

Universidade Federal do Mato Grosso do Sul Faculdade de
Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição (FACFAN)

Curso de Engenharia de Alimentos



Filipe Gustavo Costa Nunes

**TROCADORES DE CALOR E MÉTODOS DE CONSERVAÇÃO: UMA BREVE
REVISÃO NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS**

Campo Grande - MS

2025

Filipe Gustavo Costa Nunes

**TROCADORES DE CALOR E MÉTODOS DE CONSERVAÇÃO: UMA BREVE
REVISÃO NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. João Renato de Jesus Junqueira

Campo Grande - MS

2025

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Métodos de Conservação e o uso dos Trocadores de Calor.....	23
Quadro 2 - Trocadores de Calor em Processamento de Alimentos.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de Classificação dos Principais Tipos de Trocadores de Calor.....	10
Figura 2 - Escoamento Paralelo.....	11
Figura 3 - Escoamento Contracorrente.....	12
Figura 4 - Fluxo Cruzado.....	12
Figura 5 - Trocadores de Calor de Casco e Tubo.....	14
Figura 6 - Trocadores de Calor de Cascos e Tubos de Passe Simples.....	14
Figura 7 - Trocadores de Calor de Cascos e Tubos de Passe Duplo.....	15
Figura 8 - Arranjo Triangular.....	16
Figura 9 - Arranjo Quadrado.....	16
Figura 10 - Chicanas.....	18
Figura 11 - Exemplo de um Trocador de Calor de Tubo Duplo.....	20
Figura 12 - Serpentina em Espiral.....	20
Figura 13 - Versão Tridimensional de um Trocador de Calor de Placas.....	21

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me abençoar e fazer com que esse momento se tornasse real e que iluminará meu caminho no futuro profissional.

À minha mãe, pois foi a pessoa que mais acreditou em mim e me apoiou desde o momento em que escolhi esta profissão. Investiu em meus estudos e me incentivou a dar andamento em minha graduação, mesmo passando por diversos desafios.

À minha namorada que esteve comigo durante toda a caminhada acadêmica, dando suporte e depositando amor e compreensão em cada situação.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 OBJETIVOS.....	8
2.1 Objetivo Geral.....	8
2.2 Objetivos Especificos.....	8
3 METODOLOGIA.....	8
4 REVISÃO DA LITERATURA.....	8
4.1 Trocadores de Calor.....	9
4.1.1 Trocadores de Calor de Casca e Tubo.....	13
4.1.2 Número de Passes.....	14
4.1.3 Arranjo dos Tubos.....	15
4.1.4 Chicanas.....	17
4.1.5 Distribuição dos Fluidos.....	18
4.1.6 Trocadores de Calor Tubulares.....	19
4.1.7 Trocadores de Calor de Placas.....	20
4.1.8 Incrustação.....	21
4.2 Tratamento Térmico em Alimentos.....	22
4.2.1 Conservação pelo uso do Frio.....	24
4.2.1.1 Refrigeração.....	25
4.2.1.2 Congelamento.....	25
4.2.2 Conservação pelo uso do Calor.....	26
4.2.2.1 Branqueamento.....	26
4.2.2.2 Pasteurização.....	26
4.2.2.3 Esterilização.....	27
4.2.2.4 Secagem.....	27
4.2.2.5 Apertização.....	28
4.2.2.6 Tindalização.....	28
4.2.3 Desidratação.....	29
4.2.4 Liofilização.....	29
4.3 Uso Dos Trocadores de Calor em Processamentos de Alimentos.....	29
5 CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS.....	33

RESUMO

O uso de trocadores de calor na indústria de alimentos e nos seus procedimentos de fabricação, faz-se fundamental, ao passo que seus recursos abrangem diversas etapas onde abarcam o aquecimento ou resfriamento do produto. O presente estudo teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre os trocadores de calor, apresentando suas classificações, princípios de funcionamento e principais aplicações nos métodos de conservação a fim de identificar e descrever os principais tipos de trocadores de calor utilizados na indústria. Utilizou-se a abordagem qualitativa descritiva através de uma revisão literária a partir de documentos para uma análise sobre o tema em questão. Os principais resultados dos estudos, mostraram que os trocadores de calor são equipamentos projetados para facilitar a transferência de calor de forma eficiente entre dois fluidos que apresentam temperaturas distintas. Operar e fazer a manutenção dos trocadores de maneira adequada e considerando todas as variáveis envolvidas no processo de produção do alimento, garantem a qualidade na indústria de alimentos.

Palavras-chave: Tratamento Térmico. Processamento de Alimentos. Transferência de Calor. Indústria de Alimentos.

1 INTRODUÇÃO

O uso de trocadores de calor na indústria de alimentos e nos seus procedimentos de fabricação, faz-se fundamental, ao passo que seus recursos abrangem diversas etapas onde abarcam o aquecimento ou resfriamento do produto. Haja vista que o Brasil, segundo a Associação Brasileira da Indústria de Alimentos, está entre os maiores exportadores mundiais de alimentos (Ferreira, 2023).

Os trocadores de calor foram introduzidos em 1923 para uso em processos de pasteurização de leite e, atualmente, são amplamente aplicados em operações de troca térmica entre líquidos com viscosidades de até $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Esses equipamentos se destacam pela facilidade de desmontagem para limpeza e pelo eficiente controle térmico, tornando-se ideais para esterilização e pasteurização. (Shah e Sekulic, 2003).

Ressalta-se que os trocadores de calor são amplamente utilizados e estudados nas Engenharias. Assim como para promover a troca de calor, eles são aplicados no condicionamento de ar, no aquecimento de ambientes, na manufatura, no tratamento químico e até mesmo em trocas de energia (Gardenal e Sguario, 2016). Neste quesito, utiliza-se os trocadores de calor nos recursos industriais, onde recebem diferentes formatos e processos de execução e funcionamento para promover a troca de calor entre fluidos que se encontram em temperaturas diferentes (Ferreira, 2023).

Para selecionar um trocador de calor adequadamente, faz-se necessário a análise de fatores como temperatura, pressão, tipos e características dos fluidos envolvidos. Essa escolha cautelosa assegura a eficiência e o desempenho ideais do trocador, considerando as propriedades térmicas dos fluidos e as necessidades específicas do sistema (Çengel e Ghajar, 2012).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma revisão bibliográfica sobre os trocadores de calor, apresentando suas classificações, princípios de funcionamento e principais aplicações nos métodos de conservação.

2.2 Objetivos Específicos

1. Identificar e descrever os principais tipos de trocadores de calor utilizados na indústria.
2. Analisar os mecanismos de transferência de calor e os critérios de eficiência aplicados nos diferentes modelos.
3. Investigar as aplicações práticas dos trocadores de calor nos processos de conservação de alimentos, baseando-se na literatura.

3 METODOLOGIA

O presente estudo partiu de uma abordagem qualitativa descritiva, utilizando-se uma revisão literária a partir de documentos para uma análise sobre o tema em questão.

Uma revisão bibliográfica pauta-se na utilização e análise de escritos científicos, sejam elas de natureza empírica ou teórica. Este formato de pesquisa, fundamenta-se em fontes secundárias de informações, onde abordam participações críticas de autores acerca de determinado conteúdo ou tema de variadas áreas de conhecimento (Cavalcante e Oliveira, 2020).

Para tanto, buscou-se artigos, Trabalhos de Conclusão de Curso, teses de Mestrado e Doutorado e demais documentos científicos nos bancos de dados como SciElo (Scientific Electronic Library Online), Google Acadêmico e ScienceDirect com os seguintes descritores: Trocadores de Calor na Indústria de Alimentos e suas características e Técnicas de Conservação de Alimentos. Estas buscas abrangeram escritos nacionais e internacionais.

O período de pesquisa sobre os temas estende-se por cinco meses, que foi finalizado no dia 24/04/2025, considerado um ótimo tempo para a devida pesquisa, compreensão aprofundada e desenvolvimento consistente do tema. Os artigos utilizados na pesquisa abrangem publicações a partir do ano 2000, garantindo uma base teórica atualizada e relevante para o tema abordado.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Trocadores de Calor

Os trocadores de calor são equipamentos projetados para facilitar a transição de calor de forma eficiente entre dois fluidos que apresentam temperaturas distintas, o fluido de menor temperatura é chamado de fluido frio e receberá calor do fluido de maior temperatura, o fluido quente (Kreith *et al.*, 2011). Esses dispositivos são empregados em uma ampla gama de aplicações, que vão desde sistemas de aquecimento e climatização em residências até processos químicos e geração de energia em grandes usinas (Çengel e Ghajar, 2012).

Os principais processos para a produção de suco de uva envolvem aquecimento. Esse aquecimento pode ser realizado através dos trocadores de calor do tipo "tubo em tubo", amplamente utilizados na elaboração de suco de uva integral em volumes médios e grandes. Em menor escala, utilizam-se panelas extratoras a vapor, adequadas para produções em pequena escala; no entanto, esse sistema pode resultar na incorporação de água ao suco devido ao processo (Guerra *et al.*, 2016; Marcon *et al.*, 2016).

