



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

YASMIN NAOMI GUSHIKEN OKA

**DIMENSIONAMENTO DA PASTEURIZAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DE UM
CALDO DE CANA DESTINADO À PRODUÇÃO DE *FROZEN* DE CANA: UM
ESTUDO DE CASO.**

BURI, SÃO PAULO

2025

YASMIN NAOMI GUSHIKEN OKA

**DIMENSIONAMENTO DA PASTEURIZAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DE UM
CALDO DE CANA DESTINADO À PRODUÇÃO DE *FROZEN* DE CANA: UM
ESTUDO DE CASO.**

Trabalho de Conclusão de Curso ao Curso de Graduação em Engenharia de Alimentos do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme de Figueiredo Furtado
Coorientadora: Prof. Dra. Isabelle Cristina Oliveira Neves

BURI, SÃO PAULO

2025

Oka, Yasmin Naomi Gushiken

Dimensionamento da pasteurização para obtenção de um caldo de cana destinado à produção de frozen de cana: Um estudo de caso. / Yasmin Naomi Gushiken Oka -- 2025. 48f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Professor Dr. Guilherme de Figueiredo Furtado

Banca Examinadora: Professora Dra. Thaís Jordânia Silva, Professora Dra. Larissa Consoli

Bibliografia

1. Tratamento térmico. 2. Otimização de processos. 3. Trocador de calor a placas. I. Oka, Yasmin Naomi Gushiken. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

YASMIN NAOMI GUSHIKEN OKA

DIMENSIONAMENTO DA PASTEURIZAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DE UM CALDO DE CANA DESTINADO À PRODUÇÃO DE *FROZEN* DE CANA: UM ESTUDO DE CASO.


Trabalho de Conclusão de Curso ao Curso de Graduação em Engenharia de Alimentos do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientar: Prof. Dr. Guilherme de Figueiredo Furtado


Coorientadora: Prof. Dra. Isabelle Cristina Oliveira Neves

Aprovado em: 04/06/2025.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **GUILHERME DE FIGUEIREDO FURTADO**
Data: 04/06/2025 10:21:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Guilherme de Figueiredo Furtado (Orientador)
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Documento assinado digitalmente
 **LARISSA CONSOLI**
Data: 04/06/2025 10:48:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Larissa Consoli
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Documento assinado digitalmente
 **THAIS JORDANIA SILVA**
Data: 04/06/2025 12:55:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Thaís Jordânia Silva
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

AGRADECIMENTOS

“Somos constituídos por fragmentos de pessoas que cruzaram as nossas vidas”. Seja por sorte ou destino, sinto-me abençoada por percorrer a minha jornada ao lado de pessoas extraordinárias e inspiradoras, que moldaram quem me tornei.

Embora não tenha uma religião definida, acredito em vida após a morte. Com isso em mente, sempre senti o conforto e a proteção do meu pai, Juliano Oka. Em sua memória, agradeço por ter me ensinado a olhar o mundo com um pouco mais de otimismo – um ensinamento que me ajudou a superar muitos desafios ao longo da vida.

Em memória e gratidão para o meu “Oji” materno Mitsuo Gushiken, que esteve ao lado em cada passo da minha trajetória. Seu constante encorajamento para que eu jamais desistisse dos meus sonhos será para sempre uma fonte de inspiração.

A eles sinto saudades e amor que carrego no lado esquerdo do peito para toda a minha vida.

Agradeço a minha mãe Mari Gushiken: mulher forte! Sempre será a minha inspiração. Sem o seu apoio, parceria e amor incondicional, nada disso seria possível! Você é a minha base, força que me moldou e fortaleceu a pessoa que me tornei.

É verdade: avós e avôs são como nossos segundos pais. Agradeço a minha outra base: “Oji” e “Obá” paterno, Noboru Oka e Sônia Oka, e a “Obá” materna, Kimie Gushiken. Me ensinaram a ser humilde, gentil e a encontrar alegria em pequenas coisas.

Agradeço ao meu pequenino irmão, Enzo Yosuke. Que um dia a jornada da Naná possa nortear as escolhas e os caminhos que guiaram o seu destino.

Agradeço à minha segunda família “República Raparigas”, minha casa durante todos esses anos na Lagoa do Sino. Foi um prazer dividir um pouco da vida com vocês, Luany Yoshioka, Cinthia Milleny, Beatriz Mussolin, Letícia Watanabe e Laura Rachoni.

Agradeço aos mestres que orientaram cada projeto e desafio durante a graduação: professor Guilherme Furtado, professora Isabelle Neves e Larissa Consoli. Imensa gratidão por todo apoio e ensinamentos durante a Universidade.

Por fim, agradeço ao meu namorado, João Curvelo. A sua presença nesta caminhada me deu mais força e confiança, assim será o nosso próximo capítulo juntos!

RESUMO

OKA, Yasmin Naomi Gushiken. **DIMENSIONAMENTO DA PASTEURIZAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DE UM CALDO DE CANA DESTINADO À PRODUÇÃO DE *FROZEN* DE CANA: UM ESTUDO DE CASO.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, Buri (SP), 2024.

O caldo de cana, também conhecido como garapa, é uma bebida tradicionalmente consumida no Brasil, especialmente em feiras livres, sendo obtida a partir da extração do líquido da cana-de-açúcar. Com o objetivo de diversificar sua forma de consumo, uma *startup* idealizou a produção de *frozen* de cana, no qual o caldo recém-extraído é imediatamente congelado, com a finalidade de prolongar sua vida útil. No entanto, essa prática não assegura totalmente a qualidade e a segurança do produto, além de exigir a etapa de descongelamento antes de ser processado no equipamento produtor de *frozen*. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo dimensionar um pasteurizador a placas para a pasteurização do caldo de cana, como alternativa ao congelamento, visando estender a vida útil do caldo de cana, assegurando a qualidade microbiológica do produto e otimizando o processo produtivo. O estudo envolveu cálculos baseados em parâmetros termodinâmicos e propriedades físicas do produto, resultando em uma eficiência térmica entre 77% e 81%, valores compatíveis com a literatura técnica. Conclui-se que a adoção da pasteurização, associada ao uso de trocadores de calor a placas, representa uma alternativa promissora para o setor, tanto do ponto de vista tecnológico quanto econômico.

Palavras-chave: Tratamento térmico; Otimização de processos; Trocador de calor a placas; Eficiência.

ABSTRACT

OKA, Yasmin Naomi Gushiken. **DIMENSIONING OF PASTEURIZATION FOR THE PRODUCTION OF SUGARCANE JUICE INTENDED FOR FROZEN CANE: A CASE STUDY**. 2024. Final Course Work – Universidade Federal de São Carlos, Buri (SP), 2024.

Sugarcane juice, also known as "garapa," is a traditional beverage widely consumed in Brazil, especially at open-air markets, and is obtained by extracting the liquid from sugarcane stalks. Aiming to diversify its consumption, a startup developed the concept of frozen sugarcane juice, in which the freshly extracted juice is immediately frozen to extend its shelf life. However, this process does not fully ensure the product's quality and safety, and it requires thawing before being processed in the frozen beverage equipment. In this context, the present study aimed to evaluate the feasibility of applying pasteurization as an alternative to freezing, allowing shelf life extension, while maintaining microbiological safety and improving process efficiency. To achieve this, a fictional heat exchanger was designed and dimensioned for the pasteurization of raw sugarcane juice, using thermodynamic calculations and physical-chemical parameters. The proposed plate heat exchanger demonstrated thermal efficiencies ranging from 77% to 81%, values consistent with technical references. It is concluded that the adoption of pasteurization, supported by the use of plate heat exchangers, presents a promising alternative for the sugarcane juice processing industry, offering benefits in both food safety and operational cost reduction.

Keywords: Thermal treatment; Process Optimization; Plate heat exchanger; Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Binômio tempo e temperatura para a destruição de alguns microorganismos.....	23
Figura 2 - Esquema de um trocador de calor a placas.....	25
Figura 3 - Trocador de calor a placas vista de forma ampliada.....	25
Figura 4 - Possibilidade de escoamento em um trocador de calor a placas com 9 placas e 8 canais.	26
Figura 5 - Demonstração do escoamento concorrente e contracorrente de fluidos em um trocador de calor.	25
Figura 6 – Propriedades termofísicas dos principais componentes dos alimentos.....	29
Figura 7 – Principais dimensões de uma placa em um trocador de calor a placas.....	30
Figura 8 – Parâmetros de troca térmica para um trocador de calor a placas com padrão espinha de peixe.....	31
Figura 9 - Processo produtivo atual (A) e processo produtivo do projeto (B).	35
Figura 10 – Mecanismo de troca térmica do trocador de calor a placas	36
Figura 11 -Placas BERMO ®.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros químicos do caldo de cana.....	16
Tabela 2 - Parâmetro e indicadores da qualidade e valores recomendados para a cana-de-açúcar.....	16
Tabela 3 - Parâmetros de qualidade do caldo de cana.....	18
Tabela 4 - Padrões microbiológicos para alimentos, com exceção dos alimentos comercialmente estéreis para suco e outras bebidas submetidas a processos tecnológicos para redução microbiana, que necessitam de refrigeração... ..	18
Tabela 5 – Exemplos de binômios tempo/temperatura para pasteurização de alimentos.....	23
Tabela 6 - Parâmetros de pasteurização de caldo de cana em diferentes binômios tempo/temperatura, vida útil, condições de armazenagem, embalagem de envase e observações pontuadas.	26
Tabela 7 - Vazões empregadas para o projeto do trocador.....	37
Tabela 8 – Propriedades termofísicas do caldo de cana em cada seção do trocador.....	37
Tabela 9 - Propriedades termofísicas da água em cada seção do trocador.....	37
Tabela 10 – Dimensões da placa BP100M.....	38
Tabela 11 - Valores encontrados para $f'Ap$, Dh e As	39
Tabela 12 – Números adimensionais e coeficientes convectivos dos lados quente e frio de cada seção.....	39
Tabela 13 - Configurações estabelecidas para as seções do trocador de calor.....	40
Tabela 14 - Coeficientes globais “limpo” (UL) e “sujo” (US).....	40
Tabela 15 – Valores de potencial de transferência térmica médio em fluxo contracorrente... ..	41
Tabela 16 – Valores de carga térmica do projeto.	41
Tabela 17 – Área de transferência térmica do projeto.....	41
Tabela 18 – Eficiência de cada seção do trocador de calor a placas.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	15
3.1 A CANA-DE-AÇÚCAR.....	15
3.2 CARACTERÍSTICAS DO MERCADO	17
3.3 LEGISLAÇÃO DO CALDO DE CANA	17
3.4 DESAFIOS HIGIÊNICOS-SANITÁRIOS NA COMERCIALIZAÇÃO DO CALDO DE CANA.....	19
3.5 TECNOLOGIAS DE CONSERVAÇÃO EMPREGADAS NO CALDO DE CANAS.....	20
3.5.1 PASTEURIZAÇÃO	20
3.5.2 IRRADIAÇÃO IONIZANTE COMBINADA COM TRATAMENTO TÉRMICO.....	21
3.5.3 ENVASE ASSÉPTICO.....	21
3.5.4 ACIDIFICAÇÃO.....	21
3.5.5 ULTRAFILTRAÇÃO	22
3.6 TRATAMENTO TÉRMICO: PASTEURIZAÇÃO	22
3.7 TROCADOR DE CALOR A PLACAS.....	24
3.8 PASTEURIZAÇÃO EMPREGADA NO CALDO DE CANA.....	26
4. METODOLOGIA	28
4.1 CÁLCULOS PARA DIMENSIONAMENTO	28
4.1.1 DETERMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO CALDO DE CANA.....	28
4.1.2 ESCOLHA DO MODELO DA PLACA TÉRMICA.....	29
4.1.3 NÚMEROS ADMENSSIONAIS E COEFICIENTE CONVECTIVO INDIVIDUAL	30
4.1.4 CONFIGURAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR (CANAS X PASSES)	31
4.1.5 COEFICIENTES GLOBAIS DE TROCA TÉRMICA.....	32
4.1.6 POTENCIAL DE TRANFERÊNCIA TÉRMICA	33
4.1.7 CARGA TÉRMICA	33

