



Tamiris Mallmann Koch

**DIMENSIONAMENTO DE PASTEURIZADOR TUBULAR PARA PEQUENAS
INDÚSTRIAS**

Horizontina - RS

2022

Tamiris Mallmann Koch

**DIMENSIONAMENTO DE PASTEURIZADOR TUBULAR PARA PEQUENAS
INDÚSTRIAS**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Dr. Geovane Webler.

Horizontina - RS

2022

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**“DIMENSIONAMENTO DE PASTEURIZADOR TUBULAR PARA PEQUENAS
INDÚSTRIAS”**

Elaborada por:
Tamiris Mallmann Koch

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovado em: dd/mm/2022

Pela Comissão Examinadora

Dr. Geovane Webler
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Titulação. Nome do Examinador Interno

FAHOR – Faculdade Horizontina

Titulação. Nome do Examinador Interno

FAHOR – Faculdade Horizontina

Horizontina - RS

2022

Para meu filho, Eduardo, a pessoa mais extraordinária que já tive a chance de amar!

Me desculpe por todas as vezes que você me pediu para ficar e precisei ir, por todos os momentos de ausência e falta de paciência. Prometo que essa culpa, não carregarei para sempre. Ela será deixada para trás assim que o último ponto final for colocado nesse texto.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, sogros e todas as pessoas em minha vida que sempre me incentivaram a não desistir, principalmente minha tia Josi (que suspeito, tenha gasto todo seu repertório com palavras de encorajamento e incentivo nos últimos meses).

A todos os meus professores, que ao longo desses (muitos!) anos, sempre estiveram dispostos a compartilhar tanto o conhecimento quanto os conselhos que tinham à disposição, sendo verdadeiros guias durante toda minha vida acadêmica.

Ao meu orientador, Dr. Geovane, muito obrigada por toda a calma no meio do furacão!

E finalmente, mas não menos importante: ao meu melhor amigo, que por coincidência, também é meu marido. Obrigada por sempre estar ao meu lado e por NUNCA ter soltado a minha mão! Tenho a mais absoluta certeza que eu não teria conseguido se não fosse por todo o seu apoio, sempre!

“Livros são fáceis de destruir, mas as palavras viverão enquanto as pessoas puderem se lembrar delas”

(Tahereh Mafi)

RESUMO

O processamento térmico dos alimentos é uma das técnicas mais eficientes para aumentar a segurança em seu consumo, aumentando o prazo de validade e mantendo as qualidades sensoriais com um custo significativamente reduzido. No caso do suco de laranja, um dos equipamentos mais utilizados para a realização desse processamento é o pasteurizador com trocador de calor tubular. Em geral, esse equipamento possui custo relativamente menor se comparado a outros equipamentos que operam com o mesmo objetivo, trazendo versatilidade ao processo, já que pode trabalhar com fluidos que possuem partículas em suspensão por maiores períodos de tempo entre limpezas. O objetivo deste trabalho foi projetar um pasteurizador com trocador de calor tubular e desenvolver um algoritmo que facilitasse a realização dos cálculos de dimensionamento. Os parâmetros de partida para o dimensionamento do trocador foram informações obtidas durante a pesquisa informacional, como vazão aproximada de pequenos equipamentos para extração de suco e temperaturas necessárias para a inativação das enzimas e extinção de esporos e micro organismos termo resistentes, que estão presentes na composição do suco de laranja com pH abaixo de 4,5. O projeto do produto se seguiu, então, com a fase de projeto conceitual até o projeto detalhado, uma vez que o objetivo inicial do trabalho não era a fabricação de um protótipo. O conjunto foi separado em seções de regeneração, aquecimento e resfriamento, e ao final, foi possível obter o dimensionamento de um equipamento compacto e simplificado, com diversas possibilidades de uso, experimentação e melhorias futuras.

Palavras-chave: Trocador de calor bi tubular. Pasteurização de suco. Dimensionamento de equipamentos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	TEMA	9
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	9
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	9
1.4	HIPÓTESES	11
1.5	JUSTIFICATIVA	11
1.6	OBJETIVOS	12
1.6.1	Objetivo Geral	12
1.6.2	Objetivos Específicos	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	MERCADO E CADEIA DO SUCO	14
2.2	TRATAMENTO TÉRMICO DE ALIMENTOS	16
2.2.1	Modalidades utilizadas no tratamento térmico de alimentos	17
2.2.2	Equipamentos utilizados no tratamento térmico de alimentos	18
2.3	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	19
2.3.1	Condução	19
2.3.2	Convecção	19
2.3.3	Radiação	20
2.4	TROCADORES DE CALOR	20
2.4.1	Trocadores de calor a placas	22
2.4.2	Trocadores de calor tubulares	23
2.5	REOLOGIA DOS FLUIDOS.....	23
3	METODOLOGIA	26
3.1	MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS	26
3.2	MODELO MATEMÁTICO	29
3.3	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	35
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
4.1	PROPOSTA DE CONFIGURAÇÃO	36
4.2	DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR	38
4.3	PROJETO DETALHADO.....	39
4.3.1	Normas técnicas	41
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICE A – VISTAS ORTOGRÁFICAS DO EQUIPAMENTO	47

1 INTRODUÇÃO

A produção industrial sempre foi uma das forças motrizes de nosso país. Segundo a CNI (2020), esse setor foi responsável por 20,9% do PIB e 33% das arrecadações de impostos federais no ano de 2020.

Com a mudança do cenário atual e os desafios enfrentados pela pandemia do COVID-19, foi necessário que as pequenas indústrias se reinventassem, buscando novos mercados e alternativas para se manter em operação. Máximo (2021) ressalta que a queda na arrecadação de impostos como o IPI, relacionado ao desempenho das indústrias, além do PIS e Cofins, relacionados às vendas, demonstram claramente os efeitos causados pela pandemia na atividade econômica.

Surgiu então como demanda da empresa Tecniconfial Indústria e Comércio LTDA o dimensionamento de um pasteurizador tubular, produto que ainda não compõem seu portfólio. A empresa, que trabalha a mais de 35 anos no ramo de equipamentos industriais, atualmente é especializada na produção de pasteurizadores e trocadores de calor a placas. Esses equipamentos possuem peças de aquisição com alto custo e tiveram os valores reajustados devido às grandes incertezas do mercado internacional.

A fabricação de pasteurizadores tubulares traria diversos benefícios à empresa, uma vez que sua produção seria totalmente interna, eliminando a necessidade de serviços terceirizados e aquisição de peças importadas, como as placas, e diminuindo a necessidade de assessoria técnica externa, pois no caso de pasteurizadores e trocadores a placas, existe a dependência de fornecedores e fabricantes de placas para realizar o dimensionamento do equipamento, que varia de fornecedor para fornecedor e projeto para projeto.

Este equipamento também possibilitaria a inserção da empresa em um novo nicho na área industrial, visto que os pasteurizadores tubulares, em geral, são utilizados para o processamento de suco, e não laticínios, o principal foco da empresa atualmente.

Como os cálculos termodinâmicos para cada equipamento são realizados de forma personalizada e de acordo com o projeto de cada cliente, foi estabelecida a importância de criar um sistema que facilite a realização destes cálculos, agilizando o processo e fazendo com que a empresa se torne mais versátil e independente,

reduzindo significativamente os custos de projeto e comercializando um produto com o valor reduzido, que pode também ser adquirido por empresas de pequeno porte.

1.1 TEMA

Dimensionamento e projeto de um pasteurizador tubular, criando um sistema ou algoritmo que facilite a realização dos cálculos necessários para o dimensionamento do equipamento.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A principal finalidade deste trabalho é projetar um pasteurizador tubular, criando um sistema ou algoritmo que facilite a realização dos cálculos necessários para o dimensionamento do equipamento, tornando o processo de orçamentos e projetos mais ágil no dia a dia, trazendo mais independência e versatilidade para a empresa, além de atender um público mais amplo com um produto de menor valor aquisitivo e com operação relativamente mais simples que o pasteurizador a placas.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Para JUNG E FRYER (1999), o processamento térmico é uma das técnicas mais eficientes para aumentar a segurança no consumo de alimentos, prolongando o prazo de validade e mantendo as qualidades dos mais diversos produtos, com um custo significativamente reduzido.

A pasteurização é uma forma de tratamento térmico que elimina os micro-organismos termo sensíveis existentes nos alimentos, sendo utilizada quando tratamentos térmicos mais elevados trazem perdas significativas de qualidade no alimento ou os agentes microbianos responsáveis por alterações não sejam termo resistentes (FRANCESCHINI, REINKE, 2000).

Os pasteurizadores com trocador de calor a placas são uma solução inovadora, compacta e eficiente para grandes indústrias, porém devido ao seu alto custo, pequenos produtores encontram dificuldades em viabilizar a aquisição deste equipamento tão importante no processo produtivo. Seu funcionamento se dá através

do acionamento por um painel de comando que trabalha em conjunto com uma bomba sanitária, destinada à circulação do produto pela tubulação, um sistema de aquecimento (que pode ser elétrico ou à vapor) e um sistema de água gelada, que são movimentados por bombas centrífugas, um trocador de calor a placas e um ou mais tanques de armazenamento, como pode ser observado na Figura 1.

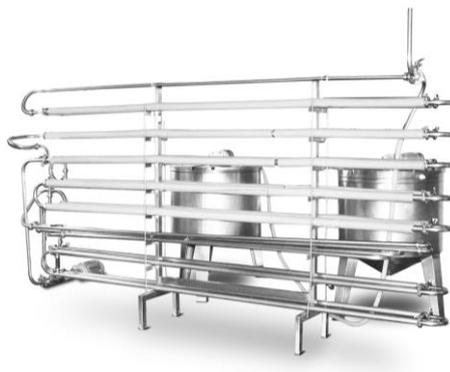
Figura 1 - Pasteurizador com trocador de calor a placas.



Fonte: Techniconfial, 2022.

Em alguns casos, uma opção aos pasteurizadores com trocador de calor a placas são os pasteurizadores com trocadores de calor tubulares, como mostra a Figura 2. Em geral, esses equipamentos possuem um custo relativamente menor e forma de funcionamento simplificada, podendo operar por mais tempo entre uma limpeza e outra (BYLUND, 1995).

Figura 2 - Pasteurizador com trocador de calor tubular.



Fonte: Max Machine, 2021.

Trocadores tubulares possuem menor eficiência na troca térmica já que a maioria dos fluidos tende a escoar de forma laminar em seu interior. Em vista disso,

os principais desafios do projeto encontram-se na dificuldade em reduzir seu espaço físico mantendo a eficiência do equipamento.

Dessa forma, seria relevante e efetivo criar um sistema de dimensionamento que facilite os cálculos para definição dos critérios de construção variáveis de um pasteurizador tubular, tornando assim a empresa mais independente?