O vinho entra na unidade de destilação com concentrações de etanol entre 7% e 10% em massa, sendo conduzido inicialmente a um pré-aquecedor, onde é aquecido em contracorrente com os vapores provenientes do topo da coluna de retificação até alcançar a temperatura de 70°C. Depois, é direcionado aos trocadores de recuperação de calor da vinhaça, que têm a função de completar o aquecimento do vinho para uma faixa de 92-93°C (Barreto *et al.*, 2012).

Neste viés, o calor é utilizado para assegurar que o produto final seja seguro do ponto de vista microbiológico, com boa durabilidade para estocagem e estabilidade durante o armazenamento, além de ser economicamente viável. O calor é aplicado ou retirado para promover e controlar processos como cristalização, coagulação, gelificação, emulsificação, solidificação, neutralização, inativação de enzimas, pasteurização, esterilização, caramelização, evaporação, liquefação, entre outros (Zambelli, 2011).

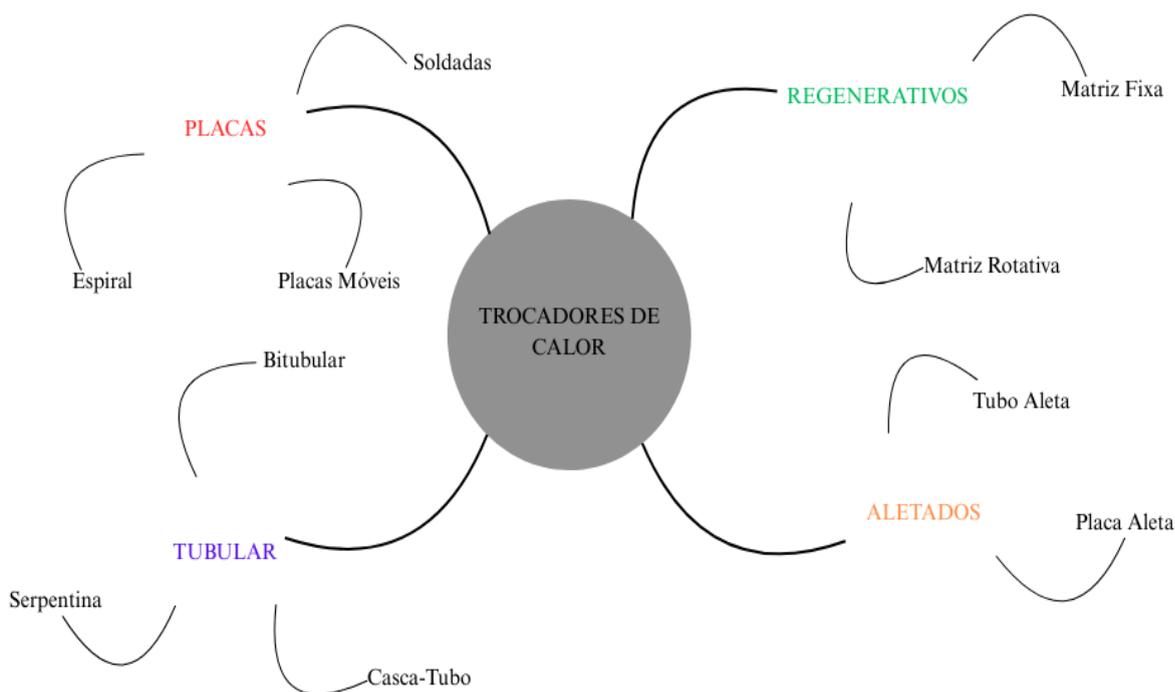
A seleção dos métodos de aquecimento ou resfriamento exige muito mais do que apenas conhecer o consumo de vapor, a água de resfriamento ou os gases utilizados em ciclos fechados. A compreensão dos diferentes tipos de trocadores de calor e do processo específico é fundamental para garantir um balanço econômico

eficiente. É necessário também estar ciente das transformações envolvidas, dos equipamentos auxiliares da linha (como bombas e válvulas, por exemplo) e da eficiência das operações (Zambelli, 2011).

O processo escolhido deve levar em consideração a viabilidade econômica e, preferencialmente, ser um sistema contínuo, evitando algumas condições técnicas desfavoráveis, como superaquecimento ou super-resfriamento localizados; taxa de transmissão de calor inadequada; agitação insuficiente ou excessiva no sistema; variações nas condições de operação e pressões muito altas ou muito baixas (Zambelli, 2011).

A classificação dos trocadores de calor é feita com base na Figura 1:

Figura 1: Fluxograma de classificação dos principais tipos de trocadores de calor



Fonte: Adaptado de Çengel (2012).

Os trocadores de calor podem ser categorizados com base nos seguintes critérios (Kreith *et al.*, 2014):

- Recuperadores e regeneradores: um recuperador é um tipo de trocador de calor convencional, onde o calor é transferido do fluido quente para o fluido frio que flui simultaneamente. No regenerador, os fluidos quente e frio

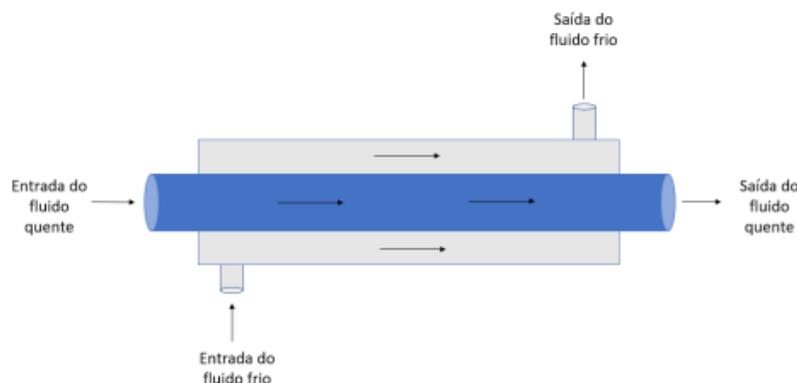
circulam alternadamente pelo trocador, que atua como um sistema de armazenamento de energia temporária e dissipação.

- Processo de transferência: contato indireto e direto. Em um trocador de calor de contato indireto, os fluidos quente e frio são separados por um material sólido. Já no trocador de contato direto, ambos os fluidos circulam no mesmo espaço, sem uma barreira entre eles.
- Geometria de construção: tubos, placas e aletas.
- Mecanismo de transmissão de calor: monofásico (uma única fase) e bifásico (evaporação e condensação). Esse critério diz respeito ao estado dos fluidos quente e frio, distinguindo entre situações em que ambos permanecem em uma única fase e aquelas em que um deles passa por condensação ou evaporação durante o fluxo.
- Configuração do fluxo: paralelo, contracorrente e cruzado.

A seleção apropriada de um trocador de calor exige a análise de fatores como temperatura, pressão, tipos e características dos fluidos envolvidos. Essa escolha cuidadosa busca assegurar a eficiência e o desempenho ideais do trocador, considerando as propriedades térmicas dos fluidos e as necessidades específicas do sistema (Çengel e Ghajar, 2012).

No escoamento paralelo, os fluidos entram no trocador de calor pelo mesmo lado e se movem na mesma direção, fluindo lado a lado. Isso provoca uma diferença de temperatura maior ao longo do trocador, o que pode elevar a taxa de transmissão de calor (Çengel e Ghajar, 2012). Na figura 2, observa-se o escoamento paralelo:

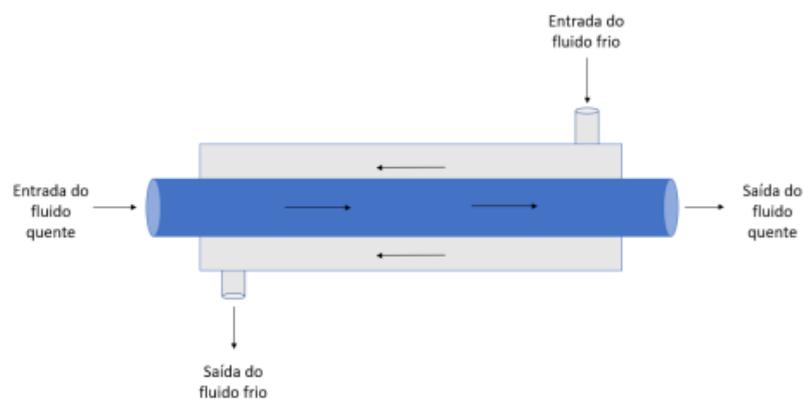
Figura 2 – Escoamento Paralelo



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar, 2012.

No escoamento contracorrente, os fluidos quente e frio se movem em direções opostas dentro do trocador de calor, permitindo um contato direto em uma área inicial do equipamento. Isso maximiza o uso da dimensão da superfície disponível, resultando em uma transferência de calor eficaz. Além disso, esse tipo de escoamento promove um aumento gradual da temperatura do fluido frio e uma diminuição da temperatura do fluido quente ao longo do trocador, mantendo uma diferença média de temperatura que melhora ainda mais essa transferência. Por essa razão, o escoamento contracorrente é reconhecido como o método mais eficiente para a transferência de calor (Incropera e Dewitt, 2013). Na figura 3, observa-se o escoamento contracorrente:

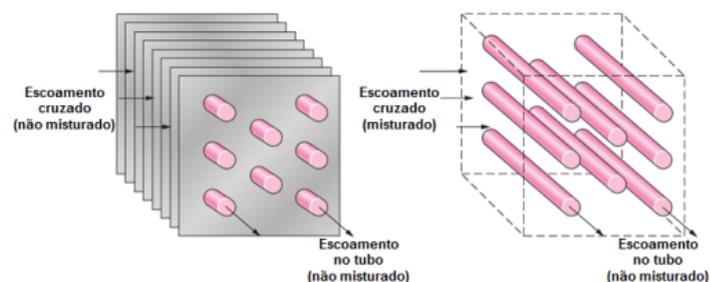
Figura 3 - Escoamento contracorrente



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar, 2012.