4.1.8 A ÁREA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE UM TROCADOR DE CALOR A PLACAS	34
4.1.9 EFICIÊNCIA DO PROJETO	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1 OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS	35
5.2 RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTOS PARA A PASTEURIZAÇÃO DO CALDO DE CANA.....	36
5.2.1 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO CALDO DE CANA	37
5.2.2 MODELO DA PLACA.....	38
5.2.3 INTERPRETAÇÃO DOS NÚMEROS ADMENSIONAIS E COEFICIENTE CONVECTIVO INDIVIDUAL.....	39
5.2.4 MENSURAÇÃO DA QUANTIDADE DE CANAIS E PASSES	40
5.2.5 COEFICIENTES GLOBAIS DE TROCA TÉRMICA PROJETADA	40
5.2.6 POTENCIAL DE TRANFERÊNCIA TÉRMICA	40
5.2.7 CARGA TÉRMICA PROJETADA	41
5.2.8 ÁREA DE TRANSFERÊNCIA TÉRMICA PROJETADA	41
5.2.9 EFICIÊNCIA ENCONTRADA.....	41
5.3 ENVASE ASSÉPTICO E EMBALAGEM	42
6. CONCLUSÃO	44
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

Em 1753, o botânico Linnaeus classificou a cana-de-açúcar, da família das gramíneas, como pertencente ao gênero *Saccharum*. A planta é originária da Indonésia, uma região de clima tropical predominante. Sendo assim, com suas condições ideais de clima e solo, o Brasil se destaca como o maior produtor mundial da cana-de-açúcar, alcançando uma produção recorde de 713,2 milhões de toneladas na safra 2023/2024 (Costa *et al*, 2021; CONAB, 2024).

Considerado um pilar econômico no Brasil, o cultivo da cana-de-açúcar consolidou-se como uma das atividades agrícolas mais importantes desde o período colonial. Atualmente, o país lidera o mercado mundial de açúcar, com uma produção estimada de 45,9 milhões de toneladas para a safra 2025/26. Um aumento de 4% em relação à safra anterior, e também o maior registro histórico na CONAB, justificada pelo cenário favorável do produto com a baixa oferta por parte dos importantes países exportadores (CONAB, 2025).

No setor de etanol, a produtividade brasileira fica atrás apenas dos Estados Unidos, com uma produção total estimada em 35,61 bilhões de litros, incluindo a parcela do etanol derivada do milho. Essa matéria-prima tem recebido crescente destaque no mercado de biocombustíveis, reforçando a diversificação e o potencial de expansão da matriz energética nacional (União Nacional da Bioenergia, 2024).

Além disso, a cana-de-açúcar permite aproveitamento na alimentação humana (como em rapaduras, caldo de cana e aguardente), na nutrição animal, na fertilização do solo e na geração de energia por meio de biomassa e combustível para as caldeiras. Com o apoio da ciência e da tecnologia, pesquisas avançam no desenvolvimento de embalagens biodegradáveis e no melhoramento genético da cana, criando variedades mais produtivas e adaptadas a diferentes condições climáticas, fortalecendo a sustentabilidade e a competitividade da indústria sucroenergética brasileira (Embrapa, 2022).

A versatilidade da matéria-prima vai muito além do grande mercado de açúcar e álcool ou de outros grandes derivados. Ela também impulsiona a vida dos pequenos empreendedores com a venda da “garapa” (caldo de cana), uma bebida açucarada e comum em “feiras livres”, conhecida por ser energética e rica em carboidratos, minerais e vitaminas (Costa *et al*, 2021).

A fim de oferecer uma experiência diferente da tradicional “garapa”, uma família comerciante de caldo de cana propôs um novo formato de consumo com aberturas de lojas na capital de São Paulo. A *startup* oferece o “*frozen de cana*”, um produto totalmente natural do caldo de cana, produzida com o auxílio de um equipamento produtor de shake, que realizar misturas com polpas de frutas naturais e/ou bebidas alcoólicas, chamam atenção do consumidor.

O caldo é extraído e filtrado em uma pequena fábrica, passando por uma etapa de congelamento para aumentar sua vida útil, e posteriormente direcionados para os pontos de vendas no centro da cidade. Entretanto, não é suficiente para garantir a qualidade e segurança de consumo do produto.

Segundo Barub (2023), o caldo é altamente perecível, com fatores como condições higiênico-sanitárias de sua obtenção, concentração de açúcar, atividade de água e pH, que influenciam sua durabilidade. Além disso, a conservação inadequada pode interferir na sua qualidade, devido a fatores químicos (oxigênio), físicos (luz, calor), bioquímicos (enzimas) e microbiológicos. Sendo assim, os estudos sobre tecnologias de preservação têm avançado para prolongar sua vida útil.

Uma das tecnologias existentes é a pasteurização do caldo de cana puro combinado com o envase asséptico, pode resultar em um prolongamento de até 30 dias da sua vida útil. Em alguns estudos apontam que a aplicação destas etapas também pode permitir o armazenamento em temperatura ambiente ou em condições refrigeradas, preservando os aspectos físico-químicos, microbiológicos e sensoriais dentro dos limites estabelecidas pela legislação (Barub, 2023).

Desta maneira, este trabalho visou realizar o dimensionamento de um tratamento térmico como método de conservação do caldo de cana para uma empresa produtora de “*frozen de cana*”. A viabilidade da aplicação da pasteurização combinada com o envase asséptico, dimensionamento do trocador de calor, bem como a escolha da embalagem correta para o seu envase foram abordados para oferecer soluções seguras e de qualidade, que atendam as normas e legislações específicas para este produto.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a aplicação do processo de pasteurização utilizando trocadores de calor a placas no processamento de caldo de cana. A proposta visa otimizar o processo produtivo e assegurar a qualidade e a segurança do produto em uma indústria produtora de *frozen* de cana, que atualmente adota apenas a etapa de congelamento do caldo.

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Dimensionar a área teórica do trocador de calor a placas (projetada), bem como outras variáveis para o processo de pasteurização do caldo de cana;
- Estabelecer parâmetros técnicos para o envase asséptico baseados nas referências bibliográficas;
- Propor melhorias no processo produtivo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma gramínea originária do sudoeste asiático, com evidências de cultivo desde a pré-história. Hoje, essa planta é cultivada comercialmente em mais de 70 países, com o Brasil, a Índia e a China sendo os maiores produtores mundiais. O início da indústria açucareira no Brasil teve seu início no século XIV, durante o período colonial, com a produção canavieira em larga escala. Atualmente, o Brasil lidera a produção mundial, destacando-se não apenas na produção de açúcar, mas também como um dos maiores produtores de etanol (Conab 2024; União Nacional da Bioenergia, 2024).

A vantagem produtiva do Brasil deve-se à qualidade do solo e ao clima tropical favorável (úmido e quente), com temperaturas entre 19 °C e 32 °C. A planta prospera em solos profundos e bem aerados, que favorecem o desenvolvimento das raízes e a produção de sacarose. A cana possui folhas longas e finas e uma haste robusta (colmo), onde se concentram seus açúcares (Santos, *et al.*, 2020; Embrapa, 2022).

O ciclo de vida da cana-de-açúcar, do crescimento vegetativo até a maturação, reflete diretamente na qualidade do produto. A planta começa seu ciclo de crescimento nas estações chuvosas, quando absorve nutrientes e cresce de tamanho. Durante a fase de maturação, entre maio e outubro, a planta acumula sacarose nos colmos, o que é crucial para a produção de açúcar e outros derivados. Essa fase é fortemente influenciada por fatores climáticos, como a temperatura e a disponibilidade de água, que afetam diretamente o teor de sacarose, a eficiência da extração e, conseqüentemente, a qualidade do produto (Embrapa, 2022).

No que diz respeito à composição química (Tabela 1), o caldo extraído da cana é composto por 65% a 75% de água e entre 3% a 5% de minerais, incluindo ferro, cálcio, potássio, sódio, fósforo, magnésio, além de vitaminas do complexo B e C. Em relação aos sólidos solúveis, mais de 70% são de sacarose, com teores de glicose e frutose variando entre 2% a 4%, além de pequenas quantidades de proteínas (0,6%) e amido (0,05%). A concentração de ácidos graxos oscila entre 0,05% e 0,015%, enquanto os pigmentos variam entre 3% e 5% (Santos, *et al.*, 2020).

A composição química do caldo de cana pode sofrer alterações de acordo com o pH, que influencia a atividade de microrganismos extrínsecos que consomem o açúcar e liberam gás carbônico, além de ser afetada por mudanças bruscas de temperatura (Santos, *et al.*, 2020).

Tabela 1: Parâmetros químicos do caldo de cana.

Parâmetros	Valores médios
pH	5,43
Acidez (mg ácido cítrico/100mL)	0,0024
Água (g/100 mL)	79,47
Sólidos totais (g/100 mL)	21,54
Carboidratos (g/100 mL)	19,95
Proteínas (g/100 mL)	0,26
Vitamina C (g/100 mL)	5,64
Inorgânicos (cinzas, sílica, K, P, Ca, Mg, Na, S, Al, Cl) (g/100 mL)	0,33

Fonte: Santos *et al.*, 2020 (Adaptado)

Os parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar (Tabela 2) incluem a porcentagem em massa de sacarose aparente (POL), o teor de sólidos solúveis (°Brix) e os açúcares redutores, principalmente glicose e frutose. À medida que a planta amadurece, os valores de teor de sólidos solúveis e POL aumentam, enquanto a concentração de açúcares redutores diminui (Santos *et al.*, 2020).

A pureza da cana-de-açúcar é medida pela relação POL/Teor de sólidos solúveis (TSS) em porcentagem, sendo que, quanto maior a pureza, melhor a qualidade para a recuperação do açúcar. Fatores como açúcares redutores, polissacarídeos e proteínas interferem na POL. A quantidade de açúcares redutores totais (ATR), que varia entre 13% e 17,5%, impacta a pureza da cana e a eficiência da recuperação da sacarose pela fábrica (Ripoli, 2004; Santos *et al.*, 2020).

O teor de fibra na cana também afeta a qualidade do caldo e a eficiência da extração. A cana com baixo teor de fibra é mais suscetível a danos por pragas e microrganismos, resultando em perda de sacarose. Durante a deterioração, 93% das perdas são causadas por microrganismos. Por outro lado, a fibra excessiva diminui a eficiência da moenda, enquanto a fibra baixa pode causar danos durante o corte e transporte, afetando a indústria. Por fim, as fibras obtidas durante a extração do caldo de cana são queimadas na caldeira para geração de energia para a própria fábrica. O açúcar obtido da cana é um ingrediente essencial em bebidas que exigem alto padrão de qualidade em cor, teor de cinzas, sulfito e turbidez (Santos *et al.*, 2020).

Tabela 2: Parâmetros indicadores da qualidade para a cana-de-açúcar.

Parâmetros Indicadores	Valores recomendados (%)
POL	>14

Pureza (POL/TSS)	>85
Açúcares Redutores Totais (sacarose, glicose, frutose)	>15
AR (glicose, frutose)	<0,8
Fibra	11-13

Fonte: Ripoli, 2004; Santos *et al.*, 2020. (Adaptado)

3.2 CARACTERÍSTICAS DO MERCADO

Os dados da produção brasileira da cana-de-açúcar na safra 2024/25 é de 676,96 milhões de toneladas, o que representa a segunda maior produção já registrada, ficando para trás apenas do ciclo 2023/24. Essa comparação indica uma redução de 4,8% em relação ao ciclo anterior. De acordo a Companhia Nacional de Abastecimento o desempenho das lavouras foi impactado com o baixo índice pluviométrico combinado com às altas temperaturas registradas na região Centro-Oeste, o que contribuiu para a queda na produtividade prevista para a próxima safra (CONAB, 2024; CONAB, 2025).