1.4 HIPÓTESES

Segundo Gil (2002), hipóteses são proposições de soluções possíveis, podendo ser expressões verbais que venham a ser declaradas verdadeiras ou falsas. São compreendidas também proposições testáveis, que podem vir a ser a solução do problema de pesquisa. Sabendo os problemas de pesquisa apresentados, foram levantadas as seguintes hipóteses:

- a) Um pasteurizador de suco com trocador de calor tubular pode possuir dimensões reduzidas, mantendo a eficiência.
- b) É possível desenvolver um sistema ou algoritmo que garanta o dimensionamento do equipamento de forma rápida.

1.5 JUSTIFICATIVA

Com a necessidade constante que os produtores possuem em atender seus clientes de forma ágil e dinâmica, agregando valor e fornecendo produtos de qualidade, a pasteurização se tornou um processo essencial para a determinação da qualidade final do produto, sendo também uma oportunidade a ser explorada devido à pandemia de COVID-19.

Uma vez que o volume do consumo de diversos produtos sofreu uma queda em muitos estabelecimentos comerciais, a pasteurização surge como uma alternativa para os pequenos produtores aumentarem suas vendas, prolongando a vida útil de seus produtos e trazendo maior valor agregado com a utilização desse recurso.

Com o controle dos softwares de projeto para trocadores de calor a placas restrito às grandes empresas especializadas na fabricação de placas, o processo de orçamento e projeto para este tipo de equipamento tem se tornado cada vez mais demorado e oneroso. Visto que a maioria das placas para trocador de calor

disponíveis no Brasil atualmente são oriundas de importações, este fator, aliado ao grande aumento do dólar em relação ao real, tornaram a aquisição desse equipamento ainda mais desafiadora para pequenos produtores. Com isso em mente, se torna importante o desenvolvimento de um pasteurizador com trocador de calor tubular que possa ser comercializado para este mercado, analisando a real viabilidade desse produto em comparação com um pasteurizador com trocador de calor a placas e criando um sistema que possa automatizar e agilizar a realização dos cálculos termodinâmicos de dimensionamento para a realização de orçamentos.

Desta forma, o projeto contribuirá para que a empresa possa oferecer outra opção de soluções aos seus clientes, aumentando a versatilidade de seus produtos e centralizando todo o processo de dimensionamento e construção do pasteurizador com trocador tubular dentro da própria empresa, eliminando a necessidade da interferência de empresas terceiras nesse processo, trazendo mais agilidade na elaboração de orçamentos e desenvolvimento dos projetos no geral.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo Geral

De acordo com as necessidades identificadas, o objetivo geral deste trabalho é projetar um pasteurizador com trocador de calor tubular e desenvolver um sistema ou algoritmo que facilite a realização dos cálculos termodinâmicos para dimensionamento do equipamento.

1.6.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de dimensionar o pasteurizador com trocador de calor tubular de forma correta, serão desenvolvidos alguns objetivos específicos:

- Realizar pesquisa bibliográfica sobre os processos de pasteurização, identificando os pontos fortes do pasteurizador com trocador de calor tubular;
- Definir os requisitos da empresa para o produto a ser pasteurizado e as dimensões padrão de configuração desejadas pela empresa;
- Desenvolver os cálculos termodinâmicos necessários para o dimensionamento correto do pasteurizador com trocador de calor tubular;

- Criar um sistema ou algoritmo que facilite os cálculos de dimensionamento de um pasteurizador com trocador de calor tubular, agilizando a realização de orçamentos;

- Projetar um pasteurizador com trocador de calor tubular com base nos requisitos delimitados pela empresa e os dados obtidos através do sistema de dimensionamento, realizando a modelagem do equipamento em software 3D.

2 REVISÃO DA LITERATURA

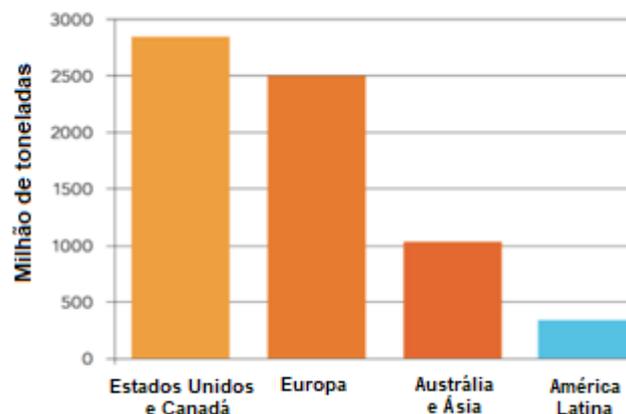
2.1 MERCADO E CADEIA DO SUCO

No mercado do suco, é raro observar uma integração completamente vertical, onde uma companhia é responsável pela cadeia completa, desde a colheita até a distribuição para o consumidor final. Isso se dá não apenas devido aos fatores geográficos, mas também devido à forma que a indústria se desenvolveu ao longo dos anos (TETRAPACK, 2017).

Segundo TRIBESS (2003), o suco de laranja está entre os principais itens da exportação brasileira e sua produção é uma das três primeiras atividades agrícolas do estado de São Paulo. O estado é responsável por 98% da produção nacional e emprega cerca de 400 mil pessoas, produzindo 53% do suco de laranja e 80% do suco de laranja concentrado disponível mundialmente. Um a cada três copos de suco de laranja consumidos no planeta saem das fábricas brasileiras (CITRUSBR, 2022).

Apesar de ser um dos maiores produtores de laranja do mundo, o Brasil não figura entre os maiores consumidores do seu suco. Este título pertence aos mercados americano e europeu, que juntos consomem aproximadamente 75% do volume total de suco produzido no mundo, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Consumo de suco de laranja embalado em algumas regiões do mundo.



Fonte: Adaptado de TETRAPACK, 2017 *apud* EUROMONITOR, 2017.

Logo após a colheita, a laranja passa por algumas etapas até seu processamento. Inicialmente, os caminhões carregados de frutas são recebidos e é retirada uma amostra de cada lote para análise do rendimento do suco, °Brix, acidez

e cor. Após a inspeção inicial, os frutos são armazenados brevemente em silos de estocagem e encaminhados para a lavagem, onde esguichos e escovas realizam a limpeza mecânica da casca, com ou sem o auxílio de detergentes. Em seguida, os frutos já limpos são classificados por operadores, que removem os danificados ou amassados e os encaminham para as máquinas classificadoras, que os separam por tamanho, até chegar às linhas de extração, onde o suco é extraído mecanicamente (CITRUSBR, 2022).

A TETRAPACK (2017) destaca que comercialmente, o suco de laranja é dividido em duas grandes categorias: suco pronto para beber e suco concentrado.

O suco pronto para beber é dividido em sete subcategorias:

1) Fresco: é o suco embalado imediatamente após a extração, antes mesmo da pasteurização ou qualquer outro tratamento químico/físico e possui uma durabilidade extremamente baixa.

2) Não Concentrado, também conhecido como NFC (*Not-From-Concentrated*): é o suco que não passou por nenhum processo de concentração ou diluição.

3) Premium: uma nomenclatura diferente para o não concentrado, utilizado para propósitos de marketing nos Estados Unidos e no Canadá.

4) Suco Puro ou 100% Suco: pode ser derivado do não concentrado ou do concentrado.

5) Concentrado: é produzido ao diluir o suco de laranja concentrado com água potável.

6) Enriquecido: é o suco com aditivos de vitaminas e minerais.

Já o suco concentrado, também denominado FCOJ (*Frozen Concentrated Orange Juice*) é subdividido apenas de acordo com seu °Brix (quantidade de sólidos solúveis, como açúcar e sacarose, em uma fruta).

As principais diferenças do suco concentrado em comparação com o suco pronto para beber se dão na questão de armazenamento, transporte e produto final. O suco concentrado pode permanecer estocado por até dois anos e ocupa um volume de cinco a seis vezes menor que o suco não concentrado (já que toda a água de sua composição é removida durante seu processamento), reduzindo assim os custos com logística. Em contrapartida, o suco pronto para beber possui qualidade superior em termos de paladar, se assemelhando ao suco fresco e sendo pasteurizado com a própria água da laranja, porém deve ser agitado periodicamente para evitar a

separação entre o suco e os sólidos dissolvidos, mantendo assim a uniformidade de seu grau Brix (CITRUSBR, 2022).

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO DE ALIMENTOS

De acordo com TRIBESS (2003), “grande parte do suco de laranja fresco comercializado no Brasil está em desacordo com os padrões de contaminação microbiológica estabelecidos pela legislação” (*apud* SHOMER, COGAN, MANNHEIM, 1994).

A maioria das matérias primas recebidas para o processamento de alimentos carregam contaminantes não alimentícios, vindos principalmente do ambiente em que foram produzidas, que precisam ser removidos antes de qualquer outro processamento. A indústria se preocupa com grande parte da cadeia de produção e processamento dos alimentos, com o intuito de oferecer produtos nutritivos de alta qualidade e seguros para o consumo, uma vez que a qualidade da matéria prima influencia diretamente na qualidade do alimento processado (CHEN; ROSENTHAL, 2015).

Dependendo do tratamento e do produto, a aplicação de calor nos alimentos traz benefícios como o aumento de vida de prateleira e inocuidade, além de destruir fatores antinutricionais e aumentar a biodisponibilidade de alguns nutrientes, como por exemplo, o aumento da digestibilidade de proteínas. Em contrapartida, o uso de calor também pode causar a perda de alguns nutrientes termolábeis e alterações significativas em substâncias aromáticas, ocasionando alterações no sabor e cor dos alimentos (NESPOLO *et al*, 2015).

De forma geral, é preciso que 90% dos micro-organismos sejam destruídos a determinada temperatura para que os danos à qualidade dos produtos sejam minimizados, o que irá depender dos patogênicos e deteriorantes existentes no produto, das enzimas indesejáveis e da sensibilidade do produto ao tratamento térmico. Diferentes micro-organismos e enzimas possuem resistência térmica distinta, que também pode variar em função de outros parâmetros, como o pH e umidade. (NESPOLO *et al*, 2015).

2.2.1 Modalidades utilizadas no tratamento térmico de alimentos

Os tratamentos térmicos de alimentos são classificados em três principais modalidades: pasteurização, esterilização e branqueamento. Suas principais características e diferenças são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Características das principais modalidades de tratamentos térmicos.