Em trocadores de calor compactos, geralmente os dois fluidos fluem de forma perpendicular entre si, e essa configuração de fluxo é chamada de cruzado (Çengel e Ghajar, 2012). Na figura 4 abaixo, mostra uma configuração de fluxo cruzado:

Figura 4 - Fluxo Cruzado



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar, 2012

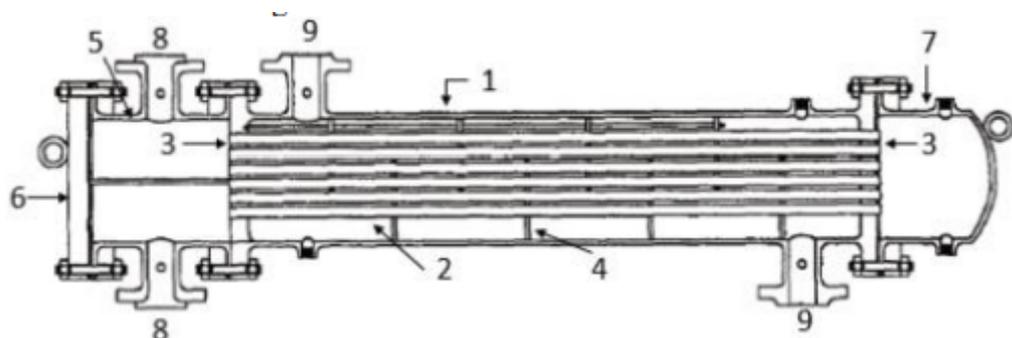
4.1.1 Trocadores de Calor de Casco e Tubo

Os trocadores de calor do tipo casco e tubo são amplamente utilizados na indústria para a transmissão de calor em diversos processos. Eles consistem em um conjunto de tubos circulares colocados dentro de um casco cilíndrico de diâmetro maior, com os eixos dos tubos alinhados ao do casco. Esses trocadores são especialmente aplicados no resfriamento de óleo em processos e desempenham funções essenciais em usinas de energia, na indústria química e em outras áreas (Kreith *et al.*, 2011).

No próprio equipamento, o suco de laranja integral é resfriado através de uma troca de calor indireta entre o líquido que está saindo e o que está entrando. Assim, o suco pode alcançar até 5°C na saída do pasteurizador (Ribas, 2023). Nesse tipo de trocador, um fluido flui dentro dos tubos (fluido primário), enquanto outro fluido (fluido secundário) circula externamente ao conjunto de tubos (Fiorillo, 2010).

Em um trocador de calor do tipo casco e tubo, os principais processos da transferência do calor entre o fluido quente e o fluido frio são a condução e a convecção. A energia é transferida do fluido quente para o fluido frio através de um fluxo de calor no sentido radial. Considerando duas partículas que se deslocam na corrente quente com determinada distância entre elas, há uma diferença de temperatura, resultando em uma transferência do calor na direção axial. No entanto, a taxa de calor transferida é mínima e geralmente é desconsiderada no modelo clássico (Puntel, 2020).

Figura 5 - Trocador de calor de casco e tubo



Fonte: Kakaç e Liu, 2002.

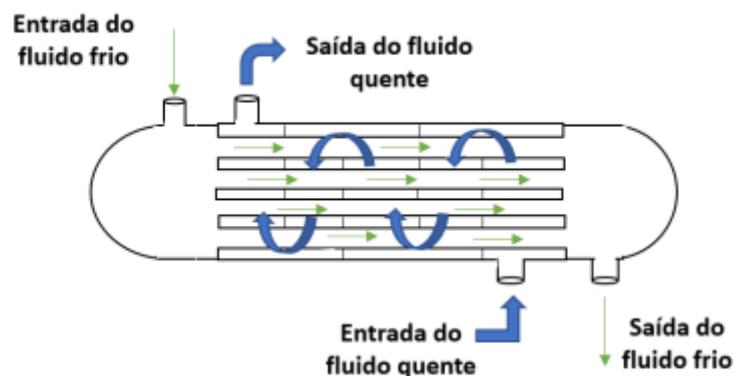
Assim, observa-se na Figura 4 as principais partes de um trocador de calor do tipo casco e tubo são: casco (1), feixe de tubos (2), espelho (3), defletores (4),

carretel (5), tampa do carretel (6), tampo do casco (7), bocais de entrada e saída do fluido dos tubos (8) e bocais de entrada e saída do fluido do casco (9).

4.1.2 Número de passes

O número de passes se refere ao trajeto percorrido pelos fluidos dentro dos tubos antes de saírem do trocador. Em um trocador de calor com apenas um passe, os fluidos entram e percorrem os tubos em um único trajeto, saindo pelo lado oposto. Essa configuração é chamada de passe simples e é amplamente utilizada em aplicações que buscam uma transferência do calor eficiente com um único percurso pelos tubos (Tadini *et al.*, 2016). Na Figura 6, pode-se observar um trocador de calor com apenas um passe:

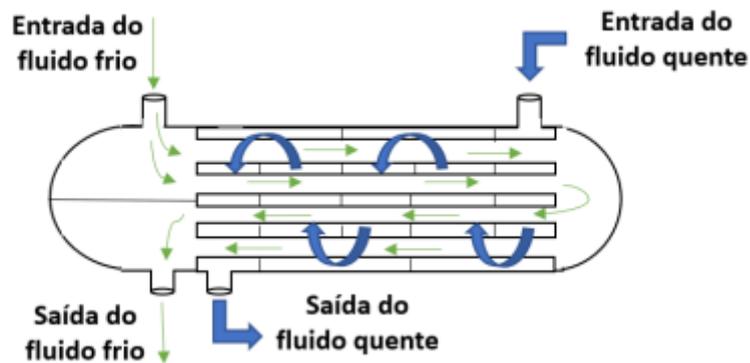
Figura 6 - Trocador de calor casco tubos de passe simples



Fonte: Adaptado de Geankoplis, 2003.

Por outro lado, nos trocadores de calor com múltiplos passes, os fluidos são direcionados a percorrer os tubos várias vezes antes de saírem do trocador. Essa configuração proporciona um trajeto de fluxo mais longo, aumentando a área de contato e melhorando a eficiência da transmissão de calor. Quando os fluidos circulam pelos tubos em duas passagens separadas, isso é denominado passe duplo (Tadini *et al.*, 2016). Na Figura 7, observa-se um trocador de calor de passe duplo:

Figura 7 - Trocador de calor casco tubos de passe duplo



Fonte: Adaptado de Geankoplis, 2003.

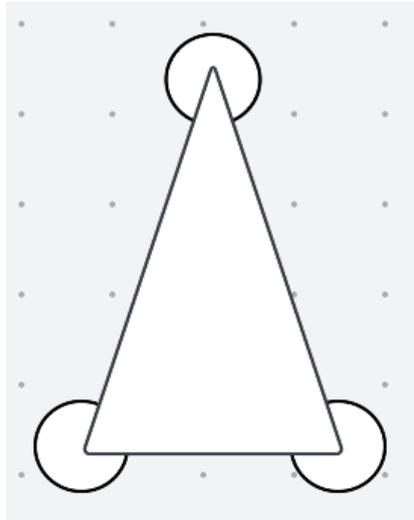
4.1.3 Arranjo dos Tubos

O arranjo dos tubos em um trocador de calor pode apresentar diferentes configurações, sendo os arranjos triangular e quadrado exemplos comuns. Essas configurações possuem características diferentes em relação à eficiência, compactação e facilidade de limpeza (Tadini *et al.*, 2016).

No arranjo triangular, os tubos são dispostos de maneira a formar um padrão triangular, onde cada tubo está adjacente a três outros. Essa configuração proporciona uma alta eficiência de transferência do calor, devido à grande área de superfície disponível para o contato entre os fluidos. Além disso, o arranjo triangular favorece a formação de turbulência no fluxo dos fluidos, o que melhora a transmissão de calor (Incropera *et al.*, 2014).

Contudo, essa disposição pode resultar em menor compactação, uma vez que há mais espaço vazio entre os tubos, ocupando uma área maior (Tadini *et al.*, 2016). Na Figura 8, mostra um exemplo de um arranjo de tubos triangular:

Figura 8 - Arranjo triangular



Fonte: Adaptação de Kuppan, 2000.

No arranjo quadrado, os tubos são dispostos perpendicularmente, tanto na horizontal quanto na vertical, formando uma grade quadrada. Essa configuração também proporciona alta eficiência de transmissão de calor, devido à grande área de superfície de contato. Além disso, o arranjo quadrado oferece uma boa compactação dos tubos, otimizando o espaço físico ocupado pelo trocador de calor. A disposição ordenada e regular dos tubos também facilita a limpeza individual de cada um (Tadini *et al.*, 2016). Na Figura 9, mostra-se um exemplo de um arranjo de tubos quadrado:

Figura 9 - Arranjo quadrado



Fonte: Adaptação de Kuppan, 2000.