Além de seu papel tradicional na produção de açúcar e etanol, a cana-de-açúcar tem se mostrado uma matéria-prima versátil, com crescente interesse da indústria da bebida. O aumento do setor tem impulsionado a diversificação de produtos e as formas de consumo. As misturas de frutas na preparação de bebidas, como sucos, além da cachaça obtida pela destilação do caldo de cana fermentado, oferecem várias vantagens, como a combinação de componentes nutricionais e a estabilidade microbiológica do produto (Sanda, 2016).

Além disso, devido à sua grande aceitação popular e facilidade de exploração, o caldo de cana tem potencial para alcançar um mercado consumidor ainda maior. O produto, processado e embalado pronto para o consumo, pode ser comercializado em lanchonetes, restaurantes, cadeias de *fast food*, feiras, parques e *shoppings*, onde a demanda por produtos naturais, saudáveis e com apreciadas características sensoriais está em constante crescimento, superando a venda no comércio de rua (Sanda, 2016).

3.3 LEGISLAÇÃO DO CALDO DE CANA

Prati e Camargo (2008) descrevem o caldo de cana como um líquido viscoso de coloração que pode variar do pardo ao verde escuro, e que apresenta uma composição complexa e heterogênea. Fatores como a variedade da cana, seu estágio de maturação, condições do solo, clima e o manejo da cultura influenciam diretamente a concentração de açúcares, ácidos, minerais e outros componentes presentes no caldo.

De acordo com o § 7º, do art. 18 do Decreto nº 6.871 de 2009:

Art. 18. Suco ou sumo é a bebida não fermentada, não concentrada, ressalvados os casos a seguir especificados, e não diluída, destinada ao consumo, obtida da fruta madura e sã, ou parte do vegetal de origem, por processamento tecnológico adequado, submetida a tratamento que assegure a sua apresentação e conservação até o momento do consumo (Brasil, 2009).

Dessa maneira, de acordo com a Instrução Normativa, IN nº 37, de 01 de outubro de 2018, o suco obtido da parte comestível da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) deve respeitar os parâmetros de qualidade necessárias para o seu suco, conforme apresentado na Tabela 3 (Brasil, 2018).

Tabela 3: Parâmetros de qualidade do caldo de cana.

Parâmetros	Valores Mínimos
Sólidos solúveis em °Brix, a 20 °C	14
pH	5,5
Acidez total expressa em ácido cítrico (g/100g)	0,05

Fonte: Brasil, 2018.

Além dos parâmetros de qualidade do caldo, a segurança dos sucos, em geral, é rigorosamente regulamentada, para assegurar a saúde dos consumidores. A Instrução Normativa nº 161, de 01 de julho de 2022 estabelece os parâmetros microbiológicos que esses produtos devem atender, detalhados na Tabela 4 (Brasil, 2022).

Tabela 4: Padrões microbiológicos para alimentos, com exceção dos alimentos comercialmente estéreis para suco e outras bebidas submetidas a processos tecnológicos para redução microbiana, que necessitam de refrigeração.

Microrganismo	n	c	m	M
<i>Samonella</i> / 25 mL	5	0	Aus	-
<i>Enterobacteriaceae</i> / mL	5	2	10	10 ²
Bolores e leveduras/ mL	5	2	10	10 ²

n – número de unidades a serem amostradas aleatoriamente de um mesmo lote e analisadas individualmente; c – número máximo aceitável de unidades de amostras com contagens entre os limites de m e M (planos de três classes); m – limite que, em um plano de três classes, separa o lote aceitável do produto ou lote com qualidade intermediária aceitável; M – limite que, em plano de duas classes, separa o produto aceitável do inaceitável. Em um plano de três classes, M separa o lote com qualidade intermediária aceitável do lote inaceitável. Valores acima de M são inaceitáveis. Fonte: Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. Instrução Normativa – IN nº 161, de 01 de julho de 2022.

3.4 DESAFIOS HIGIÊNICO-SANITÁRIOS NA COMERCIALIZAÇÃO DO CALDO DE CANA

Embora o Brasil seja o líder mundial na produção de cana-de-açúcar, o consumo do caldo de cana ou garapa ainda é pouco explorada pela indústria, devido à cultura em ser encontrada em feiras livres e ser tradicionalmente consumida logo após a extração devido à sua rápida degradação (Spiller, 2023).

As feiras livres desempenham um papel importante na economia, tanto para os feirantes, que frequentemente dependem delas como principal fonte de renda, quanto para os consumidores, que encontram produtos a preços acessíveis e têm a oportunidade de resgatar tradições culturais e comunitárias. No entanto, a manipulação de alimentos nessas feiras, como o caldo de cana, é uma questão que requer atenção. A prática, se realizada de forma inadequada pode levar à contaminação do produto, colocando em risco a saúde dos consumidores devido à falta de controle sobre as condições de higiene e armazenamento (Gonçalves et al, 2019).

O caldo de cana pode abrigar uma variedade de microrganismos, incluindo bactérias e fungos. Entre as bactérias mais comuns estão *Staphylococcus* sp., *Salmonella* sp. e coliformes totais e termotolerantes. Existem estudos que apontam um cenário alarmante com relação à presença desses microrganismos na bebida (Marinho et al., 2019).

Em uma análise de 20 amostras de caldo de cana comercializado no município de Cacoal, em Rondônia, verificou-se que 100% das amostras apresentaram valores de coliformes termotolerantes a 45 °C superiores a 1100 NMP/mL, ultrapassando os limites estabelecidos pela Resolução nº 12, de 02 de janeiro de 2001, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), legislação vigente da época do estudo (Brasil, 2001; Marinho et al., 2019).

Outro estudo de campo reforça essa problemática ao analisar produtos comercializados em feiras livres, incluindo o caldo de cana. A avaliação microbiológica identificou a presença de *Salmonella* sp. e de coliformes termotolerantes em concentração de 2,1 NMP/g, acima dos limites permitidos pela legislação. Também foi detectada uma contagem de 6,1 UFC/g de *Staphylococcus coagulase*, ainda dentro dos níveis toleráveis (Brasil, 2001; Gonçalves et al., 2019).

Segundo avaliação higiênico-sanitária realizada pelo grupo de pesquisa de Gonçalves (2019), foram reveladas práticas inadequadas entre os vendedores: 100% deles não usavam proteção para os cabelos ou luvas, 80% utilizavam adornos, e 90% manipulavam o caldo e o dinheiro simultaneamente, além de raramente se preocuparem em lavar as mãos (100%). Observou-se também que 85% dos carrinhos estavam em condições precárias de conservação,

e os resíduos de bagaço eram frequentemente descartados no chão próximo ao local de preparo, facilitando o surgimento de pragas. Os resultados obtidos neste estudo reforçam a importância de disseminar os conhecimentos científicos sobre a qualidade do caldo de cana para diferentes públicos, incluindo produtores, comerciantes, consumidores e órgãos reguladores.

Além dos impactos microbiológicos, a aparência escura do caldo de cana, que surge alguns minutos após a extração, influencia negativamente os aspectos sensoriais e pode afetar a aceitação do produto. A bebida contém compostos que determinam sua coloração, como a clorofila e os compostos fenólicos. Esse escurecimento resulta principalmente de reações enzimáticas das enzimas polifenoloxidase e peroxidase. Para melhorar a percepção sensorial do produto, é comum adicionar suco de frutas cítricas como, por exemplo, do limão ou abacaxi. Essa mistura não só proporciona um sabor agradável, mas também altera a relação entre o teor de sólidos solúveis e acidez da bebida (Sanda *et al.*, 2016).

3.5 TECNOLOGIAS DE CONSERVAÇÃO EMPREGADAS NO CALDO DE CANA

A crescente demanda dos consumidores por alimentos mais saudáveis, isentos de conservantes e que preservem os benefícios nutricionais do produto *in natura* tem impulsionado o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias de conservação de alimentos. Para atender a essa demanda, frequentemente são propostas combinações de métodos de conservação, visando minimizar os impactos sobre as características organolépticas naturais dos alimentos, além de assegurar a segurança e a estabilidade dos produtos. Abaixo são apresentadas tecnologias de conservação do caldo de cana que possibilitam a comercialização e estocagem do produto por períodos mais longos.

3.5.1 PASTEURIZAÇÃO

A aplicação de tratamentos térmicos em alimentos é amplamente utilizada, com atenção especial à termossensibilidade do produto para evitar deterioração e garantir uma vida útil adequada nas prateleiras. É essencial definir o microrganismo alvo e/ou a inativação enzimática necessária para assegurar a segurança do processo. Entre os tratamentos mais explorados está a pasteurização, que, para ser realizada de forma eficaz, exige o conhecimento das características da matriz alimentar, como sua composição, propriedades físico-químicas e, principalmente, o pH. Por se tratar de uma tecnologia menos agressiva, a pasteurização costuma ser combinada com outros métodos de conservação, como a refrigeração, envase asséptico ou adição de aditivos para aumentar a durabilidade do produto (Andrade, 2014).

Por ser parte do tema deste projeto, o processo de pasteurização será discutido de forma mais aprofundada no tópico 3.6.

3.5.2 IRRADIAÇÃO IONIZANTE COMBINADA COM TRATAMENTO TÉRMICO

De acordo com o estudo realizado por Oliveira, Spoto, Cannintti-Brazaca, Sousa e Gallo (2007), a radiação gama é uma tecnologia que utiliza ondas de alta energia para inativar microrganismos e enzimas sem alterar significativamente o sabor e o aroma dos alimentos. Este estudo avaliou o caldo de cana, puro e com adição de suco de limão ou abacaxi, submetido a tratamento térmico (70 °C/25 minutos) e/ou radiação gama (2,5 kGy) em garrafas de polietileno. Os resultados mostraram que a radiação gama, especialmente quando combinada com o calor, reduziu a contaminação microbiana e a atividade da polifenoloxidase, mantendo a qualidade sensorial da amostra.

3.5.3 ENVASE ASSÉPTICO

O envase asséptico é uma tecnologia usada para embalagens de alimentos fluidos, onde o alimento processado é acondicionado em uma embalagem previamente esterilizada em condições assépticas, prolongando sua vida útil. Há meios que envolvem imersão da embalagem em soluções diluídas de sanitizantes como hipoclorito de sódio ou ácido peracético por exemplo, ou combinando o calor com pressão utilizados em autoclaves (Silva, 2020).

Em um estudo de Silva e Faria (2006), comparou-se o caldo de cana envasado em garrafas de vidro tanto a quente quanto por envase asséptico. Avaliado em temperatura ambiente, o caldo envasado de forma asséptica durou até 30 dias, enquanto com a aplicação de um tratamento térmico a 110 °C/ 10s com o envase asséptico estendeu sua vida útil para 60 dias.

A utilização de garrafas plásticas para acondicionamento de produtos é bastante comum, oferecendo vantagens em relação a outros materiais, como menor peso, custo reduzido, maior resistência à quebra, facilidade no transporte e descarte simples. No caso do envase asséptico do caldo de cana, as garrafas de polietileno tereftalato (PET) mostram-se uma opção viável, para garantir um envase adequado da bebida e bons resultados em termos de qualidade e vida útil do produto (Andrade, 2014).

3.5.4 ACIDIFICAÇÃO

A acidificação reduz o pH do caldo de cana, restringindo o crescimento microbiano e inibindo o escurecimento enzimático, o que permite o uso de temperaturas mais brandas no

tratamento térmico. Estudos mostram que a adição de suco de frutas ácidas ou ácido orgânico é uma prática comum para prolongar a vida útil deste produto. Em uma pesquisa, a adição de 3 mL de suco de limão a cada 100 mL de caldo de cana reduziu o pH para 3,01, o que combinado com a pasteurização com binômio temperatura de 90°C a 40 s, estendeu a conservação do produto para até 60 dias (Andrade, 2014).