Tipo	Pasteurização	Esterilização	Branqueamento
Objetivo	Destruir os micro-organismos patogênicos não esporulados e reduzir significativamente os deteriorantes.	Destruir os micro-organismos, inclusive seus esporos.	Inativar enzimas deteriorantes no produto antes de realizar outro tratamento.
Temperaturas utilizadas	Menores que 100°C	Maiores que 100°C	Entre 80°C e 100°C
Modalidades	HTST / LTLT	UHT	Utilização de água quente ou vapor por alguns minutos e após, resfriamento imediato.
Observação	É necessário um método de conservação combinado / Vida de prateleira curta / Não é necessária embalagem asséptica	Não é necessário um método de conservação combinado / Vida de prateleira aumentada / É necessária embalagem asséptica (UHT)	Utilizado como pré tratamento e não como método de conservação em si.

Fonte: Adaptado de NESPOLO *et al*, 2015.

Essas modalidades envolvem três procedimentos principais, que são: o estágio de aquecimento (i), onde o produto é aquecido até determinada temperatura e encaminhado ao estágio de retenção (ii) onde a temperatura é mantida por um determinado tempo, até que seja possível garantir um nível de esterilização onde não haja perda significativa de suas propriedades, sendo então encaminhado para o estágio de resfriamento (iii), onde o produto é resfriado rapidamente a temperaturas baixas (SCHMIDEL, 2001).

Para NESPOLO *et al* (2015), o pH e a aerobiose do produto são dois dos principais fatores para a determinação do processo térmico e o binômio temperatura-tempo a serem utilizados, além é claro, do produto final pretendido.

No caso do suco de laranja com $\text{pH} < 4.5$, a pasteurização HTST (*High Temperature and Short Time* - Alta Temperatura e Pouco Tempo), se dá a uma temperatura entre 77~87°C, durante cerca 15~60 segundos, seguida por uma rápida refrigeração entre 3~7°C (TETRAPACK, 2017). Esses valores variam principalmente devido ao pH do suco (FELLOWS, 2000). Caso o suco de laranja não seja imediatamente resfriado após a pasteurização, ou armazenado em locais com

temperatura ambiente relativamente alta, a temperatura de pasteurização necessária pode ser de até 95°C (SILVA, GIBBS, 2008).

Na pasteurização LTLT (*Lower Temperature, Long Time* - Temperatura Baixa, Muito Tempo), é utilizada uma temperatura de 65° por aproximadamente 30 minutos (FELLOWS, 2000). Mesmo com uma longa duração, esse método afeta de forma significativa o sabor e a perda de vitaminas do suco, sendo pouco utilizado na indústria (NESPOLO *et al* 2015).

O método de esterilização UHT (*Ultra High Temperature* - Temperatura Ultra Alta) utiliza temperaturas entre 123~138°C durante cerca de 5~15 segundos (TETRAPACK, 2017). Apesar de ser muito mais rápido, esse tratamento afeta diretamente o sabor do suco, eliminando praticamente todas as bactérias, até mesmo as desejáveis (JUNG, FRYER, 1999). A partir do momento que ocorre a pasteurização ou esterilização do suco, o restante do processo deve ocorrer em tanques herméticos de forma a evitar contaminação (FELLOWS, 2000). Este tipo de suco é envasado em embalagens esterilizadas e possui um longo prazo de validade, podendo ser distribuído e comercializado à temperatura ambiente (TRIBESS, 2003).

2.2.2 Equipamentos utilizados no tratamento térmico de alimentos

Para FELLOWS (2000), há dois tipos principais de equipamentos para pasteurização: os equipamentos desenvolvidos para produtos já embalados e os equipamentos desenvolvidos para produtos que serão embalados.

Alguns tipos de produtos, como sucos, geleias ou cervejas podem ser pasteurizados após a embalagem, normalmente em garrafas ou latas. Em geral, esteiras carregam o produto já embalado que passa primeiramente por uma câmara com ar ou água aquecida, passando então pelo processo de resfriamento em outra câmara. No caso de embalagens de vidro, é preciso ter o cuidado para que a diferença de temperatura não seja muito alta para que o choque térmico não acabe quebrando a embalagem (FELLOWS, 2000). Esse processo também é conhecido como autoclavagem (BYLUND, 1995).

Já no caso de produtos pasteurizados antes do empacotamento/embalagem, os equipamentos mais utilizados são os trocadores de calor. Esses equipamentos fazem a transferência de calor de forma indireta entre o produto e o meio de

aquecimento/resfriamento, que são isolados por uma parede. A velocidade do líquido é reduzida a quase zero nas margens da parede que separa os dois fluidos, aumentando progressivamente até sua velocidade máxima, no centro do canal. O calor então é transferido quase inteiramente por convecção entre os canais de fluido, com uma pequena parte sendo transferida por condução na parede externa do casco (BYLUND, 1995).

2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

De forma simplificada, o fenômeno de transferência de calor pode ser entendido como o trânsito de energia térmica que ocorre devido a uma diferença de temperatura no espaço. Sempre que houver uma diferença de temperatura em um meio, ou entre meios, haverá transferência de calor (INCROPERA *et al*, 2016).

O fluxo de calor, em geral, é transferido da superfície mais quente para a mais fria e sua taxa de transferência é proporcional ao gradiente de temperatura entre os meios, como descrito na segunda lei da termodinâmica. Durante o fenômeno, a diferença de temperatura é gradativamente reduzida até ambos os meios atingirem uma temperatura de equilíbrio, podendo se dar através de condução, convecção ou radiação (BYLUND, 1995).

2.3.1 Condução

A transferência de calor condutiva pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para suas adjacentes, em uma substância sólida, líquida ou gasosa. Essa partícula com maior energia e conseqüentemente, maior temperatura e agitação, transfere energia ao se colidir com uma partícula menos energética ou de menor temperatura (INCROPERA *et al*, 2016).

2.3.2 Convecção

A transferência de calor por convecção se dá por dois mecanismos. Além da transferência de energia devido ao movimento molecular da substância, ela também é transmitida pela troca de energia através do movimento de um fluido adjacente, em

diferente temperatura. Esse processo pode se dar de forma forçada, quando o escoamento do fluido é causado por meios externos, ou natural, quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo originadas devido a diferenças de densidade por conta das variações de temperatura do fluido (INCROPERA *et al*, 2016).

2.3.3 Radiação

Diferente da transferência de calor por condução e da transferência de calor por convecção, que necessitam de meios materiais para que haja a transferência de energia, a transferência por radiação não necessita deles. Nesse caso, a energia é emitida por um corpo que possui temperatura diferente de zero e transportada por ondas eletromagnéticas. Quase todas as substâncias emitem energia através de radiação (INCROPERA *et al*, 2016; BYLUND, 1995).

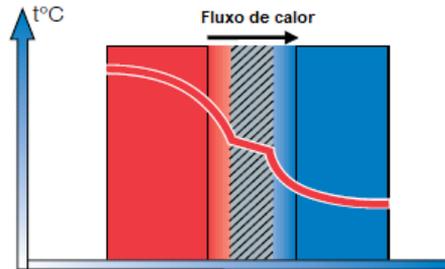
2.4 TROCADORES DE CALOR

A transferência de calor por condução e convecção se dá principalmente através dos métodos direto (cruzado) e indireto. No método direto, a transferência ocorre de forma eficiente e rápida, já que os meios quente e frio do sistema são misturados, porém é muito comum que ocorra transferência de massa além da transferência de calor, o que é indesejável em algumas aplicações. Esse método é utilizado, por exemplo, em situações que é necessário realizar o aquecimento de água: o vapor saturado é injetado diretamente na água, transferindo calor através de condução e convecção; outra situação onde é possível a aplicação desse método, é na fabricação de alguns tipos de queijos, onde água quente é adicionada à coalhada, para que seja realizado seu aquecimento durante a preparação (BYLUND, 1995).

No método indireto, uma parede é colocada entre os meios quente e frio de modo que ambos permaneçam separados. O calor é então transferido do meio quente para a parede, e da parede para o meio frio, como pode ser visto na Figura 4. Existe uma camada limite de cada lado da parede, onde a velocidade dos fluidos diminui devido ao atrito até chegar a quase zero. A camada de fluido seguinte tem sua velocidade reduzida apenas pela velocidade menor da camada limite, então também

possui velocidade menor. A velocidade vai aumentando progressivamente, sendo maior no centro do canal. O equipamento utilizado para implementar essa troca é conhecido como trocador de calor (INCROPERA *et al*, 2016; BYLUND, 1995).

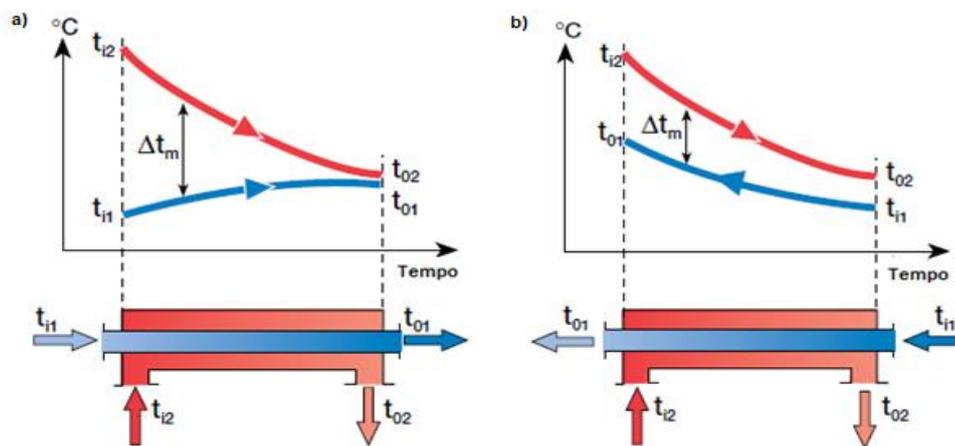
Figura 4 - Diagrama de transferência de calor por meio indireto.



Fonte: Adaptado de BYLUND, 1995.

Segundo Incropera *et al* (2016), dentro dos trocadores, os fluidos podem circular em sentidos paralelos ou opostos, também chamados de contrafluxo, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Distribuição de temperatura em um trocador de calor com fluxo (a) paralelo (b) contrafluxo.



Fonte: Adaptado de BYLUND, 1995.

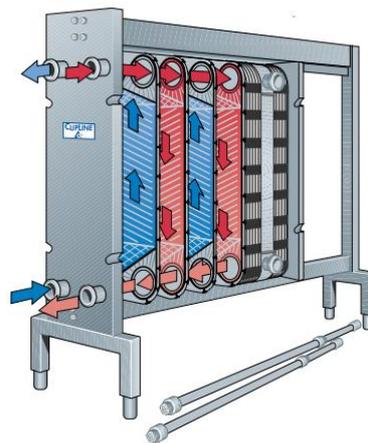
Na configuração paralela, ambos os fluidos entram pela mesma extremidade do trocador, sendo impossível aquecer o produto a uma temperatura mais alta do que a que seria obtida se os dois meios fossem misturados. Outra desvantagem é a grande diferença de temperatura entre a entrada e a saída dos fluidos, causando perda da eficiência e a necessidade de maiores áreas de troca para alcançar os objetivos térmicos. No arranjo em contrafluxo os fluidos entram por diferentes extremidades

dentro do trocador de calor, fazendo com que o lado frio encontre o menor gradiente de temperatura do lado quente na entrada, sendo aquecido progressivamente enquanto atravessa o trocador de calor e se mantendo sempre alguns graus abaixo da temperatura do lado quente, o que possibilita maior eficiência na troca térmica (INCROPERA *et al*, 2016).