4.1.4 Chicanas

Para aumentar a eficiência da transmissão de calor no lado do casco, são frequentemente utilizados defletores ou chicanas. Esses dispositivos são colocados no espaço do casco entre os tubos, direcionando o fluxo do fluido e promovendo turbulência adicional. Isso resulta em um aumento do coeficiente de transferência térmica e melhora o desempenho do trocador de calor. Além disso, os defletores desempenham a função de suportar os tubos, evitando vibrações excessivas (Kakaç e Liu, 2012).

Ao aumentar a turbulência do fluxo, as chicanas também ajudam a melhorar a transferência do calor em áreas de baixa velocidade do fluido, onde a transferência convectiva pode ser limitada. Elas promovem maior agitação do fluido nessas regiões, melhorando a transferência do calor por convecção e otimizando o desempenho do trocador de calor (Kuppan, 2000).

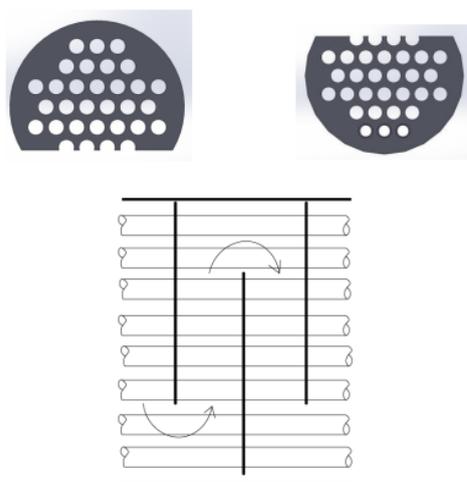
No entanto, é fundamental considerar que as chicanas também podem aumentar as perdas de carga no sistema, uma vez que introduzem obstáculos ao fluxo dos fluidos. Portanto, é necessário encontrar um equilíbrio entre a eficiência da transmissão de calor e as perdas de carga, selecionando o tipo de chicanas adequado e dimensionando corretamente o trocador de calor (Bichkar *et al.*, 2018).

As chicanas segmentais e duplamente segmentais são as mais utilizadas, pois desviam o fluxo de maneira eficaz entre os tubos. O espaçamento entre as chicanas normalmente varia entre 0,4 e 0,6 do diâmetro do casco. O corte das chicanas segmentais é definido com base no tamanho da abertura, em relação ao diâmetro interno do casco. Para chicanas segmentais, o corte varia de 20% a 30%, podendo chegar até 48%; nesse caso, porém, a chicana perde seu principal propósito de garantir o fluxo cruzado através do feixe tubular, assumindo apenas uma função de suporte adicional aos tubos. No caso das chicanas duplamente segmentais, a direção do corte é a mesma, mas o corte máximo permitido é de 30%, normalmente entre 20% e 25% (Kakaç, 2002).

As chicanas triplamente segmentadas e as chicanas sem tubos na janela do segmento são utilizadas em condições de baixa pressão, com espaçamento entre 0,3 e 0,5 em relação ao das chicanas segmentadas. As chicanas de disco e anel consistem em anéis externos e discos internos, que direcionam o escoamento radialmente através do campo de tubos. Outro tipo de chicana é a chicana de orifício, na qual o fluido do lado do casco flui através do espaço entre os tubos e o diâmetro do orifício da chicana (Kakaç, 2002).

Silva *et al.* (2022) mostrou, em seu estudo sobre o efeito causado pela distância entre os canais encontrados nas chicanas no processo de transferência de calor, que estas folgas são nulas e apresentam concordância com os demais resultados obtidos na literatura, apresentando erros menores a 3% e folgas de 0,2mm nos orifícios. Na Figura 10, observa-se um exemplo da utilização das chicanas:

Figura 10 - Chicanas



Fonte: adaptado Kern, 1999.

4.1.5 Distribuição dos Fluidos

A distribuição adequada de fluidos em um trocador de calor é crucial para garantir uma boa eficiência na transferência do calor. A maneira como o fluido é distribuído pelo trocador impacta diretamente a capacidade de troca térmica entre os meios envolvidos (Tadini *et al.*, 2016).

A má distribuição do fluido, juntamente com os efeitos de perda de carga, impacta negativamente o desempenho térmico dos trocadores de calor (Baek *et al.*, 2014). A má distribuição do fluido, juntamente com os efeitos de perda de carga, pode reduzir em até 25% a eficiência dos trocadores de calor, afetando significativamente seu desempenho térmico (Lalot *et al.*, 1999).

Com base em resultados experimentais e numéricos em trocadores de calor de placas aletadas, os autores Jiao *et al.* (2003), Raul *et al.* (2016), e Zhang e Li (2003) propuseram soluções para esse problema. Foi observado que a inserção de placas defletoras com múltiplos furos circulares, apresentando diâmetros menores

no centro e maiores nas laterais, resultou em menores razões de velocidade e coeficientes de não uniformidade, promovendo, assim, uma distribuição de fluxo mais uniforme.

A distribuição uniforme de fluidos assegura que todos os tubos ou canais do trocador de calor sejam percorridos eficientemente, garantindo que toda a superfície de troca térmica seja utilizada. Isso resulta em uma maior área de contato entre os fluidos, o que aumenta a transferência do calor (Kakaç e Liu, 2002).

Por outro lado, uma distribuição não uniforme de fluidos pode resultar em áreas com fluxo insuficiente, conhecidas como zonas mortas, onde a transferência do calor se torna ineficiente. Essas regiões podem levar a uma baixa eficiência térmica e à diminuição do desempenho geral do trocador de calor. Uma distribuição adequada de fluidos ajuda a minimizar essas zonas mortas, garantindo uma distribuição homogênea do fluxo (Tadini *et al.*, 2016).

Minimizar as perdas de carga é fundamental para garantir uma distribuição eficiente de fluidos em um trocador de calor. Uma distribuição adequada evita desequilíbrios de fluxo, e reduz as perdas de carga e o consumo de energia. Dessa forma, uma distribuição uniforme de fluidos contribui para a otimização da eficiência energética e da transmissão de calor no trocador (Kakaç e Liu, 2002).

4.1.6 Trocadores de Calor Tubulares

Os trocadores de calor tubulares são formados por tubos circulares, onde um fluido circula internamente enquanto o outro flui externamente aos tubos. Nas configurações desses trocadores, podem ser ajustados o diâmetro dos tubos, o arranjo, o comprimento, o número de tubos e a distância entre eles, conforme as necessidades do projeto (Kakaç e Liu, 2002). Segundo Santos (2017), os trocadores de calor tubulares classificam-se como:

a) Trocador de calor de tubo duplo

Um típico trocador de calor de tubo duplo consiste em tubos dispostos concentricamente, onde um tubo de diâmetro menor é inserido dentro de um tubo de diâmetro maior. Um fluido de uma determinada temperatura circula pelo tubo interno, enquanto um fluido com temperatura diferente flui pelo espaço entre os tubos (Da Silva e Konrath, 2019). Na figura 11, apresenta um exemplo de trocador de calor de tubo duplo:

Figura 11 - Exemplo de um trocador de calor de tubo duplo



Fonte: Adaptado de Kakaç, 2002.

b) Trocador de calor tipo serpentina

A configuração de um trocador de calor tipo serpentina é formada por uma ou mais serpentinas dispostas dentro de um invólucro. Esse tipo de trocador apresenta uma taxa de transferência do calor superior à de um trocador de calor de tubo duplo e tem a vantagem de acomodar uma maior área de superfície em um espaço reduzido (Silva, 2016). Na figura 12, ilustra uma serpentina do tipo espiral:

Figura 12 - Serpentina em espiral



Fonte: Adaptado de Biyik, 2015.

4.1.7 Trocadores de calor de placas

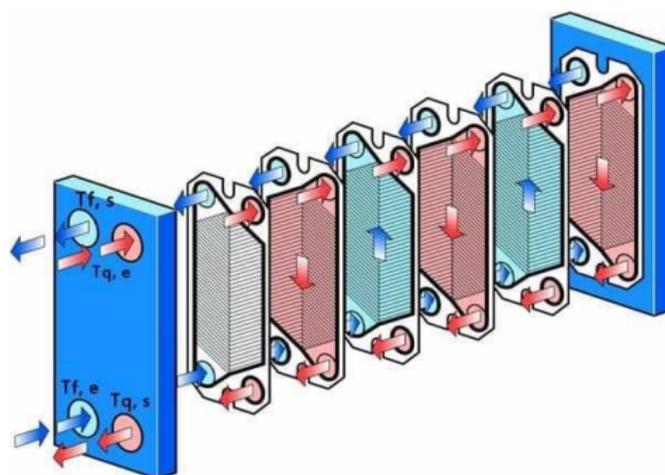
Os trocadores de calor de placas (TCP) foram introduzidos comercialmente na década de 30, destacando-se pela facilidade de higienização. No entanto, esses equipamentos ganharam popularidade apenas nos anos 60, como uma alternativa aos trocadores de calor do tipo casco e tubo (Kakaç e Liu, 2002).