3.5.6 ULTRAFILTRAÇÃO

A ultrafiltração é uma técnica de separação por membrana utilizada na indústria de alimentos para reter compostos como proteína, bactérias, esporos e glóbulos de gordura, permitindo a passagem de sais e pequenas moléculas. Com membranas de poros entre 0,01 e 0,1 μm e operando sob pressões moderadas, essa tecnologia é aplicada no processamento de sucos e extratos, promovendo a clarificação do produto sem necessidade de adição de agentes químicos ou aquecimento (Madrona et al, 2021; Tetra Pak, 2025).

Entre suas principais vantagens estão a preservação das propriedades sensoriais e nutricionais e o baixo consumo energético. No entanto, a formação de incrustações na membrana pode reduzir a eficiência do processo ao longo do tempo. Para contornar essa limitação, estudos têm demonstrado que a aplicação de ultrassom durante a filtração contribui para a remoção de depósitos da superfície da membrana, melhorando o desempenho do sistema e a estabilidade operacional (Madrona et al, 2021).

3.6 TRATAMENTO TÉRMICO: PASTEURIZAÇÃO

Desenvolvida pelo cientista francês Louis Pasteur no século XIX, a pasteurização é uma tecnologia fundamental para a conservação de alimentos. Diferente da esterilização, que é um processo térmico mais intenso, a pasteurização é de baixa intensidade, empregando temperaturas abaixo de 100 °C que exercem mudanças mais brandas sobre as propriedades organolépticas dos alimentos, como sabor e textura. Para garantir a segurança do alimento, esse método é muitas vezes combinado com outras formas de conservação (Maia, 2012; Rahman, 2007).

O processo utiliza um binômio tempo-temperatura com o objetivo de inativar enzimas e destruir microrganismos em seu estado vegetativo, mantendo as características sensoriais do alimento. A eficácia do tratamento térmico depende do pH do alimento, de forma que em alimentos de pH baixo ($\text{pH} < 4,5$), o foco é a inativação de enzimas e a destruição de microrganismos deteriorantes, enquanto em produtos com pH mais elevado ($\text{pH} \geq 4,5$), o alvo principal são os microrganismos patogênicos (Rahman, 2007).

Condições típicas para a pasteurização de diversos alimentos estão resumidas na Tabela 5, que ilustra como diferentes combinações de temperatura e tempo são usadas para atender às exigências de segurança e qualidade de produtos alimentícios.

Tabela 5: Exemplos de binômios tempo/temperatura para a pasteurizações de alimentos.

Alimento	Finalidade principal	Condições mínimas para o processo
pH < 4,5		
Suco de Fruta	Inativação de enzimas (pectinesterase e poligalacturonase), leveduras e fungos; destruição dos microrganismos deteriorativos.	65 °C/30 min; 77 °C/1 min; 88 °C/ 15 seg
Cerveja	Destruição dos microrganismos deteriorativos (espécies de <i>Lactobacillus</i> e <i>Saccharomyces</i> , leveduras selvagens e residuais)	65 °C – 68 °C/ 20 min (em garrafa); 72 °C – 75°C/ 1 – 4 min a 950 kPa
pH > 4,5		
Leite	Destruição de patógenos <i>Brucella abortus</i> , <i>Mycobacterium tuberculosis</i> , <i>Coxiella burnetti</i> e enzimas.	63 °C/ 30 min; 71 °C/ 15 seg
Ovos batidos	Destruição do patógeno <i>Salmonella seftenburg</i> .	64 °C/ 2,5 min; 60 °C/ 3,5 min
Sorvetes	Destruição dos microrganismos deteriorativos.	65 °C/ 30 min; 71 °C/ 10 min; 80 °C/ 15 seg.

Fonte: Rahman, 2007.

Embora a pasteurização preserve muitos nutrientes, algumas perdas podem ocorrer devido ao calor, especialmente de compostos sensíveis como a vitamina C. Em sucos, recomenda-se usar temperaturas entre 60 °C e 90 °C para minimizar esses efeitos e preservar compostos bioativos, como os carotenoides e fenóis (Celestino *et al.*, 2018).

De acordo com a Instrução Normativa nº 37, de 01 de outubro de 2018 que regulam os padrões de identidade e qualidade de sucos e polpas, não é exigida a aplicação da pasteurização no processo produtivo. Apesar da pasteurização não ser obrigatória em alguns produtos, indústrias frequentemente a adotam para garantir a segurança e atender às expectativas de qualidade dos consumidores (Brasil, 2018; Celestino *et al.*, 2018; Rahman, 2007).

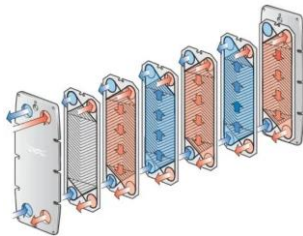
Há dois métodos de pasteurização, conhecidos como “rápida” – HTST (High Temperature Short Time) e “lenta” – LTLT (Low Temperature Long Time). A pasteurização lenta do leite e derivados, por exemplo, é realizada a 65 °C por 30 minutos, utilizando tanques

com agitação para garantir uma distribuição uniforme do calor. Já a pasteurização rápida ocorre em temperaturas entre 72 °C a 75 °C, por 15 a 20 segundos, e é amplamente usada em grandes volumes de leite e outros alimentos, como sucos e polpas de frutas, aquecidos por vapor de água em trocadores de calor de tubos ou placas (Costa, 2012).

3.7 TROCADOR DE CALOR A PLACAS

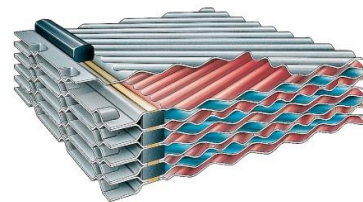
O trocador de calor de placas é um equipamento essencial no processamento de alimentos líquidos. Em suma, não são indicados para alimentos com fibras ou partículas, que podem causar entupimentos, nem para líquidos muito viscosos, devido à distribuição inadequada e elevada perda de carga. Seu uso também é limitado para gases, exceto vapor d'água (Tadini, 2018). Ele é composto por um conjunto de finas placas metálicas que criam canais alternados para o fluxo dos líquidos quente e frio (Figura 1). Esses canais permitem o intercâmbio de calor entre os dois fluidos, sem que haja mistura entre eles, graças ao sistema de vedação que garante a separação e evita a contaminação. Em sua maioria, as placas são corrugadas e com ranhuras, a fim de melhorar a eficiência de troca térmica como é apresentado na Figura 2 (Tadini, 2018).

Figura 1: Esquema de um trocador de calor a placas.



Fonte: Alfalaval, 2024

Figura 2: Trocador de calor a placas visto de forma ampliada.



Fonte: Alfa Engenharia, 2024.

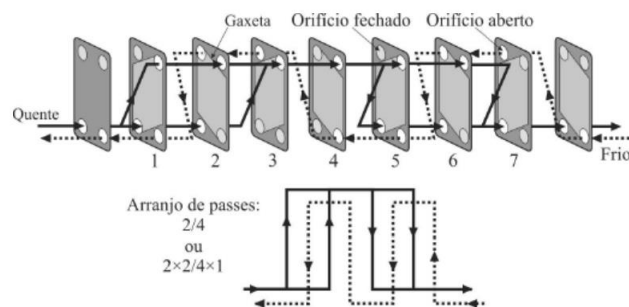
O dinamismo do trocador de calor a placas permite uma grande variedade de arranjos de escoamento. A quantidade de canais (espaço entre as placas em que os fluidos quente/frio escoam alternativamente) permite manipular a velocidade de seu escoamento a cada passe (trajeto que o fluido percorre ao longo dos canais) (Tadini, 2018).

Na Figura 3, é possível exemplificar um trocador de calor a placas que é representado como 2 x 2/4 x 1. Este apresenta-se como um trocador de calor com 9 placas, entretanto as placas que estão dispostas nas extremidades não realizam a troca térmica e, portanto, há apenas 7 placas térmicas ($N_{pl} = 7$) com 8 canais, 4 para cada fluido. Sendo o canal a quantidade de

vezes que o fluido passa de uma placa para a outra, e passe a quantidade que o fluido troca de calor com o outro.

O fluido frio realiza um passe a cada canal, totalizando 4 passes ($N_p=4$; $N_c/N_p=1$). Por sua vez, o fluido quente realiza 2 passes a cada canal, totalizando 2 passes ($N_p=2$; $N_c/N_p=2$). Nesse contexto, o N_{pl} representa o número de placas térmicas, N_c a quantidade total de canais e o N_p a quantidade de passes realizadas. O N_c/N_p representa a razão de canais por passe sendo que, quanto maior for este número, menor será a velocidade do escoamento.

Figura 3: Possibilidade de escoamento em um trocador de calor a placas com 9 placas e 8 canais.



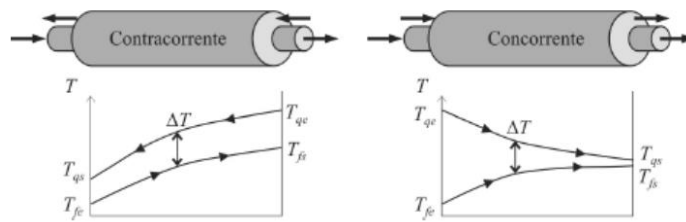
Fonte: Tadini, 2018.

Uma outra variável na montagem do equipamento são as entradas dos fluidos, sendo contracorrente ou concorrente. Raramente são dispostas de maneira concorrente (ambos os fluidos entrando pelo mesmo lado), pois este arranjo reduz o potencial de troca térmica. Na Figura 4 é possível observar esta diferença com o gráfico e a representação da equação, onde é possível observar que no fluxo contracorrente, a diferença de temperatura de saída dos fluidos é maior do que em comparação do fluxo concorrente (Tadini, 2018).

De modo geral, as entradas são dispostas de maneira contracorrente, quando os fluidos entram por lados opostos. Na Figura 4 observam-se quatro placas operando em escoamento contracorrente (1, 2, 4 e 7) e três em escoamento concorrente (3, 5 e 6). Caso o fluido frio fosse introduzido pela parte superior, o número de placas em contracorrente seria reduzido para três (Çengel, 2012; Tadini, 2018).

Figura 4: Demonstração do escoamento concorrente e contracorrente de fluidos em um trocador de calor.

$$\Delta \bar{T}_{\ln} = \frac{\text{Contracorrente}}{\ln \left(\frac{(T_{qe} - T_{fe}) - (T_{qe} - T_{fs})}{(T_{qe} - T_{fe})} \right)} \quad \text{Concorrente} \quad \Delta \bar{T}_{\ln} = \frac{(T_{qe} - T_{fe}) - (T_{qe} - T_{fs})}{\ln \left(\frac{(T_{qe} - T_{fe})}{(T_{qe} - T_{fs})} \right)}$$



Fonte: Tadini, 2018.

O trocador de calor a placas destaca-se no processamento de alimentos termosensíveis, operando com uma diferença mínima de temperatura entre os fluidos (2 °C a 3 °C) e tempo de retenção curto, o que preserva a qualidade do produto. Além disso, seu menor volume de retenção reduz perdas durante ajustes e paradas no processo. Em contrapartida, apresentam limitações, como a vida útil restrita das gaxetas e dificuldades de operação em pressões acima de 2000 kPa ou temperaturas superiores a 300 °C. Nessas condições, é necessário usar modelos mais robustos, o que dificulta desmontagem e limpeza (Tadini, 2018).

3.8 PASTEURIZAÇÃO EMPREGADA NA CANA-DE-AÇÚCAR

A pasteurização do caldo de cana pode ser aplicada de diversas formas, considerando diferentes faixas de binômio tempo-temperatura, acidificação do meio com suco de frutas, tipo de embalagem, método de envase e condições de acondicionamento do produto. A Tabela 6 apresenta estudos sobre a viabilidade desse processo, explorando diferentes combinações de técnicas.

Tabela 6: Parâmetros da pasteurização de caldo de cana em diferentes binômios tempo/temperatura, vida útil, condições de armazenagem, embalagem de envase e observações pontuadas.