2.4.1 Trocadores de calor a placas

Esse tipo de trocador é construído com placas finas e corrugadas, de aço inoxidável, separadas umas das outras por gaxetas de vedação nas bordas de sua superfície. O vão que fica entre as placas é preenchido pelo fluido quente ou frio, dependendo da seção, como mostra a Figura 6. Na extremidade de cada placa existem dois furos, formando assim um “tubo” através dos quais cada um dos líquidos pode fluir. As placas também possuem padrões de saliências impressos em sua superfície que servem para aumentar a área da superfície da placa e promover a turbulência dentro do vão entre as placas, minimizando assim a camada limite e aumentando a transferência de calor (CHEN, ROSENTHAL, 2015).

Figura 6 - Diagrama de fluxo de um pasteurizador a placas.



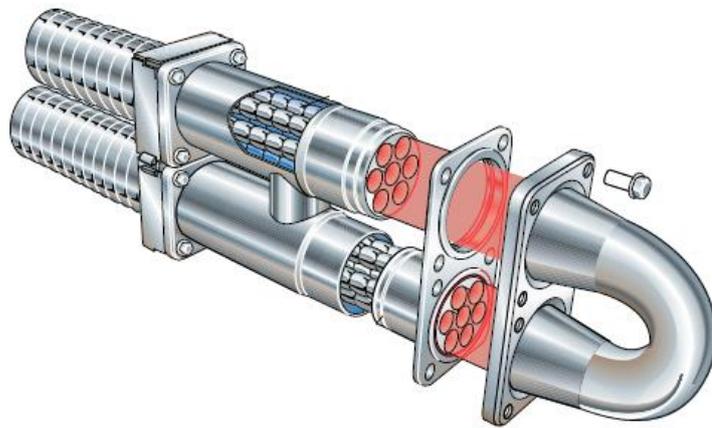
Fonte: BYLUND, 1995.

Com isso, são obtidos altos coeficientes convectivos em equipamentos relativamente compactos, além de uma grande flexibilidade quando há a necessidade de alterações no regime de trabalho do equipamento (STENSTRASSER, 2018).

2.4.2 Trocadores de calor tubulares

Os trocadores de calor tubulares podem ser construídos de forma bi ou multi tubular, conforme a Figura 7. Em ambos os casos, os fluidos quente e frio se deslocam através de seções tubulares paralelas que podem ou não possuir corrugação helicoidal. Ao final de cada seção de tubos são instaladas conexões ou placas que permitem abertura para inspeção e limpeza, além de proporcionar diferentes combinações de configuração, de acordo com a aplicação necessária (BYLUND, 1995).

Figura 7 - Diagrama de fluxo de um pasteurizador multi tubular.



Fonte: BYLUND, 1995.

Como não existem pontos de contato nos canais de escoamento, esse tipo de trocador é indicado principalmente em operações que envolvam fluidos mais viscosos ou que possuam partículas maiores. Em contrapartida, esses fluidos tendem a se comportar de forma laminar dentro de tubos, acarretando uma troca térmica menos intensa em comparação com o regime turbulento, já que se faz somente por condução (BYLUND, 1995; CRIVELLARI, 2010).

2.5 REOLOGIA DOS FLUIDOS

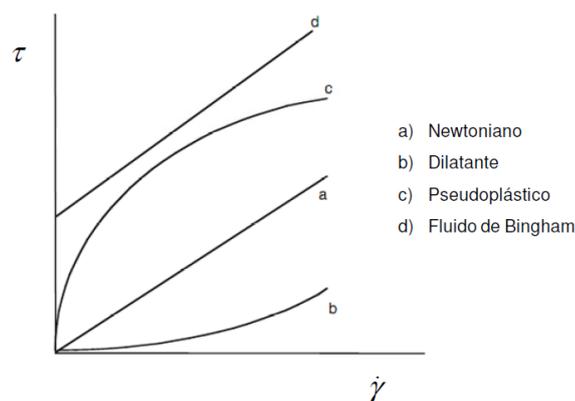
A reologia é uma ciência que estuda o escoamento e a forma com que os mais diversos materiais respondem a aplicação de tensão e sua deformação. Essa ciência divide os materiais em aqueles com comportamento dependente ou independente do tempo, além de viscoelásticos e inelásticos (CRIVELLARI, 2010 *apud* STEFFE, 1996).

Os materiais viscoelásticos apresentam comportamento de fluido e sólido de forma simultânea e seu modelo reológico possui uma tensão normal, que é a responsável por seu comportamento de sólido. Exemplos desse tipo de fluido são a massa de pão ou a massa de bolo crua, com as quais se percebe de forma clara o efeito de Weissenberg: quando o fluido se agita, ele sobe o agitador (CRIVELLARI, 2010 *apud* STEFFE, 1996).

Já o comportamento elástico da maioria dos fluidos alimentícios é diminuído e pode ser desprezado. A equação da constituição desse tipo de fluido é uma relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento, e são divididos em newtonianos ou não-newtonianos. Em geral, os fluidos newtonianos são homogêneos e constituídos de moléculas pequenas, com modelo reológico simples, onde a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento se dá de forma linear e qualquer tensão acima de zero trás movimento ao fluido, demonstrando que sua estrutura interna não é afetada, seja qual for a tensão aplicada sob eles (CRIVELLARI, 2010 *apud* STEFFE, 1996).

A Figura 8 mostra alguns exemplos de curvas de tensão-cisalhamento citadas neste trabalho.

Figura 8 - Gráfico de tensão de cisalhamento em função da velocidade de cisalhamento para fluidos com diferentes reologias.



Fonte: Adaptado de CRIVELLARI, 2010, *apud* BARBOSA-CÁNOVAS E IBARZ, 2003.

No caso dos fluidos não-newtonianos, a tensão aplicada afeta a estrutura interna do fluido, e a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento não é bem aproximada por uma reta, de forma que outras equações construtivas são propostas, sendo a tensão de cisalhamento residual o coeficiente mais importante presente nelas, uma vez que ele indica a tensão mínima requerida para que o escoamento do

fluido se inicie. Abaixo desse valor, ele apresenta características de sólido (CRIVELLARI, 2010 *apud* STEFFE, 1996).

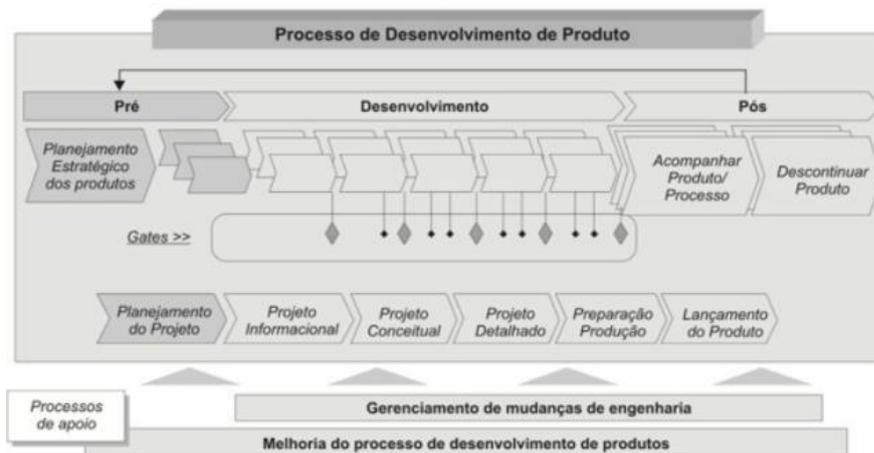
Ainda há casos especiais com fluidos que não possuem tensão residual, e tem o valor do índice de comportamento (n) diferente de um: são os fluidos pseudoplásticos ($n < 1$) e dilatantes ($n > 1$). Os fluidos pseudoplásticos apresentam diminuição na viscosidade aparente quando a tensão de cisalhamento é aumentada (como ocorre, por exemplo, com o catchup), já os fluidos dilatantes aparentam um aumento de sua viscosidade quando tensionados (como ocorre com uma solução aquosa de amido de milho). Esse tipo de comportamento ocorre devido a presença de compostos com alto peso molecular ou partículas longas em baixas concentrações, devido a alta interação, conexão ou assimetria entre partículas e variação do tamanho e forma das partículas. De forma resumida, é possível entender que a diminuição da viscosidade com o aumento da tensão de cisalhamento ocorre devido a alterações na estrutura do fluido com o intuito de diminuir a resistência desse cisalhamento (CRIVELLARI, 2010 *apud* STEFFE, 1996).

Finalmente, existem também os fluidos de Bingham, que possuem índice de comportamento (n) igual a 1, porém sua tensão residual é maior do que zero. Devido a isso, quando se aplica uma tensão maior que a residual, esses fluidos apresentam reologia semelhante à dos fluidos newtonianos, o seja, seu comportamento é linear (CRIVELLARI, 2010).

3 METODOLOGIA

Sendo este trabalho considerado, principalmente, um projeto de produto, a pesquisa exploratória foi aliada à metodologia de desenvolvimento de produtos, que segundo Amaral *et al* (2006), pode ser dividida em três grandes fases: o pré desenvolvimento, o desenvolvimento e o pós desenvolvimento, como visto na Figura 9. As fases de pré e pós desenvolvimento são mais genéricas, podendo ser utilizadas por diversos tipos de empresas com poucas alterações.

Figura 9 - Fases do desenvolvimento de um produto.



Fonte: AMARAL *et al*, 2006.

Como o objetivo deste trabalho não é a fabricação de um protótipo ou do equipamento em si, e sim, o dimensionamento baseado nas informações obtidas através de um estudo teórico de caso, a fase de desenvolvimento será concluída no projeto detalhado.

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

A fase inicial de planejamento do projeto se deu com a empresa, coletando informações e obtendo um *briefing* para melhor entendimento das expectativas de projeto e funcionamento geral do equipamento.