Atualmente, os trocadores de calor de placas são amplamente utilizados em diversos processos de troca térmica entre líquidos e alimentos de baixa viscosidade,

como sucos (Gut e Pinto, 2003). Um trocador de calor de placas (TCP) é composto, basicamente, por um conjunto de finas placas metálicas retangulares, incluindo uma placa fixa, uma placa móvel, barras superior e inferior, além de parafusos que pressionam o conjunto de placas. Um único trocador pode suportar de 3 a 700 placas. Entre as placas, há gaxetas que formam canais estreitos de escoamento, permitindo que os fluidos quente e frio circulem alternadamente. O calor é trocado através das finas placas, que oferecem baixa resistência à transferência do calor (Mota, 2011).

O padrão de fluxo é frequentemente escolhido para que os fluidos escoem em contracorrente. Os trocadores de calor de placas são limitados a pressões inferiores a 25 bar e temperaturas abaixo de 250 °C (Kakaç e Liu, 2002). Na figura 13 pode se observar uma visão tridimensional de um trocador de calor a placas:

Figura 13 - Visão tridimensional de um trocador de calor de placas



Fonte: Gut, 2003.

4.1.8 Incrustação

A incrustação (*fouling*) refere-se a qualquer tipo de depósito indesejado na superfície de troca de calor, que aumenta significativamente as resistências à transmissão de calor e ao escoamento. Isso resulta em maior perda de carga sobre o fluido e, ao longo do tempo, reduz o desempenho térmico e hidráulico dos trocadores de calor (Baraldi, 2011).

A natureza da incrustação em um processo específico tem um impacto significativo no projeto do trocador de calor, na escolha do material e na programação das atividades de limpeza e manutenção (Baraldi, 2011). Recomenda-se que, se o fator de incrustação do fluido no lado do tubo for inferior a 0,00053 (m²·K)/W, sejam utilizados tubos com diâmetro externo de ¾ polegada (Araújo, 2002).

A incrustação na superfície dos trocadores de calor é um fenômeno que também influencia no procedimento térmico dos alimentos, como na pasteurização do leite (Boxler *et al.*, 2014). Com isso, a incrustação vai provocar uma redução na troca térmica e também na queda da pressão durante a prática de pasteurização, por isso, as indústrias, para manter a temperatura do produto no momento do *set point*, elevam a temperatura do meio de aquecimento, acrescentando mais vapor (Lewis *et al.*, 2009).

O estudo de Siqueira e Gutierrez (2015) onde seu objetivo foi estudar o caseinato de cálcio e a proteína isolada do soro do leite, mostrou diferenças significativas encontradas na estrutura do objeto na qual foi colocado sobre a técnica de incrustação, o que determina a eficácia e a importância desta técnica.

4.2 Tratamento Térmico em Alimentos

O tratamento térmico faz-se muito importante no processamento de alimentos, especialmente no que diz respeito à sua conservação. Esse processo envolve o aquecimento em trocadores de calor ou autoclaves, com o objetivo de inativar microrganismos patogênicos, agentes de deterioração e/ou enzimas indesejáveis (Fellows, 2006).

Assim, ocorre em três etapas: a primeira é o aquecimento, onde leva-se o alimento até a temperatura-alvo (conhecida como temperatura de processo); a segunda é a retenção, onde mantém o alimento nessa temperatura pelo tempo necessário para alcançar o grau de esterilização adequado; e a terceira é o resfriamento (Vaz Junior, 2010).

Os métodos de tratamento térmico mais comuns na indústria são a esterilização e pasteurização, podendo ser realizados de maneira descontínua ou contínua (Tadini *et al.*, 2016). Pode-se observar algumas aplicações dos trocadores de calor em alguns métodos de conservação no **Quadro 1** abaixo:

Quadro 1: Métodos de Conservação e o uso dos Trocadores de Calor

Métodos de conservação	Trocador de calor	Descrição do processo	Exemplos de alimentos	Referências
Pasteurização	Placas ou Tubular	Aquecimento rápido do alimento seguido de resfriamento rápido para eliminar microrganismos	Leite, sucos, cerveja	Allied Academies. (2023)
Esterilização	Tubular ou Placas	Aquecimento acima de 100 °C para destruição total de microrganismos	Alimentos enlatados (feijão, milho)	Ugwoke, N. I. et al.(2022)
UHT (Ultra High Temperature)	Placas ou Tubular	Aquecimento a 135–150 °C por 2–5 segundos	Leite UHT, cremes	Singh, H.; Wade, A. (2024)
Resfriamento rápido	Tubular, Placas ou Ar Forçado	Redução rápida da temperatura para inibir o crescimento microbiano	Carnes frescas, vegetais minimamente processados	Hussain, M. et al. (2022)
Congelamento rápido	Contato ou Ar Forçado	Redução da temperatura abaixo de -18 °C em pouco tempo	Frango, peixe, frutas congeladas	Raj, D. et al. (2024)
Refrigeração convencional	Serpentinas ou Placas	Manutenção do alimento em baixa temperatura (0–5 °C)	Laticínios, carnes fatiadas, embutidos	Yuan, Y. et al. (2017)
Congelamento criogênico	Contato com gás refrigerante	Uso de trocadores com nitrogênio ou CO ₂ líquidos para congelamento ultrarrápido	Camarões, morangos, pratos prontos gourmet	Lee, D. U. et al. (2000)
Secagem	Tubular com ar quente	Redução da umidade com ar quente aquecido indiretamente	Leite em pó, café solúvel	Ferreira, L. R. et al. (2023)
Liofilização	Placas ou Serpentinhas	O alimento é congelado rapidamente antes da sublimação	Frutas (morangos, bananas), refeições espaciais	Silva, J. R. et al. (2023)

Cocção industrial controlada	Tubular ou Placas	Cozimento com controle térmico para preservação e sabor	Pratos prontos, molhos envasados	Chaudhary, V. et al. (2022)
Aquecimento de líquidos viscosos	Trocador de superfície raspada	Permite o aquecimento homogêneo de produtos densos como molhos	Ketchup, polpa de tomate, doce de leite	Singh, R. P.; Heldman, D. R. (2013)
Pasteurização de bebidas	Tubular ou Placas	Aquecimento controlado para sucos, leites e cervejas	Sucos de frutas, leite achocolatado	Ungar, Sharon. (2023)
Túnel térmico para enlatados	Túnel com trocadores de calor	Aquecimento e resfriamento em etapas para conservação de enlatados	Sardinha, feijoada pronta, ervilha	Britannica. (2024)
Escaldamento	Placas ou Tubular	Pré-aquecimento para inativar enzimas antes do congelamento ou secagem	Brócolis, cenoura, ervilhas	Autores Online. (2023)
Cocção a baixa temperatura	Trocador com controle preciso de calor	Mantém temperatura constante para cozinhar e conservar alimentos embalados	Carnes sous-vide, legumes embalados a vácuo	Chaudhary, V. et al. (2022)

Fonte: O Autor (2025)

A conservação de alimentos por meio de trocadores de calor é amplamente utilizada na Indústria de Alimentos, garantindo a segurança microbiológica e a manutenção das características sensoriais do produto (Agarwal e Shanthi, 2014).

A tabela apresentada reúne 15 métodos que utilizam esse princípio, variando entre processos térmicos de aquecimento e resfriamento. Técnicas como pasteurização, esterilização e UHT são empregadas para destruir microrganismos patogênicos e deteriorantes, enquanto métodos como resfriamento rápido, congelamento e liofilização visam retardar o crescimento microbiano e prolongar a vida útil dos alimentos.

Cada método exige um tipo específico de trocador de calor, como placas, tubulares, serpentinas ou de superfície raspada, que são selecionados conforme a natureza do produto e os objetivos do processo. Por exemplo, alimentos líquidos e viscosos como sucos, leite ou molhos demandam trocadores que assegurem

aquecimento homogêneo e seguro, sem comprometer a qualidade. Já produtos sensíveis ao calor, como frutas e vegetais, podem passar por escaldamento ou congelamento rápido, métodos que preservam melhor os nutrientes e a textura.

4.2.1 Conservação pelo uso do frio

A conservação de alimentos através do frio, é uma das principais técnicas utilizadas, sendo alimentos de origem animal ou vegetal, pois atrasa a multiplicação de microrganismos e as reações químicas e enzimáticas (Cintra, 2014).

Ressalta-se que os microrganismos possuem uma faixa ideal de temperatura para se proliferar e crescer. Portanto, o princípio básico da conservação pelo frio é manter a temperatura abaixo dessa faixa, evitando assim a disseminação microbiológica. Da mesma forma, as reações enzimáticas ocorrem em temperaturas específicas, e o princípio para minimizá-las é semelhante: manter a temperatura abaixo da ideal (Lino, 2014).

4.2.1.1 Refrigeração

Esta prática é definida como a redução da temperatura dos alimentos para uma faixa entre $-1,5^{\circ}\text{C}$ e 10°C , servindo como uma medida temporária até que demais métodos de conservação sejam aplicados ou até que o alimento seja consumido. Esse método não elimina microrganismos, mas inibe seu ciclo de reprodução, o que retarda a deterioração dos alimentos. Isso impede que os microrganismos se desenvolvam a ponto de causar danos ao alimento, mantendo seus compostos originais e prolongando sua vida útil (Lino, 2014).