Tecnologia aplicada	Binômio tempo/temperatura	Tempo de vida útil e condições de armazenagem	Embalagem	Observações	Referências
Pasteurização e envase asséptico.	95 °C/ 30 s	Refrigerado (7 °C a 10 °C) a 75 dias.	Garrafas PET de 250 mL fechadas com tampa de polipropileno	Promissora para pequenas escalas	Andrade, I. 2014
Pasteurização, envase asséptico e acidificação	83 °C ± 2 °C/ 585 s	Com suco de limão 90 dias, e integral por 30 dias. Ambas armazenadas sem refrigeração.	Garrafas de vidro e tampadas hermeticamente por tampas metálicas.	A acidificação e a embalagem contribuíram para a possibilidade de armazenamento sem refrigeração.	Barub, W. 2023
Pasteurização, envase asséptico e acidificação.	83 °C ± 2 °C/ 585 s	Com suco de abacaxi 28 dias; com suco de limão 155 a 200 dias. Todas armazenadas com refrigeração (5°C)	Garrafas de vidro transparente de 300 mL	O armazenamento refrigerado contribuiu com o aumento da vida útil do caldo de cana.	Spiller, A. 2023
Pasteurização e envase asséptico	90° C/ 40 s	Armazenadas com refrigeração (0°C) por 15 dias (conclusão das análises)	Garrafa PET de 500 mL, fechadas com tampa de polipropileno.	Menor variação de cor (85 °C/ 44 s; melhor percepção sensorial (85 °C/ 16 s); melhor estabilidade microbiológica (90 °C/ 40 s).	Gomes, J. 2019

Fonte: Autoria própria, 2025.

Gomes (2019) abordou o binômio tempo-temperatura a partir de um delineamento experimental específico e adequado para o caldo de cana, considerando uma faixa de tempo entre 16 a 44 segundos e temperaturas variando de 78 °C a 92 °C. Em contraste, os demais autores basearam suas análises principalmente em referências de outros artigos científicos, frequentemente associando os estudos com a adição de sucos de limão ou abacaxi ou em escala de bancada. Apesar das diferentes condições e técnicas de conservação, todos os trabalhos

trouxeram resultados promissores quanto à estabilidade físico-química e ao aumento do tempo de vida útil do caldo de cana, após passar pelo tratamento térmico de pasteurização.

4. METODOLOGIA

A otimização de processos na indústria alimentícia é crucial para aumentar a eficiência produtiva, reduzir custos operacionais, minimizar desperdícios e garantir a qualidade e segurança dos alimentos. Por esta razão, foi realizado um comparativo do projeto do atual processo da indústria produtora de *frozen* de cana *versus* um processo projetado com a implementação da pasteurização.

A partir da revisão teórica, foram identificadas as variáveis necessárias para o dimensionamento do trocador de calor a placas e dos parâmetros técnicos do envase asséptico, bem como a embalagem sugerida para o processo. Considerando a metodologia proposta por Gomes (2019), o binômio tempo/temperatura aplicado para a pasteurização do caldo de cana foi de 90 °C/40 s, considerando um trocador de calor a placas com seções de regeneração, aquecimento e resfriamento, com uma vazão de 3200 L/h.

Os cálculos de dimensionamento foram aplicados nas três seções, considerando a prática teórica descrita por Tadini (2018). Com o auxílio de uma planilha eletrônica, os seguintes parâmetros foram calculados: propriedades termofísicas (densidade, calor específico e condutividade térmica), vazão mássica, carga térmica, diâmetro hidráulico e área de superfície da placa, configuração das placas (canais x passes), números adimensionais (Reynolds, Nusselt e Prandtl), coeficiente de convecção, coeficiente global limpo e sujo, fator de incrustação de acordo com o tipo de escoamento do fluido, potencial térmico, área de transferência térmica e eficiência do processo.

4.1 CÁLCULOS PARA DIMENSIONAMENTO

4.1.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO CALDO DE CANA

As propriedades termofísicas, como densidade (ρ), calor específico (C_p) e condutividade térmica do fluido (k), desempenham um papel essencial no desenvolvimento de processos que envolvem operações unitárias de transferência de calor. Essas propriedades dependem da temperatura e da composição dos alimentos, e seus valores foram estimados utilizando as equações de *Choi Okos* (Tabela 7) (Tadini, 2018).

Tabela 7: Propriedades termofísica dos principais componentes dos alimentos.

Propriedades	Componentes	Equação (T em °C)
ρ (densidade: kg/m ³)	Proteínas	$\rho = 1,3299 \cdot 10^3 - 5,1840 \cdot 10^{-1} \cdot T$
	Gorduras	$\rho = 9,2559 \cdot 10^2 - 4,1757 \cdot 10^{-1} \cdot T$
	Carboidratos	$\rho = 1,5991 \cdot 10^3 - 3,1046 \cdot 10^{-1} \cdot T$
	Fibras	$\rho = 1,3115 \cdot 10^3 - 3,6589 \cdot 10^{-1} \cdot T$
	Cinzas	$\rho = 2,4238 \cdot 10^3 - 2,8063 \cdot 10^{-1} \cdot T$
	Água	$\rho = 9,9718 \cdot 10^2 + 3,1439 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,7574 \cdot 10^{-3} \cdot T^2$
C_p (calor específico: kJ/ kg*k)	Proteínas	$C_p = 2,0082 + 1,2089 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1,3129 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
	Gorduras	$C_p = 1,9842 + 1,4733 \cdot 10^{-3} \cdot T - 4,8008 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
	Carboidratos	$C_p = 1,5488 + 1,9625 \cdot 10^{-3} \cdot T - 5,9399 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
	Fibras	$C_p = 1,8459 + 1,8306 \cdot 10^{-3} \cdot T - 4,6509 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
	Cinzas	$C_p = 1,0926 + 1,8896 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,6817 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
	Água	$C_p = 4,1762 - 9,0864 \cdot 10^{-5} \cdot T + 5,4731 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
k (contutividade térmica: Wm/k)	Proteínas	$k = 1,7881 \cdot 10^{-1} + 1,1958 \cdot 10^{-3} \cdot T - 2,7178 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
	Gorduras	$k = 1,8071 \cdot 10^{-1} + 2,7604 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1,7749 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$
	Carboidratos	$k = 2,01411 \cdot 10^{-1} + 1,3874 \cdot 10^{-3} \cdot T - 4,3312 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
	Fibras	$k = 1,8331 \cdot 10^{-1} + 1,2497 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,1683 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
	Cinzas	$k = 3,2962 \cdot 10^{-1} + 1,4011 \cdot 10^{-3} \cdot T - 2,9069 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
	Água	$k = 5,7109 \cdot 10^{-1} + 1,7625 \cdot 10^{-3} \cdot T - 6,7036 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$

Fonte: Tadini (Choi Okos - Adaptado), 2018.

4.1.2 ESCOLHA DO MODELO DA PLACA TÉRMICA

Para conseguirmos dimensionar um trocador de calor, precisamos ter conhecimentos técnicos do funcionamento do equipamento. As placas que compõem o trocador são o componente principal, e com as suas dimensões e fichas técnicas, é possível mensurar:

- Fator de correção aplicado à área da placa ($f'Ap$ [adimensional]): permite uma estimativa mais realista da área efetivamente disponível para a troca térmica, sendo fundamental para a obtenção de resultados mais próximos do desempenho real do equipamento em operação. O seu cálculo é representado na Equação 1, levando em consideração a largura entre as gaxetas (wg [m]), área efetiva [m^2] e a espessura do canal (ec [m]):

$$f'Ap = \frac{\text{Área efetiva}}{wg * ec} \quad (1)$$

- Diâmetro hidráulico (Dh) [m]: O diâmetro hidráulico influencia o regime de escoamento, a transferência de calor e a perda de carga em trocadores de calor. Diâmetros menores aumentam a eficiência térmica, mas também elevam a perda de

pressão, afetando o desempenho do equipamento. O Dh é calculado a partir da relação do $f'Ap$ com ec , representada na Equação 2:

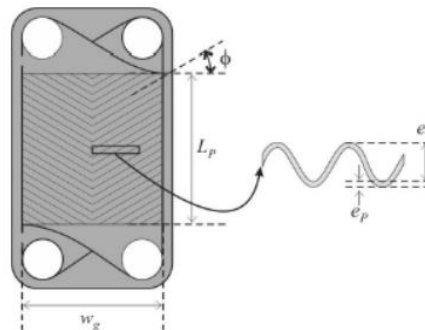
$$Dh = \frac{2 * ec}{f'Ap} \quad (2)$$

- Área de seção transversal [m^2]: Essa área representa a passagem disponível para o escoamento do fluido, sendo fundamental para o cálculo da velocidade, número de Reynolds e, conseqüentemente, para a análise do regime de escoamento e do desempenho térmico-hidráulico do equipamento, representada na Equação 3:

$$As = ec * wg \quad (3)$$

Na Figura 5 são apresentadas as principais dimensões de um trocador de calor a placas. Sendo Lp , comprimento da parte corrugada e ϕ o ângulo da corrugação:

Figura 5: Principais dimensões de uma placa em um trocador de calor a placas:



Fonte: Tadini, 2018.

4.1.3 NÚMEROS ADIMENSIONAIS E COEFICIENTE CONVECTIVO INDIVIDUAL

O coeficiente de troca térmica por convecção é uma constante de proporcionalidade que caracteriza a camada-limite e atua como interface entre os meios sólidos e fluidos. Ele desempenha um papel crucial na determinação da intensidade da troca térmica em um processo. Na equação 4, o coeficiente convectivo (h) é definido a partir do número de Nusselt (N_{Nu}) [adimensional], da condutividade térmica do fluido (k) [$W/m \cdot ^\circ C$] e do Dh [m] (Tadini, 2018).

$$h = \frac{N_{Nu} * k}{Dh} \quad (4)$$

Os números adimensionais derivam das especificações dos coeficientes convectivos e são importantes para determinar o comportamento dos fluidos. O número de Nusselt (N_{Nu}) é delineado de equações empíricas para identificar a transferência de calor por convecção ou condução, incorporando a viscosidade (μ), números de Reynolds e Prandtl, além dos parâmetros de troca térmica para um trocador de calor a placas com padrão espinha de peixe, b_1 e b_2 , que são mensurados a partir de uma tabela definida por Tadini (2018), apresentada na Figura 6. A equação do número de Nusselt está representado abaixo pela Equação 5:

$$N_{Nu} = b_1 * (N_{Re})^{b_2} * (N_{Pr})^{0,33} * (\mu)^{0,14} \quad (5)$$

Figura 6: Parâmetros de troca térmica para um trocador de calor a placas com padrão espinha de peixe.

ϕ	N_{Re}	b_1	b_2
$\leq 30^\circ$	≤ 10	0,718	0,349
	> 10	0,348	0,663
45°	< 10	0,718	0,349
	10 – 100	0,400	0,598
	> 100	0,300	0,663
50°	< 20	0,630	0,333
	20 – 300	0,291	0,591
	> 300	0,130	0,732
60°	< 20	0,562	0,326
	20 – 400	0,306	0,529
	> 400	0,108	0,703
$\geq 65^\circ$	< 20	0,562	0,326
	20 – 500	0,331	0,503
	> 500	0,087	0,718

Sendo ϕ o ângulo da corrugação; N_{Re} o número de Reynolds; b_1 e b_2 variáveis para placas tipo espinha de peixe. Fonte: Tadini, 2018.