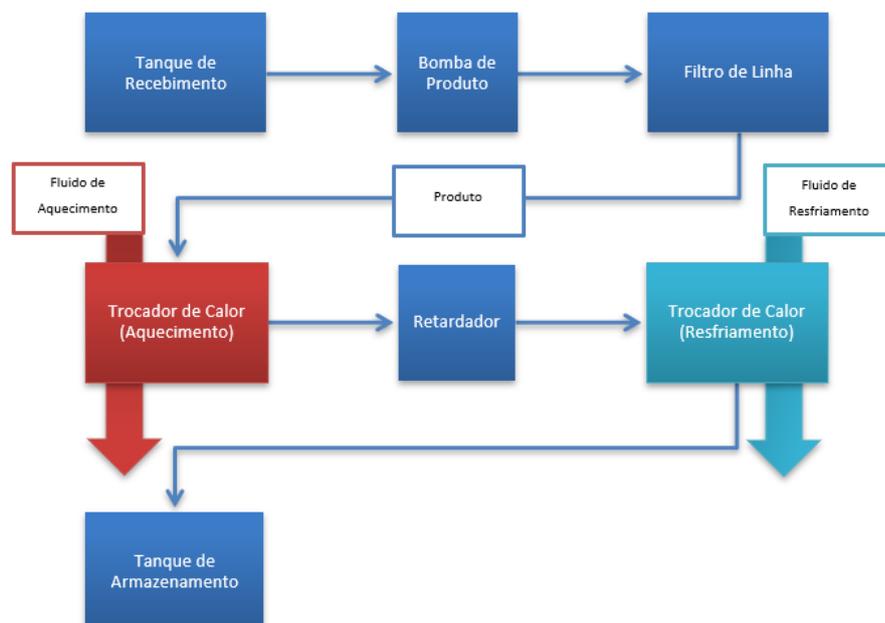
Um dos principais tópicos discutidos e ponto de partida para todo o dimensionamento do pasteurizador tubular foram as informações obtidas nesse primeiro contato, onde foi identificado que a maioria das máquinas extratoras de suco

para pequenas indústrias trabalha com vazão volumétrica aproximada de 150 litros/hora.

Durante o projeto informacional, foi realizada uma pesquisa exploratória, que de acordo com Gil (2002), tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, aprimorando as ideias e possibilitando uma grande gama de considerações acerca do tema estudado. Com isso, foi possível conhecer melhor as técnicas de processamento térmico de alimentos, em especial do suco de laranja. Foram utilizadas diversas fontes de pesquisa como livros, artigos e dissertações, manuais e vídeos disponíveis online para melhor compreensão da cadeia do suco e suas formas de processamento.

Além do levantamento bibliográfico, Gil (2002) cita que entrevistas com pessoas com experiência prática no problema pesquisado e análise de exemplos que estimulam a compreensão também são pontos chave durante o projeto informacional. Em vista disso, durante essa etapa, o contato direto com a empresa continuou sendo de grande relevância e foi definido um diagrama de componentes que fazem parte da construção do pasteurizador, que pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Diagrama de componentes do pasteurizador tubular.

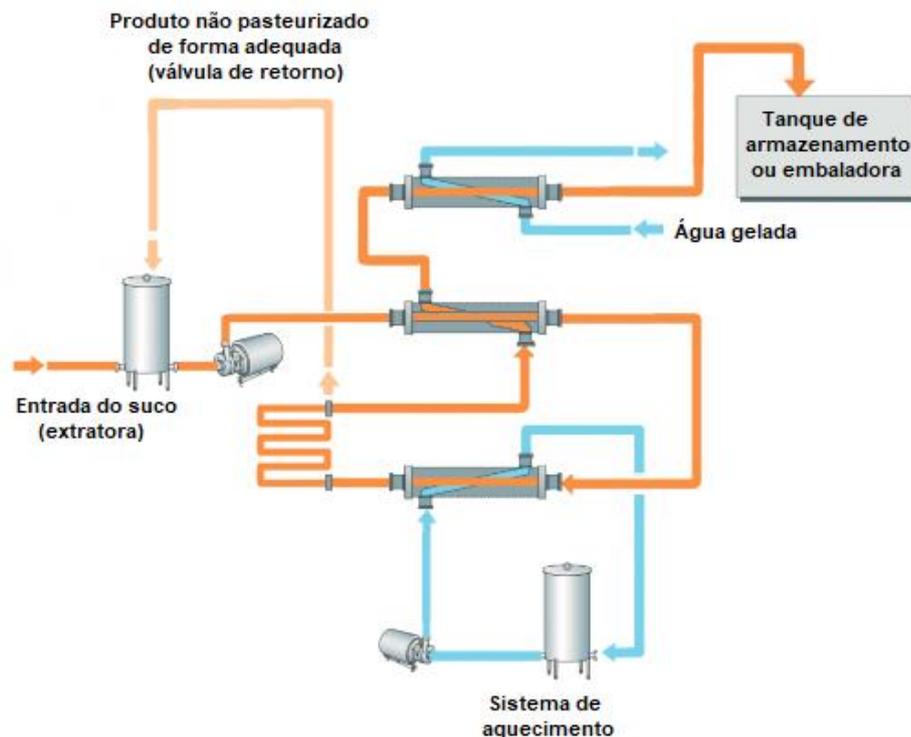


Fonte: A autora, 2022.

Nesse diagrama, é possível visualizar de forma simplificada o processo esperado de funcionamento do pasteurizador tubular e seus componentes principais.

Após a saída da extratora, o suco é armazenado em um tanque de recebimento por um curto período de tempo, até o que o volume extraído seja suficiente para completar o tanque. Nesse meio tempo, os sistemas de aquecimento e resfriamento do pasteurizador são acionados. O sistema de aquecimento geralmente é composto de um tanque com resistências elétricas que fazem o aquecimento da água ou então um tanque e uma caldeira, que aquece a água até virar vapor. Esse vapor então é injetado dentro do tanque com água, realizando seu aquecimento direto. O sistema de resfriamento geralmente é composto por um tanque e um sistema de banco de gelo com unidade condensadora. Em seguida, uma bomba de produto, que pode ser centrífuga ou positiva, é acionada, levando ou não o suco até um filtro de linha, que pode fazer a filtragem de partículas presentes no suco. Todo o processo pode ser visualizado de forma simplificada na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama de fluxo do processo de pasteurização.



Fonte: Adaptado de TETRAPACK, 2017.

O fluido então é encaminhado a seção de pré aquecimento do pasteurizador (também chamada de regeneração), onde realiza troca térmica através de seções tubulares com o suco que está saindo do retardador. Logo em seguida, o suco passa para a seção de aquecimento, onde realiza troca térmica através de tubulações de

seções circulares com a água que está entrando no sistema a partir do taque do sistema de aquecimento.

O suco sai então da seção de aquecimento e passa por um tubo de retenção, onde permanece à temperatura constante por um tempo pré-determinado, para que ocorra a inativação das enzimas e extinção dos micro organismos presentes. É nesse tubo de retenção que a pasteurização propriamente ocorre. Na saída do tubo de retenção, existe um sensor de temperatura, que garante que o suco esteja saindo à temperatura configurada do retardador, garantindo assim, a pasteurização por completo. Caso o suco saia do retardador a uma temperatura menor que a desejada, uma válvula de controle pneumático, chamada também de válvula de retorno automático é acionada, levando esse suco de volta ao tanque de recebimento para que ele passe novamente por todo o processo. Essa válvula também atua como um sistema de segurança, impedindo que o produto saia do pasteurizador sem que esteja dentro dos parâmetros esperados. Ao sair do tubo de retenção, o suco passa brevemente pela seção de regeneração (passo 2), onde realiza troca térmica com o suco que está entrando no pasteurizador, fazendo o aproveitamento de energia e tornando o processo todo mais eficiente.

Finalmente, o suco entra na seção de resfriamento, onde faz troca térmica com a água gelada proveniente do sistema de resfriamento (banco de gelo), sendo resfriado até a temperatura de embalagem e armazenado em um tanque.

3.2 MODELO MATEMÁTICO

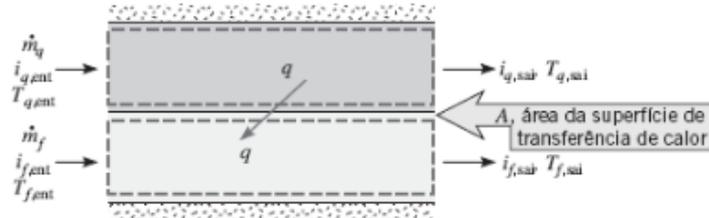
Segundo Incropera *et al* (2016) dois métodos podem auxiliar no dimensionamento de um trocador de calor: o método da efetividade-NUT e o método MLDT, ou média logarítmica das diferenças de temperaturas.

O método da efetividade-NUT se baseia em três parâmetros adimensionais, com funções correlacionadas em uma variedade de arranjos de fluxo existentes. Já o método MLDT é recomendado quando se tem conhecimento de pelo menos uma das temperaturas de saída do sistema, que é o caso deste projeto.

Para iniciar o dimensionamento de um trocador de calor, é importante levar em consideração quatro variáveis principais: a taxa de transferência de calor, a área de transferência de calor, a taxa de capacidade térmica e o coeficiente global de

transferência de calor. Duas dessas relações são obtidas facilmente ao se aplicar o balanço global de energia nos fluidos quente e frio, como exemplificado na Figura 12.

Figura 12 - Balanços de energia globais para os fluidos quente e frio de um trocador de calor com dois fluidos.



Fonte: INCROPERA *et al*, 2016.

Se os fluidos não passarem por uma mudança de fase e forem admitidos calores específicos constantes, chegamos à Equação 1:

$$q = \dot{m}_q c_{p,q} (T_{q,ent} - T_{q,sai}) = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,sai} - T_{f,ent}) \quad (1)$$

Onde q é a taxa total de transferência de calor, \dot{m} a vazão mássica do fluido, c_p o calor específico do fluido e T a temperatura. Os subscritos q e f se referem aos fluidos quente e frio, enquanto ent e sai se referem às condições do fluido na entrada e na saída. Como a temperatura varia conforme a posição no trocador de calor, é necessário trabalhar com a Equação 2:

$$q = UA\Delta T_{lm} \quad (2)$$

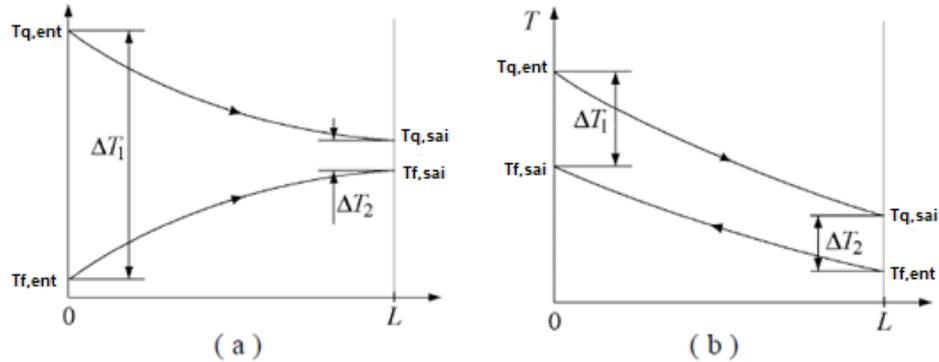
Onde U é o coeficiente global de transferência de calor, A é a área de transferência de calor e ΔT_{lm} é uma média logarítmica de diferenças de temperaturas, podendo ser definida pela Equação 3:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (3)$$

É importante definir a configuração de escoamento do trocador, uma vez que a distribuição de temperatura apresenta diferentes comportamentos.