Neste processo, a prática de assepsia é fundamental para evitar o desenvolvimento de microrganismos nos ambientes de armazenagem, pois estes se proliferam mesmo em temperaturas próximas de 0°C (Cesar, 2008). Alguns alimentos são vulneráveis ao frio, como muitas frutas e hortaliças, que podem sofrer danos quando expostos a baixas temperaturas (entre 10°C e 13°C). Isso afeta a estrutura da membrana plasmática, resultando em alterações como murchamento das folhas, danos superficiais e mudanças na cor. Além disso, pode liberar compostos voláteis em alimentos como cebola, alho, pescados e frutas, enquanto que o leite e derivados, são suscetíveis à absorção desses compostos. Esse processo pode também levar à suspensão da firmeza e crocância em frutas e

hortaliças, levando ao envelhecimento de produtos de panificação e à aglomeração em produtos em pó (Azeredo, 2012).

4.2.1.2 Congelamento

O congelamento envolve a redução da temperatura para níveis entre -40°C e -10°C . Para que o congelamento seja efetivo, é recomendado que 80% da água livre no alimento seja convertida em gelo, o que resulta na redução ou estabilização da função metabólica dos microrganismos, e quando as condições favoráveis retornam, esses microrganismos podem retomar sua atividade metabólica (Cesar, 2008).

Em relação aos aspectos nutritivos e sensoriais, as gorduras e proteínas são os macronutrientes mais suscetíveis a alterações durante o armazenamento, apresentando perda de solubilidade e consistência nas proteínas. Contudo, podem ocorrer pequenas mudanças no valor nutritivo dos alimentos quando armazenados a temperaturas de -18°C por um período de um ano ou mais (Cesar, 2008).

O congelamento pode provocar danos nos tecidos dos alimentos em estoques com temperatura abaixo de seu ponto de congelamento, o que faz com que percam consistência e se tornem pegajosos após o descongelamento. Algumas verduras e frutas são particularmente vulneráveis a danos causados tanto pelo congelamento quanto pela refrigeração, conforme mencionado anteriormente. A gravidade dos danos por congelamento depende da combinação entre o tempo e a temperatura de exposição, similar ao que ocorre com os danos causados pela refrigeração (Azeredo, 2012).

4.2.2 Conservação pelo uso do calor

A aplicação do calor na conservação de alimentos baseia-se nos efeitos destrutivos das temperaturas altas direto nos microrganismos. Nesta técnica, o calor desnatura proteínas e inibe a ativação das enzimas essenciais para o metabolismo microbiano, eliminando assim parte dos microrganismos ou até mesmo todos que estiverem presentes. No entanto, o calor não apresenta efeito residual e após cessar sua ação, o alimento pode sofrer recontaminação (Lopes, 2007).

4.2.2.1 Branqueamento

Este é um dos tratamentos térmicos comumente aplicados no processamento de vegetais (frutas e hortaliças). Esta técnica baseia-se no ato de mergulhar os alimentos em água fervente, ajustando a temperatura conforme o tipo de vegetal, e após, retirá-los imediatamente e mergulhá-los em água fria para resfriá-los (Lopes, 2007). O objetivo do branqueamento é estabilizar a cor, reduzir a carga microbiana e inibir a ativação das enzimas que podem levar ao apodrecimento e ao escurecimento dos alimentos. Além disso, esse processo pode melhorar características sensoriais, como o amaciamento dos alimentos (Lopes, 2007).

4.2.2.2 Pasteurização

Seu principal objetivo é destruir microrganismos patogênicos que se encontram em determinado alimento (Azeredo, 2012). Esse tratamento térmico trabalha com temperaturas até 90°C, seguido de um rápido resfriamento. Como os microrganismos patogênicos são vulneráveis à temperaturas elevadas, este método garante a segurança alimentar e preserva as características naturais dos alimentos. Esse processo também inativa enzimas e elimina bactérias vegetativas, bolores e leveduras, sem comprometer significativamente os nutrientes e as características sensoriais dos alimentos. Além disso, contribui para prolongar a vida de estoque dos produtos, reduzindo as taxas de alterações microbiológicas e enzimáticas (Lopes, 2007).

4.2.2.3 Esterilização

A esterilização é um tratamento térmico realizado acima de 100°C, que inativa a ação de todos os microrganismos patogênicos e deterioradores que poderiam proliferar em condições normais de armazenamento. Não obstante, alimentos comercialmente estéreis podem conter pequenos números de esporos bacterianos, que geralmente não se multiplicam no alimento (Azeredo, 2012).

Neste quesito, as modificações sensoriais desse processo afetam cor, sabor, aroma e consistência dos alimentos. Essas modificações nutricionais envolvem a perda de vitamina C e, na ausência de oxigênio, também das vitaminas A e E, além da vitamina B1 em alimentos de baixa acidez (Azeredo, 2012).

4.2.2.4 Secagem

A secagem é definida como a remoção de água (desidratação) de determinado alimento sólido, transformando-a em vapor através da vaporização térmica, em uma temperatura abaixo do ponto de ebulição da água. Esse processo é uma alternativa para produtores de frutas e hortaliças, permitindo reduzir perdas pós-colheita, diversificar a apresentação dos produtos aos consumidores, aumentar o faturamento e fornecer matérias-primas de maior qualidade para a indústria de alimentos (Celestino, 2010).

Neste viés, o processo de secagem natural é realizado em regiões onde as temperaturas médias variam de 35 °C a 40 °C. Para garantir uma maior qualidade, a umidade do alimento deve ser reduzida de 50% a 70% sob a luz do sol, continuando a secagem à penumbra a fim de preservar sua cor e aroma natural (Celestino, 2010).

Todavia, no modo secagem artificial, utiliza-se instrumentos específicos nos quais os alimentos são colocados para desidratação por certo período de tempo, sendo esse processo denominado de batelada. Geralmente, utiliza-se ar quente em uma velocidade de 0,5 m/s a 3 m/s e baixa umidade, especialmente em processos onde há a transferência de calor por convecção. No entanto, a movimentação de calor também pode ocorrer por condução e radiação. É importante destacar que a preservação das vitaminas presentes nos alimentos secos artificialmente, é superior à dos alimentos secos ao sol (Celestino, 2010).

4.2.2.5 Apertização

É definida como o método de aquecimento de determinado alimento, inicialmente preparado em recipientes herméticos, utilizando o vácuo. O produto é submetido a altas temperaturas por certo período de tempo, visando a extinção dos microrganismos, sem alterar o resultado final do alimento (Filho, 2010).

A qualidade do produto submetido à apertização decorre do tempo de exposição ao calor e da temperatura utilizada, podendo resultar em alterações de suas características sensoriais e nutricionais (Estelles, 2003).

4.2.2.6 Tindalização

Este método abarca a submissão do alimento a altas temperaturas, variando entre 60 °C e 90 °C, durante alguns minutos, intercalados por períodos de

resfriamento. Assim, após, o alimento é aquecido novamente e refrigerado por um período de 24 horas, tempo necessário para que os esporos se transformem em formas vegetativas. Posteriormente, realiza-se um novo aquecimento, podendo haver de 3 a 12 ciclos de aquecimento para alcançar o nível desejado de esterilização. Tem-se como vantagem, a preservação das qualidades organolépticas do produto (Cesar, 2008).

4.2.3 Desidratação

Esta é uma técnica prática e rápida de utilizar a energia solar, pois melhora a qualidade dos nutrientes e garante a sua concentração, além de reduzir seu volume e seu peso. Esse processo também ajuda a evitar o desperdício de alimentos, pois permite a conservação do alimento por mais tempo e possibilita seu consumo durante as entressafras (Hammes, 2010).

Quanto à classificação da desidratação, existem três tipos: direta, indireta e mista. Considera-se direta, quando ocorre pela incidência direta do sol, e indireta quando o ar quente é acumulado em um coletor solar, que aquece o alimento em uma câmara. Por fim, a desidratação mista combina ambos os métodos, utilizando tanto o ar aquecido do coletor solar quanto a exposição direta ao sol (Dias, 2017).

4.2.4 Liofilização

Nesse processo, remove-se a água do alimento principalmente por sublimação. Deste modo, coloca-se o alimento que está congelado em um liofilizador à vácuo, a uma força de 1 mmHg, que promove a desidratação. Esta técnica inclui a preservação da matéria-prima e nutrientes presentes nos alimentos e hidrata rapidamente o produto seco (Celestino, 2010).