O número de Reynolds (N_{Re}) caracteriza o escoamento interno do fluido em laminar, de transição ou turbulento, englobando o Dh [m], velocidade (v) [m/s], densidade (ρ) [kg/m^3] e viscosidade (μ) [mPa.s] (equação 6).

$$N_{Re} = \frac{Dh * v * \rho}{\mu} \quad (6)$$

O número de Prandtl (N_{Pr}) avalia a eficiência dos transportes por difusão, de momento e de energia nas camadas limites de velocidade e térmica. Na equação 7 o N_{Pr} é mensurado pelos parâmetros calor específico (Cp) [J/kg.°C], viscosidade (μ) e condutividade térmica (k) (Tadini, 2018).

$$N_{Pr} = \frac{Cp * \mu}{k} \quad (7)$$

4.1.4 CONFIGURAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR (CANAIS X PASSE)

Como descrito no item 3.7, a configuração do trocador de calor a placas no que diz a respeito à quantidade de canais x passes, permite manipular as velocidades de escoamento do fluido (equação 8) ao relacionar vazão volumétrica (Q) [m³/s], relação entre o número de canais (nc) e o número de passes (np) e a área transversal de escoamento (As). Essa velocidade afeta diretamente o número de Reynolds, que determina o regime de escoamento e influencia também os números de Prandtl e Nusselt, impactando o coeficiente de transferência de calor por convecção.

$$v = \frac{Q}{\frac{nc}{np} * As} \quad (8)$$

Diante disso, a definição da configuração do equipamento precisa considerar esses parâmetros adimensionais, de forma a assegurar uma troca térmica eficiente. Um número maior de passes, por exemplo, aumenta o percurso do fluido e favorece a transferência de calor, mas pode resultar em uma queda de pressão mais significativa. Já a ampliação do número de canais tende a reduzir a velocidade do fluido, diminuindo a perda de carga, ao mesmo tempo em que amplia a superfície de troca térmica. Assim, a escolha final da configuração busca equilibrar a eficiência térmica do processo.

4.1.5 COEFICIENTES GLOBAIS DE TROCA TÉRMICA

O coeficiente global de troca térmica integra os aspectos de transferência de energia térmica e resistência térmica, proporcionando uma medida abrangente da eficiência na transferência de calor em processos térmicos. O coeficiente global “limpo” (UL) [Q/m².°C] é

expresso pelos coeficientes convectivos dos lados quente e frio h_q e h_f [$\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$], espessura da parede metálica (e) [m] e condutividade térmica do metal (km) [$\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$] (equação 9) (Tadini, 2018).

$$\frac{1}{UL} = \frac{1}{h_q} + \frac{e}{km} + \frac{1}{h_f} \quad (9)$$

O coeficiente global de transferência térmica em condições de superfície suja (US), considera o efeito adicional causado por possíveis depósitos de material, que introduzem resistências térmicas extras ao processo de troca de calor, e por esta razão são utilizadas nos cálculos por se aproximarem das condições reais. Na equação 10 é apresentado o cálculo da US , que incorpora o coeficiente global de troca térmica “limpo” (UL) e os fatores de incrustação do lado quente (R_{incq}) e frio (R_{incf}) que são valores tabelados, de acordo com o fluido de aplicação [$^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$].

$$\frac{1}{US} = \frac{1}{UL} + R_{incq} + R_{incf} \quad (10)$$

4.1.6 POTENCIAL DE TRANSFERÊNCIA TÉRMICA

Como abordado no item 3.7, o escoamento do fluido exerce influência direta na eficiência da troca térmica em um trocador de calor. Dentre os arranjos possíveis, o de contracorrente destaca-se por apresentar maior eficiência, sendo, por essa razão, amplamente adotado em projetos (Tadini, 2018).

O potencial térmico médio está relacionado à diferença de temperatura entre os fluidos quente e frio ao longo do trocador de calor. A equação que descreve este parâmetro baseia-se na média logarítmica de temperatura. Assim, o potencial térmico médio para arranjos contracorrente são expressos pela equação 11. Sendo T_{qe} e T_{qs} ($^\circ\text{C}$), as temperaturas quentes de entrada e saída, e T_{fe} e T_{fs} ($^\circ\text{C}$) as temperaturas frias de entrada e saída (Tadini, 2018).

$$\overline{\Delta T}_{ln} = \frac{(T_{qs} - T_{fe}) - (T_{qe} - T_{fs})}{\ln \left(\frac{T_{qs} - T_{fe}}{T_{qe} - T_{fs}} \right)} \quad (11)$$

4.1.7 CARGA TÉRMICA

A carga térmica (\dot{q}) em trocadores de calor está relacionada com a taxa de transferência térmica entre os fluidos quente e frio. As equações 13 e 14 derivam de um balanço de energia global do volume de controle em um regime estacionário, que está associado ao fluxo de calor pelo lado quente e frio. Na equação 15 é apresentada a expressão geral da carga térmica (Tadini, 2018).

Em que m_q e m_f são as vazões mássicas [kg/s] do fluido quente e fluido frio respectivamente, C_{pq} e C_{pf} [J/kg.°C] os calores específicos para cada fluido. O U [Q/m².°C] o coeficiente global de troca térmica, A a área de troca térmica [m²] e $\overline{\Delta T \ln}$ o potencial de troca térmica [°C].

$$\dot{q} = m_q C_{pq} (T_{qe} - T_{qs}) \quad (13)$$

$$\dot{q} = m_f C_{pf} (T_{fs} - T_{fe}) \quad (14)$$

$$\dot{q} = U A \overline{\Delta T \ln} \quad (15)$$

4.1.8 A ÁREA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE UM TROCADOR DE CALOR A PLACAS

O cálculo da área de transferência térmica apresentado na equação 16 é delineado a partir da equação da carga térmica. Para trocadores de calor a placas, este parâmetro também pode ser mensurado utilizando a relação entre o número de placas do trocador de calor - n_{pl} (as duas placas das extremidades não contabilizadas) e a área efetiva de troca térmica (A_{ep}), conforme demonstrado na equação 17 (Tadini, 2018).

$$A = \frac{\dot{q}}{U * \overline{\Delta T \ln}} \quad (16)$$

$$A = n_{PL} A_{ep} \quad (17)$$

4.1.9 EFICIÊNCIA DO PROJETO

A eficiência térmica, definida pela Equação 18, é uma variável essencial na análise de trocadores de calor. Nesse contexto, $(m \cdot C_p)_{min}$ representa a menor capacidade térmica entre os fluxos quente e frio, sendo o produto entre a vazão mássica e o calor específico do fluido com menor capacidade térmica. Essa abordagem garante que a análise considere a condição mais desfavorável de transferência de calor, ou seja, o limite inferior de desempenho do sistema.

Já a diferença de temperaturas ($T_{qe}-T_{fe}$) representa o potencial térmico máximo disponível para a troca de calor entre os dois fluidos (Tadini, 2018).

$$\eta_e = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{max}} = \frac{\dot{q}}{(\dot{m}C_p) \min(T_{qe} - T_{fe})} \quad (18)$$

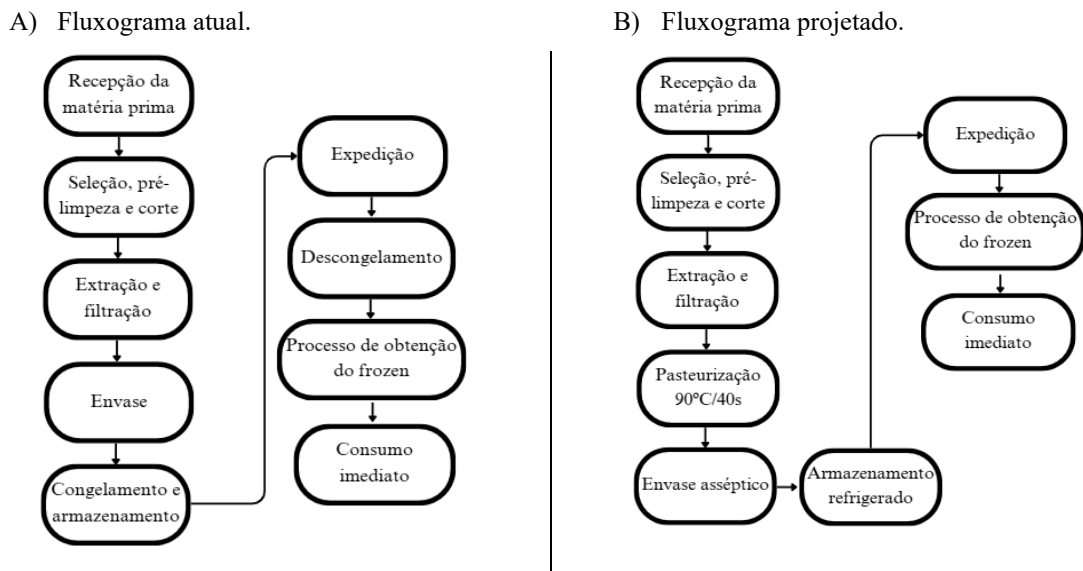
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

Na indústria de alimentos, a melhoria de processos internos é essencial para aumentar a eficiência operacional e a competitividade. Além disso, a otimização reduz custos operacionais, promovendo o uso inteligente de recursos e assegurando a qualidade e segurança dos produtos, fatores decisivos para atender às demandas do mercado (Nunes, et al. 2018).

Na Figura 7 é apresentado o comparativo do processo atual da indústria produtora de *frozen* de cana *versus* o processo projetado por intermédio deste presente trabalho:

Figura 7: Processo produtivo atual (A) e processo produtivo do projeto (B).



Fonte: Autoria própria, 2025.

Ao lado esquerdo da Figura 7 é apresentado o fluxograma produtivo atual, onde o processo se inicia com a recepção da matéria-prima, seleção, pré-limpeza e corte. Após o preparo da matéria-prima é realizada a extração do caldo de cana e a sua filtração utilizando peneiras cônicas. Posteriormente, é realizado o envase em sacos plásticos próprios para a obtenção de vácuo e que são submetidos a um congelamento lento em câmaras frias, onde é realizado o seu armazenamento.

Após o congelamento do caldo de cana, o produto é encaminhado para a expedição nos pontos comerciais localizados em São Paulo (SP), onde o *frozen* de cana é confeccionado em equipamentos produtores de *frozen*, que utilizam agitação e temperaturas de -3 °C a -5 °C para conferir o aspecto de “raspadinha” ao produto. O caldo de cana congelado, ausente de testes de qualidade, não garante a padronização do produto e, o fato do equipamento apenas aceitar

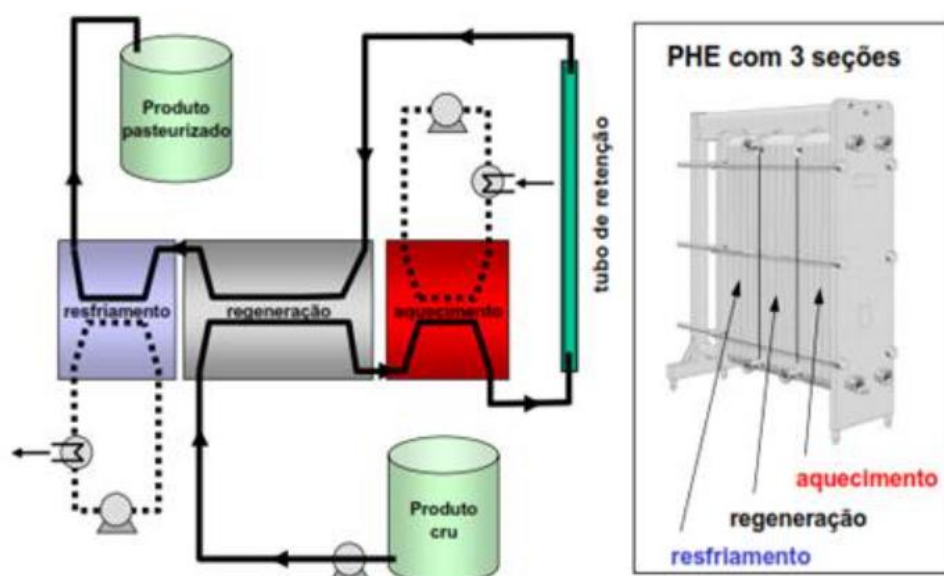
líquidos, torna redundante o processo de congelamento, demandando recursos e energia para o mesmo fim.