No caso do fluxo em regime paralelo, as diferenças de temperatura na entrada e na saída geralmente possuirão uma amplitude maior, se comparando com o regime contrafluxo, como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Diferenças de temperatura ΔT_1 e ΔT_2 em regimes de (a) paralelo e (b) contrafluxo.



Fonte: Adaptado de INCROPERA, 2016.

Dessa forma, para escoamento paralelo temos a relação demonstrada na Equação 4a, e para o escoamento contrafluxo, a relação da Equação 4b.

$$\begin{cases} \Delta T_1 \equiv T_{q,1} - T_{f,1} = T_{q,ent} - T_{f,ent} \\ \Delta T_2 \equiv T_{q,2} - T_{f,2} = T_{q,sai} - T_{f,sai} \end{cases} \quad (4a)$$

$$\begin{cases} \Delta T_1 \equiv T_{q,1} - T_{f,1} = T_{q,ent} - T_{f,sai} \\ \Delta T_2 \equiv T_{q,2} - T_{f,2} = T_{q,sai} - T_{f,ent} \end{cases} \quad (4b)$$

A determinação do coeficiente global de transferência de calor é uma etapa essencial para todo o processo, mas frequentemente, a mais imprecisa, já que ele pode ser definido em função da resistência térmica total à transferência de calor entre dois fluidos, das resistências condutivas e convectivas entre fluidos separados por paredes compostas planas e cilíndricas ou de a superfície possuir aletas. Uma das formas para determinação desse coeficiente se dá através da Equação 5.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_f A_f} = \frac{1}{U_q A_q} = \frac{1}{(hA)_f} + R_p + \frac{1}{(hA)_q} \quad (5)$$

Algumas considerações foram levadas em conta para simplificar o cálculo desse coeficiente: perda de calor para a vizinhança desprezível, mudanças nas

energias cinéticas e potenciais desprezíveis, propriedades constantes, resistência térmica na parede do tubo desprezível, fatores de deposição desprezíveis e condições de escoamento plenamente desenvolvidas nos dois fluidos, chegando então a Equação 6:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \quad (6)$$

Aqui, h é o coeficiente de convecção no tubo. Os subscritos i e e se referem ao tubo interno e externo. Para que fosse possível determinar os coeficientes de convecção, foi utilizado um parâmetro adimensional dependente, conhecido como número de Nusselt. Esse parâmetro é conhecido como o gradiente de temperatura adimensional e fornece uma medida da transferência de calor por convecção que ocorre na superfície. Como para o escoamento laminar o uso de correlações não é muito preciso, o número de Nusselt utilizado corresponde às condições plenamente desenvolvidas baseados em soluções das equações diferenciais do momento e da energia, como pode ser observado no Quadro 2.

Quadro 2 - Números de Nusselt para escoamentos laminares plenamente desenvolvidos em tubos de diferentes configurações.

Seção Transversal	$Nu_D = \frac{hD_h}{k}$	
	$(q''_s \text{ uniforme})$	$(T_s \text{ uniforme})$
	4,36	3,66
	3,61	2,98
	3,73	3,08
	4,12	3,39
	4,79	3,96
	5,33	4,44
	6,49	5,60
	8,23	7,54

Fonte: Adaptado de INCROPERA *et al*, 2016.

Muitos problemas de escoamento internos envolvem a transferência de calor em regiões anulares entre tubos concêntricos.

Para os casos em que o escoamento é laminar e plenamente desenvolvido, e uma das superfícies está termicamente isolada e a outra a uma temperatura constante, tem-se as informações do Quadro 3:

Quadro 3 - Números de Nusselt para escoamentos laminares plenamente desenvolvidos em uma região anular circular com uma superfície isolada e a outra a temperatura constante.

D_i/D_e	Nu_i	Nu_e
0	—	3,66
0,05	17,46	4,06
0,10	11,56	4,11
0,25	7,37	4,23
0,50	5,74	4,43
$\approx 1,00$	4,86	4,86

Fonte: Adaptado de INCROPERA *et al*, 2016.

Nos casos em que o escoamento é turbulento, uma ênfase maior é dada na determinação de correlações empíricas, já que a análise das condições é consideravelmente mais complicada. Para escoamentos turbulentos plenamente desenvolvidos em tubo circular liso, o número de Nusselt local pode ser obtido com a Equação 7, chamada de Dittus-Boelter:

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad (7)$$

Com $n = 0,4$ para o aquecimento, e $n = 0,3$ para o resfriamento.

Para que seja possível determinar o regime de escoamento e conseqüentemente, o número de Nusselt, é necessário determinar o número de Reynolds. No caso de escoamento incompressível em regime estacionário e tubo com área de seção transversal circular, o número de Reynolds se reduz a Equação 8:

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D_{i(int)} \mu} \quad (8)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica do fluido, $D_{i(int)}$ o diâmetro interno do tubo interno e μ a viscosidade dinâmica.

Números de Reynolds de até 2000 possuem fluxo considerado laminar. Nos números acima de 2400, o fluxo é considerado turbulento. Caso o valor obtido esteja entre 2000 e 2400, o fluxo de escoamento é considerado transiente ou transitório.

O número de Prandtl fornece uma medida da efetividade relativa dos transportes de momento e de energia (por difusão) no interior das camadas-limite, e pode ser determinado através da Equação 9:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{k}{\rho C_p}} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (9)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática, ou difusidade de momento e α é a difusidade térmica. O parâmetro k é uma propriedade de transporte do fluido conhecida como condutividade térmica e ρ é sua densidade.

Com todos esses dados em mãos, é possível calcular o coeficiente de convecção no tubo interno, de seção transversal circular, através da Equação 10:

$$h_i = \frac{Nu_D k}{D_{i(int)}} \quad (10)$$

No caso do tubo externo, a seção transversal possui formato anular, então se torna necessário que os cálculos sejam realizados utilizando o chamado diâmetro hidráulico. O número de Reynolds é calculado pela Equação 11:

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi(D_{e(int)} + D_{i(ext)})\mu} \quad (11)$$

Sendo nesse caso, $D_{e(int)}$ o diâmetro interno do tubo externo (maior), e $D_{i(ext)}$ o diâmetro externo do tubo interno (menor). Calculamos então o coeficiente de convecção da seção hidráulica do tubo externo com a Equação 12:

$$h_e = \frac{Nu_D k}{D_{e(int)} - D_{i(ext)}} \quad (12)$$

Possuindo então a informação dos coeficientes de convecção interno e externo, é possível realizar o cálculo do coeficiente global de transferência de calor do sistema.

3.3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os principais recursos utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram livros, artigos, publicações e documentos online, para que fosse possível um melhor entendimento do processo e revisão bibliográfica.

Para a aplicação dos cálculos de dimensionamento do pasteurizador tubular, foi utilizado o software Microsoft Excel.

Para melhor visualização da configuração dimensional do equipamento obtida, foi utilizado o software SolidWorks para realizar a modelagem 3D.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para dar início ao dimensionamento do pasteurizador, inicialmente foram delimitadas informações importantes de seu regime de trabalho e propriedades dos fluidos de operação.

Diferentemente da água, que possui extensas informações acerca de todas as suas características como por exemplo, viscosidade, calor específico, densidade, entre outros, as informações do suco de laranja in natura se mostraram ligeiramente mais desafiadoras de se obter. Foram consultados diversos artigos, publicações e livros para a obtenção dessas informações, uma vez que existe grande variação reológica devido ao comportamento do fluido transacionar de newtoniano para não newtoniano com o aumento do seu °Brix.

Durante o projeto informacional, foi obtida a informação de que o grau Brix do suco de laranja in natura está entre 10~15°Brix, e a maioria dos estudos se dá em concentrados acima de 30°Brix, uma vez que o produto de maior relevância no mercado brasileiro é o suco concentrado, produzido para exportação.

Após a definição das propriedades de ambos os fluidos, a empresa auxiliou com conhecimento técnico de operação para definição inicial das vazões dos fluidos.

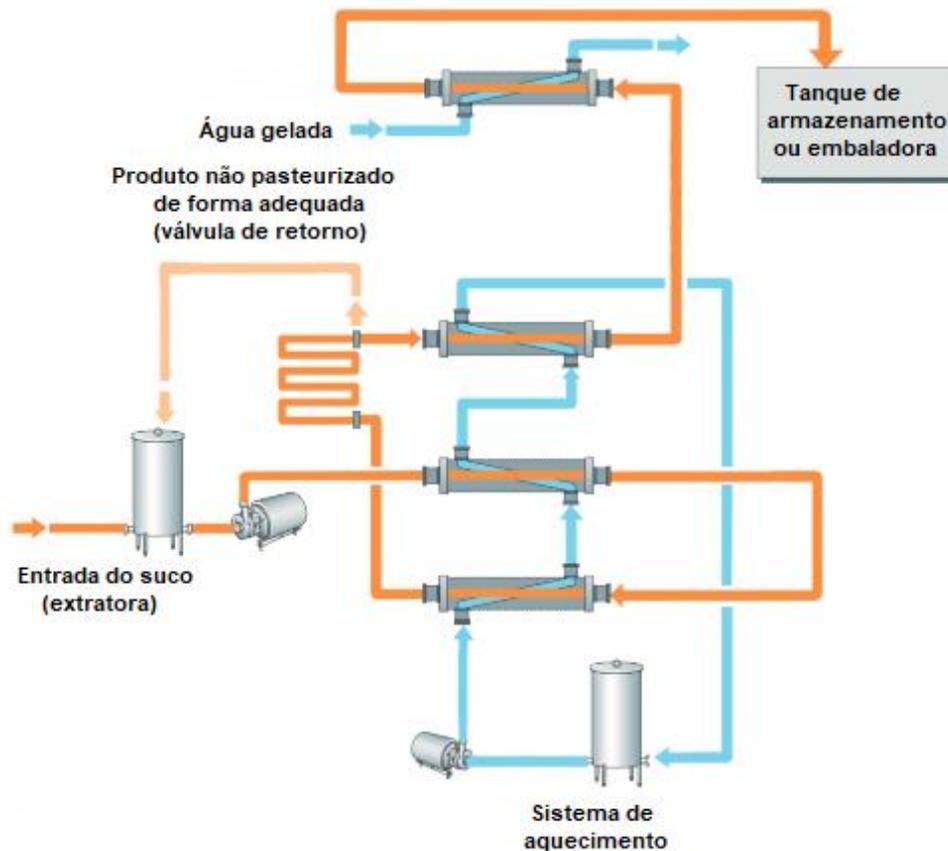
Com base no estudo de Tribess (2003), que avaliou extensivamente as características sensoriais do suco de laranja minimamente processado e realizou uma estimativa de vida de prateleira do produto, foram definidos os parâmetros para a pasteurização na temperatura de 87°C pelo período de 30 segundos.