4.3. Uso dos Trocadores de Calor em Processamento de Alimentos

No **Quadro 2**, apresenta os tipos de trocadores de calor e seus principais usos no processamento de alimentos:

Quadro 2 - Trocadores de calor em processamento de alimentos

Tipos de Trocadores de Calor	Estrutura	Vantagens	Desvantagens	Aplicações em Alimentos	Referências
Casca e Tubo	Tubos dentro de um casco; fluxo separados	Robusto, confiável, fácil manutenção	Ocupa muito espaço, menos eficiente	Pasteurização de caldos, sucos	Jafari, S.M., et al., (2018)
Placas	Placas finas empilhadas com fluxos alternados	Alta eficiência térmica, fácil CIP	Não indicado para fluidos com sólidos grandes	Leite, sucos, cervejas	Abu-Khader, M. M. (2012)
Espiral	Tubulação enrolada em espiral com dois fluxos	Compacto, ideal para sólidos em suspensão	Difícil acesso para a limpeza manual	Molhos, purês, alimentos com fibras	Bhavsar, R. (2013)
Tubo Concêntrico	Dois tubos, um dentro do outro	Simples, barato, fácil de operar	Baixa eficiência térmica, difícil expansão	Cremses, iogurtes, coberturas	Capehart, B. L. (2007)
Superfície Raspada	Lâminas rotativas raspam o produto da parede	Evita incrustações, ideal para viscosos	Mais caro, manutenção mais frequente	Sorvetes, doce de leite	Ndoye, F. T., et al., (2018)
Regenerativo	Recupera o calor do produto já aquecido	Economia de energia	Exige fluxo contínuo	Leite, sucos	Fryer, P. J., Robbins, P. T. (2005)
Ar Forçado/Túnel de Resfriamento	Usa ar frio sobre os alimentos	Sem contato com líquidos, ideal para sólidos	Lento, maior fluxo energético	Pães, bolos, congelados	Sukmaway, G. M. D. P. et al., (2021)
Placas Brazadas ou Soldadas	Versão selada do trocador de placas	Alta pressão, compacto	Não desmontável, difícil limpeza	Óleos, xaropes, bebidas energéticas	Thermtest. (2021)
Trocador de calor de corrente cruzada	Fluxos se cruzam em ângulo, comum em gases	Bom para grandes volumes de ar	Baixa eficiência térmica	Secagem de alimentos, resfriamento de ar quente	Mdpi. (2021)
Trocador de calor de Fluido Térmico (com óleo)	Utilizam óleo térmico para aquecer alimentos	Alta temperatura com estabilidade	Mais lento que vapor, risco de contaminação	Fritadeiras industriais, torrefação	Thermtest. (2021)
	Canais				Cruz, G. G., et al

Microcanal	pequenos para maximizar transferência	Alta eficiência, design compacto	Muito sensível a entupimentos	Refrigeração de câmaras, sistemas compacto	(2021)
Tambor Rotativo com Vaporização	Cilindro giratório com aplicação de vapor ou ar quente	Uniformidade na secagem/aquecimento	Alto custo, operação complexa	Secagem de frutas, legumes, cereais	Saraceno, L., (2011)
Trocador de Leito Fluidizado	Produto suspenso por ar quente ou frio em movimento	Alta eficiência na troca térmica com sólidos	Mais caro, requer controle rigoroso	Congelamento rápido de vegetais	Sukmawaty, G. M. D. P., (2021)
Condensador na Superfície	Condensa vapor em superfície metálica refrigerada	Eficiência em recuperação de energia	Uso específico (vapor), manutenção	Condensação de vapor em evaporadores de alimentos	Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003)
Trocador de Ranhuras Helicoidais (Corrugado interno)	Tubos com ranhuras helicoidais para aumentar turbulências	Alta transferência térmica, bom para viscosos	Mais caro, difícil limpeza manual	Chocolates, cremes espessos	Cruz, G. G., et al (2021)

Fonte: O Autor (2025)

A tabela apresentada oferece uma visão abrangente dos principais tipos de trocadores de calor utilizados na indústria de alimentos, destacando suas características técnicas, vantagens, limitações e aplicações específicas.

Ela cobre desde os modelos mais tradicionais, como casco e tubos de trocadores de placas, até soluções mais especializadas como os de superfície raspada e os de leito fluidizado, usados para produtos de alta viscosidade ou com sólidos em suspensão. Cada tipo de trocador atende a diferentes demandas do setor alimentício, dependendo da natureza do produto processado, da exigência sanitária e da eficiência energética desejada.

Com o crescimento da demanda por alimentos processados com qualidade, segurança e eficiência, a seleção adequada do trocador de calor torna-se essencial. Por exemplo, o uso de trocadores regenerativos contribui para economia de energia em processos contínuos, enquanto os modelos de superfície raspada são fundamentais para produtos que tendem à incrustação, como doces espessos ou sorvetes. Ao integrar as referências acadêmicas para cada tipo de equipamento, a

tabela também se propõe a ser um recurso útil para estudos técnicos e projetos de engenharia de alimentos.

5 CONCLUSÃO

Baseando-se no que foi analisado no presente estudo, pode-se concluir que os trocadores de calor são itens de extrema importância na indústria de alimentos, ao passo que desempenham um papel essencial nos processos de conservação e transferência térmica. Isto se dá pelo fato de que sua aplicação é bastante ampla e abarca processos de resfriamento e aquecimento, como também, procedimentos de esterilização e pasteurização, o que garante a segurança microbiológica, a preservação de características sensoriais e a eficácia no sistema industrial.

Considerando a diversidade de aplicabilidade e tipos de trocadores de calor, sendo eles de placas, tubo, casco, serpentinas e os demais, assim como sua geometria, mecanismos de transferência de calor e fluxo, evidencia-se a facilidade de aplicação nas mais diferentes maneiras de operação, ao passo que, levando em consideração fatores como pressão, temperatura, critérios de eficiência e viscosidade dos fluidos, pode-se ter como resultado no sistema da indústria, a garantia do desempenho térmico e econômico no processo de produção.

Portanto, conforme foi mostrado na pesquisa em questão, selecionar, operar e fazer a manutenção dos trocadores de maneira adequada e considerando todas as variáveis envolvidas no processo de produção do alimento, garantem a qualidade na indústria alimentícia, assim como a sustentabilidade energética e menor impacto ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-KHADER, Mazen M. Plate heat exchangers: Recent advances. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 16(4), 1883–1891, 2012.

AGARWAL, P.; SHANTHI, V. Application of heat exchangers in bioprocess industry: a review. ***International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences***, v. 6, n. 1, p. 24–28, jan. 2014.

ALLIED ACADEMIES. The science of pasteurization: preserving food safety and quality. ***Journal of Food Technology and Preservation***, v. 10, n. 2, p. 45–52, 2023. Acesso em: 6 jun. 2025.

ARAÚJO, E. C. C. *Trocadores de Calor*. São Carlos: **EDUFSCAR**, 2002.

AUCTORES ONLINE. Thermal Processing in Food Preservation: A Comprehensive Review of Pasteurization, Sterilization, and Blanching. ***Journal of Nutrition and Food Science***, v. 4, n. 2, 2023. Acesso em: 6 jun. 2025.

AZEREDO, L. H. *Tecnologia de alimentos: conservação e qualidade*. 3. ed. Viçosa, MG: **Editora UFV**, 2012.

BAEK, J.; KIM, J.; LEE, S. Impact of fluid maldistribution and pressure drop on thermal performance of heat exchangers. ***International Journal of Heat and Mass Transfer***, v. 75, p. 320–329, 2014.

BARRETO, J. A.; COELHO, S. G.; *Tecnologia e perspectiva da produção de etanol no Brasil*. ***Revista Liberato***, Novo Hamburgo, v. 17, n. 27, p. 1–118, jan./jun. 2016.

BARALDI, A. *Monitoramento do desempenho térmico de trocadores de calor duplo tubo de uma planta Slurry*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BHAVSAR, R. Design and experimental analysis of spiral tube heat exchanger. ***International Journal of Engineering Research and Applications***, v. 3, n. 3, p. 1144–1149, 2013.

BICHKAR, R.; PATIL, M.; GADGE, S. Effect of baffle design on shell side heat transfer and pressure drop in shell and tube heat exchanger. ***International Journal of Heat and Mass Transfer Engineering***, v. 8, n. 1, p. 1–9, 2018. DOI: 10.17706/ijhtm.2018.8.1.1-9.

BOXLER, C.; AUGUSTIN, W.; SCHOLL, S. *Fouling of milk components on DLC coated surfaces at pasteurization and UHT temperatures*. ***Journal of Food Engineering***, v. 114, n. 1, p. 29–37, 2014.

BRITANNICA. Food preservation: sterilization. ***Encyclopædia Britannica***, 2024. Acesso em: 6 jun. 2025.

CAPEHART, Barney. L. (Ed.). **Encyclopedia of Energy Engineering and Technology**. CRC Press, 2007.

CAVALCANTE, L. T. C.; OLIVEIRA, A. A. S. *Métodos de revisão bibliográfica nos estudos científicos*. **Psicologia em Revista (Belo Horizonte)**, Belo Horizonte, v. 26, n. 1, p. 83–102, jan./abr. 2020.

CELESTINO, A. P. *Tecnologia de secagem de alimentos: fundamentos e aplicações*. São Paulo: **Editora Blucher**, 2010.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Ahsan J. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 4. ed. **New York: McGraw-Hill**, 921 p. 2011.

CESAR, R. A. *Controle microbiológico em ambientes refrigerados: práticas de assepsia e conservação*. São Paulo: **Editora Atlas**, 2008.

CHAUDHARY, V. et al. Heating unit operations in food processing: an overview. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, 2022. Acesso em: 6 jun. 2025.

