO, J. A percepção da comunidade sobre os poluentes gerados pelas graxarias. **São Paulo: CETESB**, 1985.
- BELL, I. H. *et al.* Coolprop: An open-source reference-quality thermophysical property library. *In*: SN. **ASME ORC 2nd International Seminar on ORC Power Systems**. [S.l.], 2013. p. 181.
- BERMO. **Bermo Trocador de calor de placas**. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://bermo.com.br/produtos/detalhes/bp30-trocador-de-calor-a-placas-gaxetado/>. Acesso em: 22 de abril de 2022.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Callister's materials science and engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020.
- CHO, Y. I.; LEE, S.-H. Reduction in the surface tension of water due to physical water treatment for fouling control in heat exchangers. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Elsevier, v. 32, n. 1-2, p. 1–9, 2005.
- FRANCO, D. A. **Animal Disposal—the Environmental, Animal Disease, and Public Health Related Implications: An Assessment of Options**. [S.l.]: National Renderers Association, 2002.
- Grupo Aço Tubo. **Aços Inoxidáveis**. 2016.
- GUNSTONE, F. D.; NORRIS, F. A. **Lipids in foods: chemistry, biochemistry and technology**. [S.l.]: Elsevier, 1983.
- INCROPERA, F. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Nova York: John Wiley Sons, 2007.
- INVENTOR, A. Autodesk inventor. **Autodesk Inventor**, 2014.
- ISO. **ISO 9001 - Quality management systems**. [S.l.]: International Organization for Standardization, 2015.

ISO. **ISO 22000 - Food safety management**. [S.l.]: International Organization for Standardization, 2018.

KAKAC, S.; LIU, H.; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat exchangers: selection, rating, and thermal design**. [S.l.]: CRC press, 2002.

KONTINUER. **Kontinuer Trocador de calor casco e tubo**. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.kontinuer.com/pt/equipamentos/trocadores-de-calor/>. Acesso em: 22 de abril de 2022.

LAVAL, A. **Alfa Laval Compabloc+**. [S.l.], 2022. Disponível em: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/welded-plate-and-block-heat-exchangers/product_leaflet_compabloc?_ga=2.157572218.1156265546.1650647619-1028387663.1648911124&_gl=1*dj7tc9*_ga*MTAyODM4NzY2My4xNjQ4OTExMTI0*_ga_VR90J5D3K9*MTY1MDY0NzYxOC4yLjEuMTY1MDY0NzYzMy4w. Acesso em: 22 de abril de 2022.

LUCHIARI, A. Produção de carne bovina no brasil qualidade, quantidade ou ambas. **Simpósio Sobre Desafios E Novas Tecnologias Na Bovinocultura De Corte-Simboi**, v. 2, p. 2006, 2006.

MAPA, M. **Instrução Normativa 34/2008**. [S.l.]: SISLEGIS, 2008.

Meat & Livestock Australia. **Stickwater Recovery**. 2001.

MEEKER, D. L. North american rendering: processing high quality protein and fats for feed. **Revista Brasileira de Zootecnia**, SciELO Brasil, v. 38, p. 432–440, 2009.

MEEKER, D. L.; HAMILTON, C. *et al.* An overview of the rendering industry. **Essential rendering**, National Renderers Association Alexandria (VA), p. 1–16, 2006.

MERILUOTO, J.; SPOOF, L.; CODD, G. A. **Handbook of cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.

Microsoft Corporation. **Microsoft Excel**. 2019. Disponível em: <https://office.microsoft.com/excel>.

MIRANDA, E. de. A reciclagem animal é a base da sustentabilidade da pecuária. Terra Viva: o canal de quem planta e cria., 2020.

NATES, S. F. Future research for the rendering industry. **ESSENTIAL RENDERING**, p. 273, 2006.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**. [S.l.]: bookman editora, 2013.

OUTOKUMPU. **Handbok of stainless steel**. 1. ed. Finland: Outokumpu Oyj, 2013.

PARISHER, R.; RHEA, R. **Pipe Drafting and Design**. **Pipe Drafting and Design**. 2012.

SELL, N. J. **Industrial pollution control: issues and techniques**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1992.

SILVA, F. F. d. Descrição do setor de reciclagem animal e sua relevância para as cadeias produtivas de carnes no rs. 2019.

SINDT, G. L. Environmental issues in the rendering industry. **Essential rendering**, p. 245, 2006.

TELLES, P. C. S. **Tubulações Industriais–Cálculo**. [S.l.: s.n.], 2001.

- TELLES, P. C. S. **Tubulações Industriais: Materiais, Projeto e Montagem. 10ª Edição, Ed. [S.l.]: LTC, 2012.**
- TICONA, E. M. **Determinação Experimental das Características de Transferência de Calor de um Gerador de Pasta de Gelo. 2007. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, PUC-Rio, Brasil, 2007.**
- TIJING, L. D. *et al.* Mitigation of scaling in heat exchangers by physical water treatment using zinc and tourmaline. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 31, n. 11-12, p. 2025–2031, 2011.
- WICKERT, J.; LEWIS, K. **An introduction to mechanical engineering. [S.l.]: Cengage Learning, 2020.**
- WINTERTON, R. H. Where did the dittus and boelter equation come from? **International journal of heat and mass transfer**, Pergamon, v. 41, n. 4-5, p. 809–810, 1998.
- WOODGATE, S.; VEEN, J. V. D. The role of fat processing and rendering in the european union animal production industry. **BASE**, 2004.
- ZOCOLER, J. L. *et al.* Modelo para determinação do diâmetro e velocidade de escoamento econômica em sistemas elevatórios de água. *In: UNESP ILHA SOLTEIRA. CONGRESSO TEMÁTICO DE DINÂMICA E CONTROLE DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL. [S.l.], 2004.*
- ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa : uma abordagem prática. 4. ed. Nova York: McGrawHill, 2012.**
- ÇENGEL, Y. A. **Mecânica dos fluidos : fundamentos e aplicações. 3. ed. Nova York: McGrawHill, 2015.**
- ÇENGEL, Y. A. **Heat and mass transfer : fundamentals and applications. 6. ed. [S.l.]: Mcgraw-Hill Education, 2019.**