Com as considerações apresentadas, no fluxograma B da Figura 7, sugere-se a adição da etapa de pasteurização e do envase asséptico ao processamento do caldo de cana para obtenção do *frozen*, tornando desnecessária a etapa de congelamento do caldo de cana e, conseqüentemente, do seu descongelamento para o preparo do *frozen*, sendo necessário apenas o armazenamento do caldo em ambiente refrigerado. Esta mudança pode trazer eficiência produtiva e reduzir custos operacionais, além de garantir a qualidade do produto final.

5.2 RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTOS PARA A PASTEURIZAÇÃO DO CALDO DE CANA

Na Figura 8 é ilustrado o mecanismo de troca térmica para o trocador de calor a placas com seções de regeneração, aquecimento e resfriamento. Este tipo de configuração é ideal para alimentos uma vez que se aumenta gradualmente a sua temperatura. Na fase de regeneração, o caldo de cana *in natura* (CF1) a 25 °C é pré-aquecido a 60 °C pelo caldo de cana quente (CQ2) a 90 °C, proveniente da seção de retenção. Posteriormente, o caldo de cana pré-aquecido (CF2) chega na temperatura ideal de pasteurização a 90 °C, trocando calor com a água quente (AQ1) na temperatura de 98 °C. Por fim, o caldo de cana quente (CQ2) é resfriado até 10 °C na fase de resfriamento utilizando água fria (AF1) a 3 °C.

Figura 8: Mecanismo de troca térmica do trocador de calor a placas.



Fonte: Silva, 2019.

Na Tabela 8 são apresentadas as vazões do caldo de cana, água de aquecimento e água de resfriamento, que foram determinadas a partir da vazão atual empregada da indústria produtora de *frozen*, e os fluidos de serviço a partir de manipulação de cálculos até atingir uma eficiência de interesse (acima de 70%).

Tabela 8: Vazões empregadas para o projeto do trocador.

Seções do trocador de calor a placas	Vazão volumétrica do fluido quente (L/h)	Vazão volumétrica do fluido frio (L/h)
Regeneração	Caldo quente 3200	Caldo frio 3200
Aquecimento	Água quente 1400	Caldo frio 3200
Resfriamento	Caldo quente 3200	Água fria 2100

Fonte: Autoria própria, 2025.

5.2.1 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO CALDO DE CANA

A partir das equações de *Choi Okos* e propriedades químicas do caldo de cana presentes na Tabela 1, foi possível mensurar as propriedades termofísicas do caldo em cada etapa da pasteurização, visto que a temperatura influencia nos valores. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Propriedades termofísicas do caldo de cana em cada seção do trocador.

Propriedades termofísicas do Caldo de Cana				
Propriedades	Regeneração		Aquecimento	Resfriamento
	(quente)	(frio)		
Calor específico (J/kg.°C)	3734,64	3719,76	3745,58	3706,95
Viscosidade (Pa.s)	0,00086	0,00086	0,00086	0,00086
Condutividade térmica (W/m.°C)	0,6	0,58	0,61	0,55
Densidade (kg/m³)	1039,41	1047,99	1033,44	1053,01

Fonte: Autoria própria, 2025.

O mesmo foi feito para água que está apresentada na Tabela 10. A água foi responsável por conduzir a temperatura de aquecimento e de resfriamento no processo térmico.

Tabela 10: Propriedades termofísicas da água em cada seção do trocador.

Propriedades termofísicas da água		
Propriedades	Aquecimento (quente)	Resfriamento (frio)
Calor específico (J/kg.°C)	4208	4176

Viscosidade (Pa.s)	0,00034	0,00086
Condutividade térmica (W/m.°C)	0,67	0,6
Densidade (kg/m³)	970,3	996,5

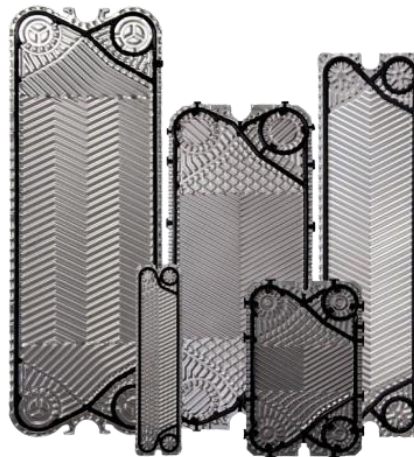
Fonte: Autorial própria, 2025.

O valor da viscosidade do caldo de cana adotado neste projeto para o dimensionamento do trocador de calor foi de 0,00086 Pa·s, conforme determinado experimentalmente por Umebara (2010).

5.2.2 MODELO DA PLACA

As características das placas escolhidas para compor o trocador de calor a placas foram do modelo BP100M da fabricante BERMO® (Blumenau, Santa Catarina). A fabricante possui um portfólio completo disponível virtualmente, e o modelo BP100M suporta a vazão da operação, além do material de aço inox ser recomendável para manipulação de alimentos e bebidas. Na Figura 9 e Tabela 11 são apresentadas, respectivamente, a ilustração do modelo da placa e as suas dimensões que possibilitam o cálculo do fator de alargamento ($f'Ap$), diâmetro hidráulico (Dh) e da área de seção transversal de escoamento (As).

Figura 9: Placas BERMO®



Fonte: BERMO®, 2025.

Tabela 11: Dimensões da placa BP100M

Comprimento da placa (L)	0,879 m
Largura entre gaxetas (Wg)	0,375 m
Comprimento da parte corrugada (Lp)	0,719 m

Ângulo de corrugação	60°
Espessura da placa	0,0028 m
Espessura do canal	0,0006 m
Área efetiva	0,22 m ²
Vazão mássica máx.	50 kg/s
Material	Aço inox

Fonte: BERMO®, 2025.

Na Tabela 12 são apresentados o fator de alargamento, o diâmetro hidráulico e a área de seção transversal de escoamento, respectivamente, que foram calculados a partir das equações 1 a 3.

Tabela 12: Valores encontrados para f^*Ap , Dh e As .

Fator de Alargamento	0,82
Diâmetro hidráulico	0,007 m
Área (As)	0,00105 m ²

Fonte: Autoria própria, 2025.

5.2.3 INTERPRETAÇÃO DOS NÚMEROS ADIMENSIONAIS E COEFICIENTE CONVECTIVO INDIVIDUAL

Na Tabela 13 são apresentados os valores para cada seção do trocador de calor a placas. Esses parâmetros são essenciais para avaliar e otimizar o desempenho térmico e hidráulico do trocador de calor, garantindo a eficiência do processo.

Os números de *Reynolds* indicam que o escoamento nos canais do trocador de calor a placas é predominantemente turbulento, pois os valores estão acima de 2300, favorecendo a transferência de calor. O número de *Prandtl*, que relaciona propriedades físicas do fluido, mantém-se relativamente constante, refletindo características semelhantes entre os fluidos quente e frio (Alfalaval, 2023).

O número de *Nusselt* e o coeficiente convectivo h são influenciados pelo número de *Reynolds* e de *Prandtl*, demonstrando a eficiência da transferência térmica convectiva entre os fluidos e etapas. O *Nusselt* acima de 100, reforça os resultados de *Reynolds* sobre o escoamento turbulento.

Tabela 13: Números adimensionais e coeficiente convectivo dos lados quente e frio de cada seção.

	Regeneração	Aquecimento	Resfriamento
Nre quente	3511,10	3627,09	3437,12
Nre frio	3540,07	3491,94	2209,00
Npr quente	5,35	2,13	5,97
Npr frio	5,52	5,27	6,05
Nnu quente	222,97	147,78	228,76
Nnu frio	226,49	221,00	167,58
h quente	19493,00	14469,77	18432,06
h frio	19140,39	19674,94	14503,96

Fonte: Autoria própria, 2025.

5.2.4 MENSURAÇÃO DA QUANTIDADE DE CANAIS E PASSES

Na Tabela 14 é apresentada a configuração ideal para cada seção do trocador de calor, de acordo com a manipulação de um número de Reynolds ideal, influenciada pela velocidade de escoamento.

Os números de canais e de passes foram definidos a partir de comparações entre outros tipos de configurações, a fim de definir um número de Reynolds favorável para que se obtenha um escoamento turbulento, que favoreça a troca térmica em um trocador de calor a placas.

Além disso, já foi possível mensurar a quantidade de placas necessárias para o trocador. Onde em cada seção terá 10 placas, totalizando 30 placas para a operação do trocador de calor a placas.

Tabela 14: Configurações estabelecidas para as seções do trocador de calor.

Seções	Nº de canais	Quente (Nc x Np)	Frio (Nc x Np)	Velocidade [m/s]
Regeneração	8	4 x 2	4 x 2	0,42
Aquecimento	8	4 x 2	4 x 2	0,19 – 0,42
Resfriamento	8	4 x 2	4 x 2	0,42 – 0,28

Fonte: Autoria própria, 2025.

5.2.5 COEFICIENTES GLOBAIS DE TROCA TÉRMICA PROJETADA

Segundo Tadini (2018), pode-se considerar os valores de R_{inc} para água mole e para a água de resfriamento como sendo de $0,00002 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ e $0,00003 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$, respectivamente. Neste trabalho, o caldo de cana foi considerado como o fluido de processo (geral), adotando-se o valor de $0,00003 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$.

Na Tabela 15 são apresentados os valores de coeficiente global de transferência térmica “limpo” e “sujo” nas diferentes seções do trocador de calor. E é possível observar a diferença entre US e UL, em razão da consideração dos fatores de incrustação do trocador de calor a placas, diminuindo o valor de coeficiente global sujo, se aproximando das condições reais do processo.

Tabela 15: Coeficientes globais “limpo” (UL) e “sujo” (US)

	Regeneração	Aquecimento	Resfriamento
UL [W/m²· °C]	7202,53	6442,06	6309,38
US [W/m²· °C]	5029,17	4872,59	4576,78

Fonte: Autoria própria, 2025.

5.2.6 POTENCIAL DE TRANSFERÊNCIA TÉRMICA

Na Tabela 16 estão apresentados os valores encontrados para o potencial de transferência térmica médio considerando um sistema de escoamento de fluidos quentes e frios em contracorrente.

Tabela 16: Valores de potencial de transferência térmica médio em fluxo contracorrente.

Regeneração	Aquecimento	Resfriamento
19,58 °C	7,49 °C	10,5 °C

Fonte: Autoria própria, 2025.

A etapa de regeneração apresentou o maior valor (19,58 °C), indicando elevada eficiência na recuperação de calor. No aquecimento, observou-se o menor potencial térmico (7,49 °C), o que, embora represente uma menor força motriz para a troca de calor, é condizente com a necessidade de um aquecimento controlado e gradual, fundamental para preservar as características sensoriais e nutricionais. A etapa de resfriamento apresentou valor intermediário (10,5 °C), refletindo uma transferência térmica equilibrada. Esses resultados mostram a adequação térmica de cada etapa conforme os requisitos do processo.

5.2.7 CARGA TÉRMICA PROJETADA

Na Tabela 17 estão apresentados os valores de carga térmica [*W*] encontradas para as 3 seções do trocador de calor dimensionado. Os valores encontrados a baixo são coerentes com necessário, ao comparar a carga térmica real.

Tabela 17: Valores da carga térmica do projeto.

Regeneração	Aquecimento	Resfriamento
172526,02 W	41283,89 W	104091,76 W

Fonte: Autoria própria, 2025.

5.2.8 ÁREA DE TRANSFERÊNCIA TÉRMICA PROJETADA

Na Tabela 18 são apresentadas as áreas encontradas para cada seção do trocador de calor dimensionada no projeto. Ao realizar a soma das áreas, é possível confirmar que o trocador de calor escolhido comportará o processo, visto que o projetado é menor que o máximo permitido pela fabricante BERMO.

Tabela 18: Área de transferência térmica do projeto.

Regeneração	Aquecimento	Resfriamento
1,22 m ²	0,86 m ²	1,57 m ²

Fonte: Autoria própria, 2025.

5.2.9 EFICIÊNCIA ENCONTRADA

Na Tabela 19 são apresentadas as eficiências de cada seção do trocador de calor dimensionado neste projeto

Tabela 19: Eficiência de cada seção do trocador de calor a placas.