CINTRA, P. Métodos de conservação de alimentos: conservação pelo uso do frio. In: ESTÁCIO (Org.). **Métodos de conservação de alimentos**. São Paulo: Estácio, out. 2014.

CRUZ, Gonçalo. G. et al. Experimental and numerical characterization of single-phase pressure drop and heat transfer enhancement in helical corrugated tubes, 2021.

CRUZ, R. C. et al. Uso de absorvedores de oxigênio na conservação de alimentos: princípios e aplicações. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 1, n. 2, p. 45-53, 2005.

DA SILVA, M. R.; KONRATH, C. E. *Trocadores de calor: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: **Editora Técnica**, 350 p. 2019.

DIAS, M. F. *Técnicas de desidratação solar de alimentos: classificação e aplicações*. Fortaleza: **Universidade Federal do Ceará**, 2017.

ESTELLES, A. *Apertização de alimentos: fundamentos e impactos na qualidade*. Valencia: **Universitat de València**, 2003.

FELLOWS, P. J. *Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática*. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

FERREIRA, L. R. et al. Innovations in spray drying of food products. **Food Engineering Reviews**, v. 15, n. 3, 2023. Acesso em: 6 jun. 2025.

FERREIRA, M. P. **Avaliação teórica do desempenho de um trocador de calor a placas empregado em um processo de uma indústria alimentícia**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

FILHO, J. M. F. *Tecnologias de conservação de alimentos: métodos térmicos e não térmicos*. Rio de Janeiro: **Editora Interciência**, 2010.

FIORILLO, A. *Fundamentos de transferência de calor e massa*. 2. ed. São Paulo: **Edgard Blücher**, 462 p. 2010.

FRYER, P. J., & ROBBINS, P. T. Heat transfer in food processing: Ensuring product quality and safety. *Applied Thermal Engineering*, 25(16), 2499–2510, 2005.

GARDENAL, A. L.; SGUARIO, M. K.. **Avaliação do desempenho de trocadores de calor**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GUERRA, Celito et al. Sistema *tubo em tubo* para elaboração de suco de uva integral em pequenos volumes. *Sistema para elaboração de suco de uva integral em pequenos volumes: Suquificador Integral*, **Embrapa Uva e Vinho**, 2016.

GUT, J. A. W.; PINTO, J. M. *Selecting Optimal Configurations for Multisection Plate Heat Exchangers in Pasteurization Processes*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 42, n. 24, p. 6112–6124, out. 2003.

HAMMES, W. P. *Conservação de alimentos por métodos naturais: processos práticos e vantagens*. São Paulo: **Editora Blucher**, 2010.

HUSSAIN, M. et al. Recent innovations in rapid cooling systems for meat preservation. *Journal of Food Engineering*, v. 336, 2022. Acesso em: 6 jun. 2025.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7. ed. **Hoboken**, NJ: John Wiley & Sons, 960 p. 2013.

INCROPERA, F. P. et al. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

JAFARI, Seid. Mahdi *et al.* Designing and application of a shell and tube heat exchanger for nanofluid thermal processing of liquid food products. *Journal of Food Process Engineering*, 41(3), 2018.

JIAO, K.; LI, J.; CHEN, Y. Experimental and numerical investigation of heat transfer in finned plate heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 46, n. 15, p. 2707–2717, 2003.

KAKAÇ, S.; LIU, H. *Heat exchangers: selection, rating, and thermal design*. 3. ed. **Boca Raton**: **CRC Press**, 794 p. 2012.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. *Principles of Heat Transfer*. 7. ed. Stamford, CT; Singapore: Cengage Learning, 2011. 696 p.

- KUPPAN, T. *Heat exchanger design handbook*. 2. ed. **New York: Marcel Dekker**, 748 p. 2000.
- LALOT, T.; VOSGERAU, H.; KERN, D. Impact of fluid maldistribution on heat exchanger efficiency. *Heat Transfer Engineering*, v. 20, n. 2, p. 45–53, 1999.
- LEE, D. U. et al. Cryomechanical freezing and its applications in food. *Journal of Food Engineering*, v. 43, n. 4, 2000. Acesso em: 6 jun. 2025.
- LEWIS, Michael J.; HEPPELL, Neil J. *Continuous thermal processing of foods: pasteurization and UHT sterilization*. **Cambridge: Woodhead Publishing**, 2000.
- LINO, G. C. L.; LINO, T. H. L. *Congelamento e refrigeração*. Londrina: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2014. p. 52–53.
- LOPES, R. M. *Conservação de alimentos por tratamentos térmicos*. Rio de Janeiro: **Elsevier**, 2007.
- MARCON, Â. R., Avaliação da incorporação de água exógena em suco de uva elaborado por diferentes processos. Dissertação (Mestrado) – **Repositório Institucional da UCS**, 2013.
- MDPI. Performance of Pure Crossflow Heat Exchanger in Sensible Heat Transfer Application. *Energies*, 14(17), 5489, 2021.
- MOTA, R. C. *Trocadores de calor de placas: conceitos e construção*. São Paulo: Editora Técnica, 320 p. 2011.
- NDOYE, Fatou Toutie *et al.* Influence of operating conditions on residence time distributions in a scraped surface heat exchanger during aerated sorbet production. *Journal of Food Engineering*, 222, 126–138, 2018.
- PUNTEL, L. A. *Análise e modelagem térmica de trocadores de calor casco e tubo*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- RAJ, D. et al. Recent developments in freezing of fruits and vegetables: striving for better quality and safety. *Journal of Food Science*, v. 88, n. 3, p. 1234–1245, 2024. Acesso em: 6 jun. 2025.
- RAUL, R. S.; SINGH, M.; KUMAR, A. Numerical simulation and experimental validation of thermal performance in plate heat exchangers with fins. *Applied Thermal Engineering*, v. 106, p. 462–472, 2016.
- RIBAS, M. A. *Estudo do processo de pasteurização e resfriamento de suco de uva em contracorrente*. Dissertação (Mestrado) – **Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2023.
- SANTOS, R. F. *Classificação dos trocadores de calor tubulares*. 2017. Trabalho acadêmico (Graduação) – **Universidade Federal de Engenharia**, 2017.

SARACENO, L. *et al.* Development of two heat transfer correlations for a scraped surface heat exchanger in an ice-cream machine. ***Applied Thermal Engineering***, 31(17-18), 4106–4112, 2011.

SHAH, Ramesh K., & SEKULIC, Dusan P. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. ***John Wiley & Sons***, 2003.

SILVA, J. R. *et al.* Advances in spray-freeze-drying of food and pharmaceuticals. ***Food Chemistry***, v. 403, 2023. Acesso em: 6 jun. 2025.

SILVA, Lucas. *Introdução à transferência de calor*. Academia.edu, 2016.

SILVA, A. B.; OLIVEIRA, C. D.; PEREIRA, E. F. Estudo do efeito da distância entre canais nas chicanas na transferência de calor em trocadores de calor. ***Revista Brasileira de Engenharia Térmica***, v. 21, n. 4, p. 321-330, 2022.

SINGH, H.; WADE, A. Ultra-high temperature processing and aseptic packaging of dairy products: a review. ***Journal of Dairy Science***, v. 70, n. 5, p. 1005–1010, 2024. Acesso em: 6 jun. 2025.

SIQUEIRA, L. V.; GUTIERREZ, C. G. C. C. Estudo experimental de incrustação em trocadores de calor no processo de pasteurização do leite. ***Blucher Chemical Engineering Proceedings***, São Paulo, v. 1, n. 3, p. 1980–1985, jun. 2015.

SUKMAWATY, G. M. D. P., ASMORO, I., *et al.* Heat transfer analysis in fluidized bed dryer with heat exchanger pipe for corn material. ***IOP Conference Series: Earth and Environmental Science***, 913(1), 2021.

TADINI, I.; FERREIRA, C.; SILVA, J. M. *Transferência de calor em trocadores de calor: análise e aplicações*. ***Revista Brasileira de Engenharia Térmica***, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 145-158, 2016.

THERMTEST. *Heat Exchangers and Thermal Fluids in the Food Processing Industry*, 2021.

UGWOKE, N. I. *et al.* Thermal processing: a key method in food preservation. ***International Research Journal of Public and Environmental Health***, v. 9, n. 2, 2022. Acesso em: 6 jun. 2025.

UNGAR, Sharon. The science of pasteurization: preserving food safety and quality. ***Journal of Food Technology and Preservation***, v. 7, n. 2, p. 169, 2023. Acesso em: 6 jun. 2025.

VAZ JUNIOR, I. Processamento de alimentos por altas temperaturas. In: VAZ JUNIOR, I. (Org.). *Tecnologia de alimentos*. São Paulo: Blucher, 2010. cap. 5.

YUAN, Y. *et al.* Active refrigeration technologies in modern food preservation. ***Trends in Food Science & Technology***, v. 68, 2017. Acesso em: 6 jun. 2025.

ZAMBELLI, V. *Tecnologia de alimentos: princípios e práticas*. 2. ed. São Paulo: **Editora Varela**. 432 p. 2011.

ZHANG, X.; LI, Q. Heat transfer enhancement in finned plate heat exchangers: experimental study and numerical analysis. ***Heat and Mass Transfer***, v. 39, n. 6, p. 493–500, 2003.