4.1 PROPOSTA DE CONFIGURAÇÃO

A forma mais comum de construção de pasteurizadores com trocadores bi tubulares e pasteurizadores com trocadores a placas possui regeneração direta (suco para suco). Essa regeneração fica na entrada do sistema e realiza a troca térmica do suco que está saindo do retardador (quente) com o suco que está entrando no aquecimento (geralmente temperatura ambiente), como detalhado anteriormente. Essa configuração traz grande eficiência para a seção de aquecimento, fazendo com que a água quente que entra no sistema proveniente do tanque aquecimento não precise estar em uma temperatura tão elevada, trazendo economia de energia em seu aquecimento.

Na configuração proposta, que pode ser observada na Figura 14, o pasteurizador possuirá duas seções de regeneração, tanto no pré aquecimento como no pré resfriamento, fazendo aproveitamento apenas da troca térmica indireta (água para suco).

Figura 14 - Diagrama de fluxo do processo proposto de pasteurização.



Fonte: A autora, 2022.

Apesar de essa configuração reduzir ligeiramente a eficiência do sistema de aquecimento, ela trará ganhos para a seção de resfriamento, além de proporcionar melhor controle sanitário do processo como um todo, pois a limpeza se torna mais simples com o produto passando apenas pelos canais internos do trocador e a água pelo anel externo.

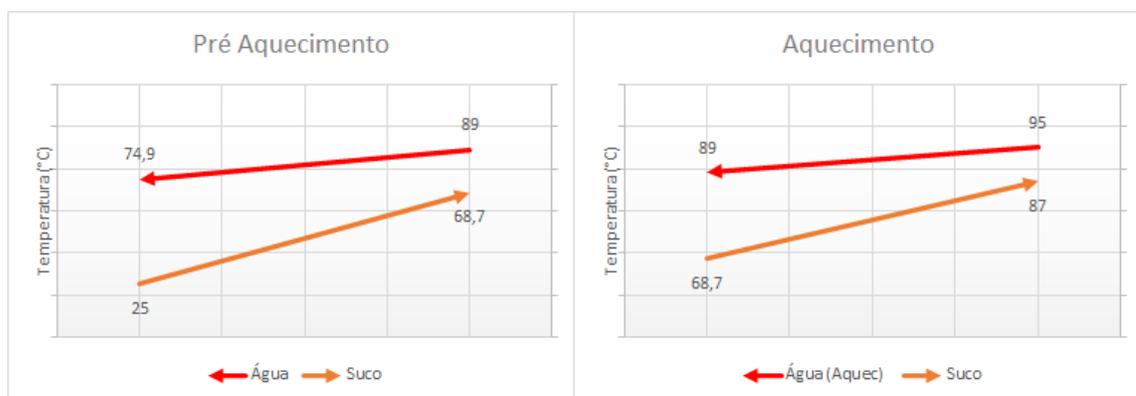
4.2 DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR

Com o auxílio do software Excel foi criado um algoritmo, se iniciando pela seção de aquecimento. Um dos motivos para isso é que já se possuía a temperatura determinada em 87°C na saída do fluido “frio” – nesse caso, o suco. Essa é a temperatura mais importante de todo o processo, uma vez que o produto precisa ser mantido nela durante o tempo de retenção para garantir a correta pasteurização.

Com a vazão do suco dependente da máquina extratora de suco e setada em 200 litros hora, os diâmetros dos tubos foram definidos em 3/8” (9,52mm) com parede de 1,0mm e 1” (25,4mm) com parede de 1,5mm. Dessa forma, o regime de escoamento do produto permanece turbulento, aumentando assim a eficiência do conjunto de forma expressiva.

Utilizando as equações detalhadas no capítulo 3.2, com a vazão de água quente de 600 litros/hora entrando a uma temperatura de 95°C na seção de aquecimento, a área de troca necessária na seção de aquecimento foi de 0,15 m², o equivalente a aproximadamente 5,2 metros de tubulação. Com as temperaturas obtidas após o balanço de energia na seção de aquecimento, foi realizado o mesmo processo na seção de pré aquecimento (regeneração 1). Para um regime em que o suco entra no sistema à uma temperatura ambiente de 25°C, a área de troca necessária nessa seção é de 0,15 m², aproximadamente 5,2 metros de tubulação. Os perfis de temperatura dessas seções podem ser melhor visualizados na Figura 15.

Figura 15 - Perfil de temperatura das seções de pré aquecimento e aquecimento.



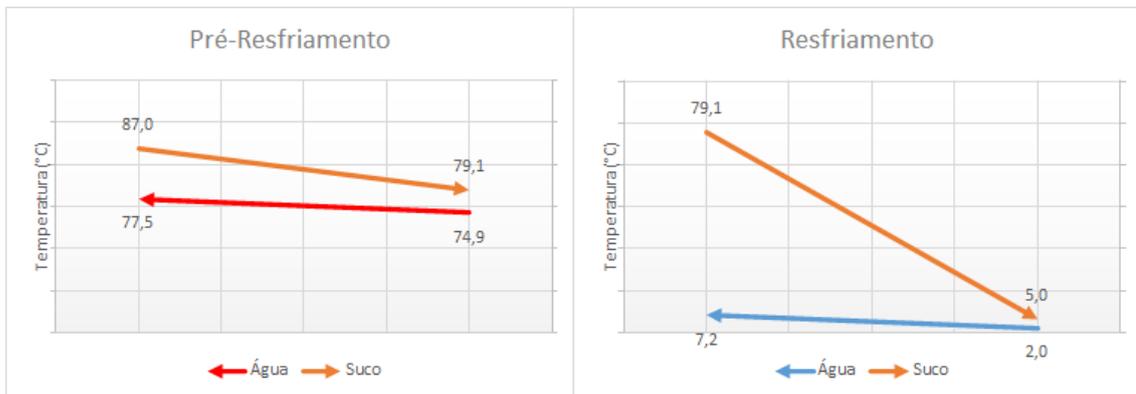
Fonte: A autora, 2022.

Já na seção de pré resfriamento, os parâmetros se inverteram, uma vez que agora, o fluido quente é o suco, e o fluido frio é a água proveniente do sistema de

resfriamento. A área de troca necessária nessa etapa foi de aproximadamente 0,25 m² ou 7,8 metros de tubulação.

Na seção de resfriamento, sabendo da necessidade de resfriar o suco a uma temperatura de aproximadamente 5°C para que as propriedades após a pasteurização sejam mantidas de forma ideal, foram feitas alterações nos parâmetros de vazão da água gelada. A vazão passou a ser considerada de 3.000 litros/hora e o fluido de resfriamento utilizado na temperatura de entrada de 2°C foi água com adição de glicol, para evitar o congelamento. Com isso, foi possível obter uma área de troca necessária de 0,47 m², o equivalente a 15,8 metros de tubulação concêntrica. Os perfis de temperatura dessas seções podem ser melhor visualizados na Figura 16.

Figura 16 - Perfil de temperatura das seções de pré resfriamento e resfriamento.



Fonte: A autora, 2022.

Finalmente, foi calculado o volume necessário do tubo de retenção, também chamado de retardador. Com os parâmetros já citados anteriormente, de 87°C pelo período de 30 segundos e um coeficiente de segurança de 20%, foi calculado um volume necessário de 2 litros para o retardador.

4.3 PROJETO DETALHADO

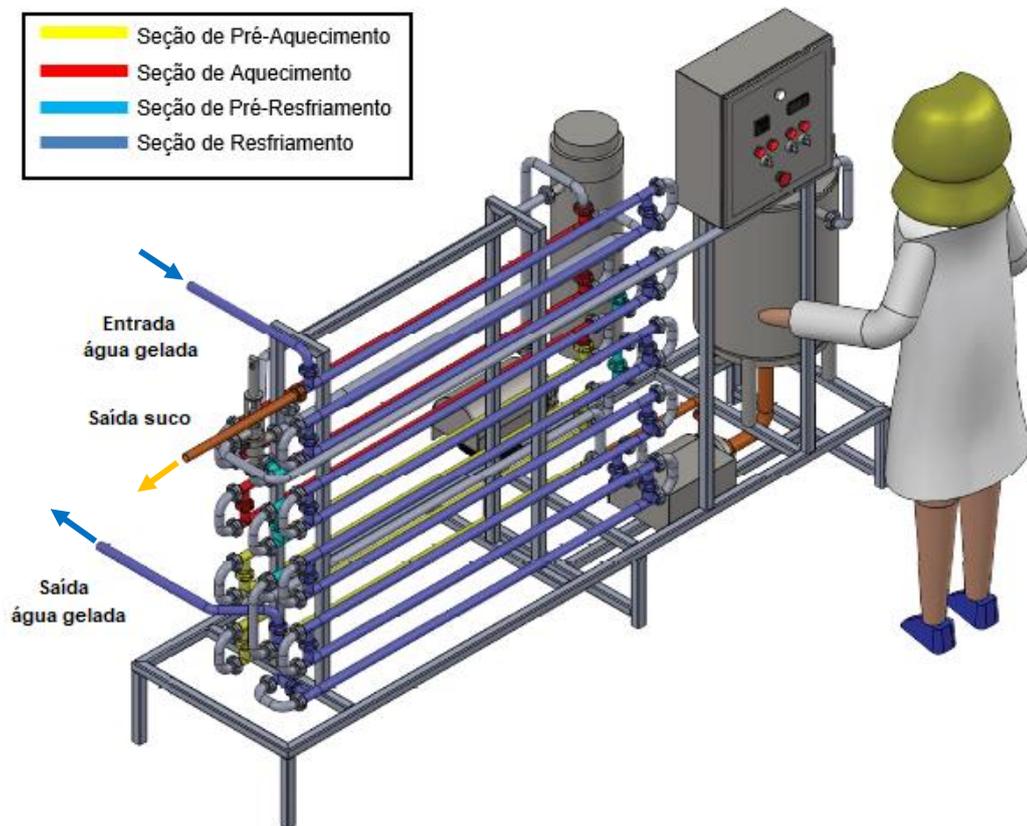
Como o modelo de pasteurizador tubular pretendido sempre teve o intuito de atender a uma pequena indústria, um dos parâmetros que foi levado em conta desde o início do dimensionamento foram as medidas finais esperadas para o equipamento.