Regeneração	Aquecimento	Resfriamento
76,9%	78,8%	81,1%

Fonte: Autoria própria, 2025.

Esses valores indicam um desempenho satisfatório para um trocador de calor a placas, considerando as condições operacionais simuladas, sendo coerentes com a literatura técnica, que aponta eficiências típicas acima de 70% para esta tecnologia, especialmente em sistemas compactos e com vazões bem equilibradas entre os dois lados do trocador de calor a placas (Sebastian, 2015).

Todos os cálculos foram realizados por meio de uma planilha eletrônica, disponível em: (<https://docs.google.com/spreadsheets/d/19U4O5t0NB-xl4DorSA2tUf6g7NMIqsVt/edit?usp=sharing&ouid=117203175342656494223&rtpof=true&sd=true>)

5.3 ENVASE ASSÉPTICO E EMBALAGEM

Após o resfriamento do caldo de cana a 10 °C, o produto segue diretamente para a etapa de envase asséptico, que requer controle rigoroso do ambiente e esterilidade das embalagens. Os recipientes utilizados são baldes plásticos fabricados em polietileno de alta densidade (PEAD), material amplamente adotado na indústria de alimentos por apresentar alta resistência mecânica, estabilidade dimensional e baixa permeabilidade ao oxigênio e à umidade. Uma alternativa sustentável é o uso do Bio-PE, produzido a partir do etanol da cana-de-açúcar, que mantém as mesmas propriedades físicas e químicas do PEAD convencional, além de reduzir a pegada de carbono sem comprometer a reciclabilidade. O design dos baldes é robusto e empilhável, permitindo o armazenamento vertical seguro em câmaras frias, otimizando o espaço sem comprometer a integridade do produto (Siracusa, Blanco, 2020; Mattosinhos, Pazzoti, 2023).

A superfície externa dos baldes e da tampa são descontaminadas por imersão em solução de ácido peracético a 0,05% (v/v) a 25 °C por 20 minutos, garantindo a eliminação de microrganismos aderidos. O interior das embalagens é sanificado por aspersão da mesma solução química durante 10 segundos a 45 °C, assegurando a higienização completa. Após o tempo adequado de contato, as embalagens recebem enxágue com água estéril ou são submetidas à exposição a vapor sanitizante, garantindo a eliminação microbiana (Gomes, 2019).

O envase do caldo ocorre por meio de sistema fechado, mantendo o produto a 10 °C durante todo o processo, o que contribui para a manutenção das condições assépticas. As tampas, previamente esterilizadas, são aplicadas imediatamente após o enchimento para evitar contaminação. Em seguida, os baldes são armazenados em temperatura controlada de refrigeração a 0 °C, preservando a qualidade físico-química e microbiológica do caldo (Gomes, 2019).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo o dimensionamento de um trocador de calor a placas voltado à pasteurização do caldo de cana, considerando o contexto de uma indústria produtora de *frozen* de cana. A proposta consistiu em simular, de forma técnica e fundamentada, as condições operacionais ideais para esse processo térmico, a fim de avaliar sua viabilidade em substituição ao congelamento convencional. Os resultados obtidos demonstraram que o equipamento projetado apresentou desempenho satisfatório, com eficiências térmicas

superiores a 76% em todas as etapas simuladas, valores compatíveis com a literatura técnica e adequados às exigências de um processo seguro e eficiente.

A relevância do estudo está na proposta de um modelo de conservação do caldo de cana que, ao passar pela pasteurização, pode ser armazenado sob refrigeração no estado líquido, dispensando o congelamento e posterior descongelamento — etapas que consomem energia e aumentam o tempo de processamento. Além disso, ao contrário do congelamento, que apenas retarda o crescimento microbiano, a pasteurização promove a redução significativa da carga microbiana dos alimentos, elevando a segurança e a qualidade do produto, mesmo sem o uso de aditivos químicos. O uso de trocadores de calor a placas se mostrou uma alternativa vantajosa, sobretudo por sua eficiência térmica, facilidade de higienização e reduzido espaço físico na planta industrial. Assim, conclui-se que a pasteurização do caldo de cana, aliada ao uso de trocadores de calor a placas, envasados asépticamente e armazenadas em temperaturas de refrigeração, representa uma estratégia tecnicamente viável e promissora para a otimização do processo produtivo de *frozen* de caldo de cana, com potencial para reduzir custos e aumentar a vida útil do produto.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFALAVAL. Trocador de Calor: definição, funcionamento, tipos e aplicações – São Paulo, SP. 2025.
- ALFALAVAL. Understanding and optimizing plate and frame heat exchanger design in HVAC systems – Richmond, VA. 2023
- ANDRADE I. Estimativa da vida de prateleira de caldo de cana padronizado estocado sob refrigeração. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo. Pirassununga - SP, 2014.
- BARUD, W. Caldo de cana industrializado: processamento e vida de prateleira. 2023. 24 f. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Escola de Nutrição, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 2023.
- BERMO. Trocador de calor a placas – Blumenau, SC, 2025.
- BRASIL. Câmara dos Deputados. Centro de documentação e informação. **Decreto nº 6.871, de 04 de junho de 2009**. Regulamenta a Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. Brasília, 2009.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa SDA nº 37, de 01 de outubro de 2018**. Estabelece os parâmetros analíticos de suco e de polpa de fruta e a listagem das frutas e demais quesitos complementares aos padrões de identidade e qualidade. Brasília, 2018.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução RDC nº 12, de 02 de janeiro de 2001**. Regulamento técnico sobre os padrões microbiológicos para alimentos. Brasília, 2001.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Instrução Normativa IN nº 161, de 01 de julho de 2022**. Estabelece os parâmetros microbiológicos dos alimentos. Brasília, 2022.
- ÇENGEL, Y. A. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática 4ª ed. AMGH editora, São Paulo/SP, 2012
- CELESTINO S., SANCHEZ B. Construção e Operação de um sistema de pasteurização de bancada para alimentos líquidos. Embrapa, Planaltina - DF, 2018.
- CONAB (Companhia Nacional do Abastecimento). Produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série histórica, Abril/ 2024. Brasília – DF, 2024.

- CONAB (Companhia Nacional do Abastecimento). Produção de cana-de-açúcar é estimada em 689,9 milhões de toneladas na safra 2024/2025, Agosto/ 2024. Brasília – DF, 2024.
- CONAB (Companhia Nacional do Abastecimento). Acompanhamento da safra brasileira, v13 – Safra 2025/26, n.1 – Primeiro levantamento. Brasília – DF, 2025.
- CONAB (Companhia Nacional do Abastecimento). Safra 2024/25 de cana-de-açúcar encerra com produção estimada em 676,96 milhões de toneladas. Brasília – DF, 2025.
- COSTA C., COMIN F., SANTOS JR, G., VARDADA L. Cana-de-açúcar: manejo, ecologia e biomassa/ Organizado por Meire Cristina Andrade Cassimiro da Silva - Spessotto. E-book. 208 p v.1. Bauru – SP. 2021
- COSTA D. Operador Industrial de Alimentos – Guia PRONATEC (Programa Nacional de Acesso ao Ensino Técnico e Emprego), Instituto Federal do Paraná – Curitiba, PR. 2012.
- EMBRAPA. Agência de informação tecnológica (Ageitec): Cana – Brasília – DF. 2022.
- GONÇALVES M., LIMA B., CARNEIRO V., CISLAGHI F., BADARÓ A. Avaliação microbiológica de alimentos comercializados em feiras livres de Francisco Beltrão - PR. **Revista Higiene Alimentar** – Maceió, AL - p 3648 - 3651 v.33. 2022.
- GOMES J. Processamento térmico de caldo de cana integra. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Pirassununga, São Paulo. 2019.
- MAIA A. Pasteurização: Estudo do efeito de parâmetros físico-químico na Cinética e do dimensionamento. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Química) Escola Superior de Tecnologia Tomar, Instituto Politécnico de Tomar, Portugal. 2012.
- MADRONA G., PARAÍSO C., SANTOS S., STAFUSSA A., REIS M. Efeito do uso de ultrassom no processo de ultrafiltração de polpa cajá-manga. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, 2021.
- MARINHO S., SILVA V., AMARAL V., SILVA G., FERREIRA Qualidade higiênico-sanitária e pesquisa de coliformes fecais no caldo de cana (garapa), consumido no município de Cacoal-RO. **Revista Higiene Alimentar** – Maceió, AL: 2019. P 1506 - 1511 v.33.
- MÁRQUEZ M., Diseño de un pasteurizador para helados – Universidade de Cádiz, 2007.
- NOCELLI R., ZAMBON V., SILVA O., MORINI M. Histórico da cana-de-açúcar no Brasil: Contribuições e importância econômica. Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica. Bauru, SP: Canal 6. 13-30 p v.1, 2017.
- NUNES J., SERRANO S., BELUSO M., PAULA R. Melhoria do processo produtivo por meio de otimização de processo de. **Anais da Engenharia de Produção** / ISSN 2594-4657, Chapecó – SC [S.l.], v. 2, n. 1, p. 105 - 122, 2018.

- OLIVEIRA A., SPOTO M., CANNIANTTI-BAZUCA S., SOUSA C., GALLO C. Efeitos do processamento térmico e da radiação gama na conservação de caldo de cana puro e adicionado de suco de frutas. *SciELO: Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 27, n. 4, p. 863-873, 2007.
- RAHMAN M. *Handbook of Food Preservation*. Boca Raton, 2 ed, 2007.
- OSTA C. Efeito da utilização de suco concentrado de cana no desenvolvimento de bebida láctea adicionada de probióticos. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia do Leite e Derivados) Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora – MG, 2024.
- MATTOSINHOS P., PAZZOTI G. Tecnologia e uso do poliéster nas embalagens de alimentos. **Revista Científica Unilago**. São José do Rio Preto, São Paulo. 2023
- RIPOLI T., RIPOLI M. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Barros e Marques Ed. Eletrônica, 302 p, 2004
- SANDA A., SILVA A., SILVA T., ORSINE J. Desenvolvimento de caldo de cana pasteurizado adicionado de frutas ácidas. **Revista 22 Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, 10(1), 2064–2078, 2016.
- SANTOS J., SILVA G., GANDRA L., KWIATKOWSKI A., GOMES A. Propriedades da cana-de-açúcar e qualidade da bebida brasileira caldo de cana. **Revista Principia**. João Pessoa, PB, 2020.
- SILVA M. Higienização de utensílios e embalagens para alimentos – Processos de higienização para materiais, utensílios e embalagens no processos de fabricação de alimentos. Instituto de Tecnologia do Paraná: TECPAR – SEBRAE, 2020.
- SILVA S., FARIA F. Avaliação da qualidade de caldo de cana envasado a quente e por sistema asséptico. **SciELO: Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 4, p. 754 – 758, 2006
- SILVA I., GÓMEZ-MALAGÓN L. Análise de Viabilidade Técnica da Aplicação de Energia Termossolar em Processos de Pasteurização. **Revista De Engenharia E Pesquisa Aplicada**, (4), p. 82-92, Recife – PB, 2019.
- SIRACUSA V., BLANCO I. Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent Developments in Bio-Based Polymers Analogous to Petroleum-Derived Ones for Packaging and Engineering Applications. doi: 10.3390/polym12081641. 2020.
- SPILLER, A. Vida de prateleira de bebidas de cana-de-açúcar refrigeradas estocadas em diferentes embalagens. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Escola de Nutrição, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), 2023.

TADINI C. Operações unitárias na indústria de alimentos. Campinas – SP. 2018.

TETRA PAK. Aprenda o básico sobre filtração por membrana. Monte Mor – SP, 2025.

UMEBARA T. Microfiltração de caldo de cana: caracterização do caldo de cana permeado e retentado. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2010.

UDOP (União Nacional da Bioenergia). Etanol: 2 países são líderes mundiais em produção dos biocombustíveis; e um deles é o Brasil, Setembro/2024. Araçatuba – SP, 2024.