Após a realização dos cálculos teóricos, as informações de comprimento obtidas foram levadas ao software SolidWorks para que fosse realizada a modelagem

do equipamento, afim de melhor entender a disposição final de seus componentes e dimensões gerais.

Todas as seções então foram subdivididas em módulos de tubos providos de conexões sanitárias nas extremidades para facilitar a montagem, manutenção e limpeza do trocador ao longo do tempo. Esses módulos foram dispostos sobre uma estrutura em aço inox, mantendo os padrões sanitários exigidos para serviços de alimentação. A configuração final do equipamento pode ser vista na Figura 17.

Figura 17 - Vista isométrica do pasteurizador tubular dimensionado.



Fonte: A autora, 2022.

Para efeito de comparação de tamanho, foi adicionada a representação de uma figura humana próxima ao equipamento, sendo possível assim visualizar de forma simplificada suas dimensões de tamanho reduzido, sendo 2,23m de comprimento, 0,58m de largura e 1,62m de altura.

4.3.1 Normas técnicas

Algumas normas foram levadas em conta durante o projeto do equipamento, principalmente com relação a serviços de alimentação e segurança de alimentos. Algumas delas são citadas abaixo:

- **NORMA BRASILEIRA ABNT NBR ISO 2200 DE 03/2019** – Sistemas de gestão de segurança de alimentos – Requisitos para qualquer organização na cadeia produtiva de alimentos.
- **NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 15635 DE 09/2015** – Serviços de alimentação – Requisitos de boas práticas higiênico-sanitárias e controles operacionais essenciais.
- **REPORTE TÉCNICO ABNT ISO/TR 17671-3 DE 02/2002** – Soldagem – Recomendações para a soldagem de materiais metálicos – Parte 3: Soldagem de arco em aço inoxidável.
- **NORMA REGULAMENTADORA Nº 12 DE 07/2019** – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal desse trabalho, foi o de projetar um pasteurizador de suco com trocador de calor bi tubular para uma indústria de pequeno porte, desenvolvendo junto a isso um sistema ou algoritmo que facilitasse a realização de todos os cálculos termodinâmicos de dimensionamento, para que fosse possível a utilização pela empresa para orçamentos futuros.

Todo o escopo inicial do dimensionamento foi levando em conta os equipamentos disponíveis no mercado para extração de suco, o que causou uma restrição na vazão de produto disponível para trabalho.

Por si só, o escoamento de fluidos em um pasteurizador tubular tende a se dar de forma laminar, o que reduz significativamente a taxa de transferência de calor do sistema. Esse empecilho foi contornado inicialmente com a redução da tubulação de circulação dos fluidos, para manter um fluxo de operação turbulento, trazendo maior eficiência para o processo como um todo. Simulações foram feitas com o fluxo laminar, onde foram obtidas áreas de transferência até 6x maiores do que as definidas no dimensionamento final.

Outra dificuldade ao longo do projeto se deu na aquisição de informações específicas em torno da reologia do suco de laranja in natura. Como o mercado brasileiro é muito diferente do mercado exterior, visto que nosso país prefere o consumo de suco in natura, enquanto os maiores consumidores mundiais de suco de laranja preferem quase que exclusivamente o suco de origem concentrada, diversos estudos se dão com a intenção de determinar as propriedades reológicas desse sub produto. Porém devido a sua alta concentração (toda a água do suco é removida através do sistema de evaporação), os dois fluidos possuem comportamentos totalmente diferentes, o que exigiu uma grande gama de considerações para que as equações fossem resolvidas.

Mesmo com alguns imprevistos, foi possível concluir o dimensionamento do equipamento, abrindo uma grande gama de possibilidades para novos estudos na mesma área, como estudos de vibração que ocorrem nas uniões de junção das seções tubulares, desenvolvimento de um dimensionamento para equipamento multitubular, estudos de esforços na estrutura, entre outros.

A criação do algoritmo em Microsoft Excel, também flexibilizou o estudo de configurações de trocadores através do método MLTD, trazendo diversas

possibilidades de usos futuros e aprimoramentos pela empresa, como o detalhamento de perdas de carga do sistema, coeficientes de incrustação, dimensionamento do sistema gerador de água quente, dimensionamento do sistema gerador de água gelada, entre outros.

Ademais, todas as informações coletadas durante o processo de desenvolvimento e projeto informacional desse trabalho foram de suma importância, agregando conhecimentos abrangentes nas áreas de engenharia de alimentos, engenharia química e engenharia mecânica.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 22000: Sistemas de gestão da segurança de alimentos - Requisitos para qualquer organização na cadeia produtiva de alimentos.** Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15635: Serviços de alimentação - Requisitos de boas práticas higiênico-sanitárias e controles operacionais essenciais.** Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO/TR 17671-3: Welding -- Recommendations for welding of metallic materials-- Part 3: Laser beam welding.** Rio de Janeiro, 2002.
- AMARAL, Daniel C. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos.** São Paulo: Saraiva, 2006.
- ARANA, Ignacio. (Ed.) **Physical properties of foods: novel measurement techniques and applications.** Florida: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2012. (Série Contemporary Food Engineering)
- BERK, Zeki. **Food process engineering and technology.** New York: Academic Press – Elsevier, 2009. (Série Food Science and Technology)
- BRASIL, 2019. Norma Regulamentadora NR-12, Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Ministério do Trabalho.
- BYLUND, Gösta.; **Dairy processing handbook.** Lund, Sweden: Tetra Pak Processing Systems AB, 1995.
- CHEN, Jianshe; ROSENTHAL, Andrew. **Modifying food texture, volume 1: novel ingredients and processing techniques.** New York: Academic Press - Elsevier, 2015.
- CHRISTIAN INITIATIVE ROMERO. **SQUEEZED – Behind the scenes of the juice industry.** Hersbruck: COS Druck & Verlag, 2018.
- CITRUSBR – Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos. **A indústria brasileira do suco de laranja. E-book.** São Paulo, 2010. Publicação Institucional. Disponível em: https://citrusbr.com/biblioteca/publicacoes-citrusbr/#dearflip-df_2359/3/. Acesso em maio de 2022.
- Peso dos tributos atinge indústria com maior intensidade. **CNI - Confederação Nacional da Indústria.** São Paulo, 27 de agosto de 2020. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/economia/peso-dos-tributos-atinge-industria-com-maior-intensidade/>. Acesso em março de 2021.
- CRIVELLARI, Gabriel P. **Modelagem e simulação dinâmica de pasteurizador tubular para processamento contínuo de fluido não-newtoniano.** 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Química / Otimização da pasteurização de alimentos líquidos) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo,

2010. Disponível em <http://sites.poli.usp.br/p/augusto.neiva/TCC/arquivos/1289474817.pdf>. Acesso em maio de 2022.

FELLOWS, P. **Food processing technology: principles and practice**. Segunda Edição. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2000.

FRANCESCHINI, Flávia. REINKE, Roberto. Processo térmico: Pasteurização. **ICTA - Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/alimentus1/feira/opconser/pasteuriza.htm>. Acesso em abril de 2021.

FUJIMORI, Nanci A. da S. **Dimensionamento do sistema de água gelada e vapor da área de utilidades de uma fábrica de sucos**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica / Fenômenos de transporte) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21741/3/DimensionamentoSistemaAgua.pdf>. Acesso em maio de 2022.

FUNCIA, Eduardo; FERRÃO, Everton S. P.; GUT, Jorge. A. W. **Modelagem e validação experimental da distribuição de temperatura em um pasteurizador tubular com associação de trocadores de calor**. In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2016. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2016. Disponível em: <https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2016/papers/modelagem-e-validacao-experimental-da-distribuicao-de-temperatura-em-um-pasteurizador-tubular-com-associacao-de-trocador>. Acesso em maio de 2022.

GIL, Antonio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. Quarta Edição. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, Marina S. **Estudo da pasteurização de suco de laranja utilizando ultrafiltração**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química / Pesquisa e desenvolvimento de processos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/12560/000630200.pdf>. Acesso em maio de 2022.

GUTIERREZ, Carola G. C. C. **Distribuição do tempo de residência em processo de pasteurização com trocador de calor a placas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-30052008-155723/publico/DISTRIBUICAO_DO_TEMPO_DE_RESIDENCIA_EM_PROCESSO_DE_PASTEURIZACAO_COM_TROCADOR_DE_CALOR_A_PLACAS.pdf. Acesso em maio de 2022.

HOLDSWORTH, S. Donald; SIMPSON, Ricardo. **Thermal processing of packaged foods**. Terceira Edição. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. (Série Food engineering).

IBARZ, A.; GONZALEZ, C.; ESPLUGAS, S. Rheology of clarified fruit juices. III: orange juices. **Journal of Food Engineering**. v. 21, n. 4, 1994, p. 485-494. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/026087749490068X>. Acesso em maio de 2022.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Sétima Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

JUNG, A.; FRYER, P.J. Optimising the quality of safe food: computational modelling of a continuous sterilisation process. **Chemical Engineering Science**. v. 54, n.6, 1999, p.717-730. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250998002784>. Acesso em maio de 2022.

MÁXIMO, Wellton. Arrecadação federal cai 6,91% em 2020. **Agência Brasil/EBC**. Brasília, 25 de janeiro de 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-01/arrecadacao-federal-cai-691-em-2020>. Acesso em abril de 2021.

NESPOLO, Cássia R. et al. **Práticas em tecnologia de alimentos**. Porto Alegre: Artmed, 2015.

SCHMIDELL, Willibaldo. (Coord.). **Biotecnologia industrial volume II – engenharia química**. São Paulo: Blucher, 2001.

SILVA, Filipa V. M.; GIBBS, Paul. Target selection in designing pasteurization processes for shelf-stable high-acid fruit products. v. 44, n. 5, 2004, p. 353-360. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408690490489251>. Acesso em maio de 2022.

STENSTRASSER, Alexandra M. **Projeto de trocador de calor a placas por meio de simulação computacional**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia de Alimentos) - Uninversidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188734/TCC.pdf>. Acesso em maio de 2022.

Beyond safety: Why we pasteurize fruit drinks. **TETRAPACK**. Disponível em: <https://www.tetrapak.com/solutions/processing/main-technology-area/heatingsolutions/why-we-pasteurize-fruit-drinks>. Acesso em abril de 2021.

TETRAPACK. **The Orange Book: A unique guide to orange juice production**. Tetra Pak International, 2017. Disponível em: <https://orangebook.tetrapak.com>. Acesso em abril de 2021 e maio de 2022.

TRIBESS, Tatiana B. **Estudo da cinética de inativação térmica da pectinesterase em suco de laranja natural minimamente processado**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-04052005-172452/publico/tatiana.tribess.pdf>. Acesso em maio de 2022.

APÊNDICE A – VISTAS ORTOGRÁFICAS DO EQUIPAMENTO

