



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ADRIEL MANCILHA DA SILVA

**ANÁLISE DO EMPREGO DA REFRIGERAÇÃO DE ALIMENTOS NO BRASIL**

Cabo de Santo Agostinho - PE

2025

ADRIEL MANCILHA DA SILVA

**ANÁLISE DO EMPREGO DA REFRIGERAÇÃO DE ALIMENTOS NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Soares da Silva

Cabo de Santo Agostinho

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

S586a Silva, Adriel Mancilha da.  
Análise do emprego da refrigeração de alimentos  
no Brasil / Adriel Mancilha da Silva. - Cabo de  
Santo Agostinho, 2025.  
73 f.; il.

Orientador(a): Rogério Soares da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –  
Universidade Federal Rural de Pernambuco,  
Unidade Acadêmica Cabo de Santo Agostinho -  
UACSA, Bacharelado em Engenharia Mecânica,  
Cabo de Santo Agostinho, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Conservação de alimentos pelo frio. 2.  
Congelamento. 3. Alimentos - Conservação. 4.  
Acondicionamento e conservação de alimentos I.  
Silva, Rogério Soares da, orient. II. Título

CDD 620.1

ADRIEL MANCILHA DA SILVA

**ANÁLISE DO EMPREGO DA REFRIGERAÇÃO DE ALIMENTOS NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 24 de fevereiro de 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rogério Soares da Silva (Orientador)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UACSA

---

Prof. MSc. Alexandre Douglas Araujo de Moura (Examinador Interno)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UACSA

---

Prof. Dra. Edilma Pereira Oliveira (Examinador Interno)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UACSA

Cabo de Santo Agostinho

2025

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me abençoar durante toda minha jornada acadêmica, me dando sabedoria, resiliência e paciência. Guiando-me sabiamente em cada decisão e rota que deveria tomar nos momentos cruciais de minha graduação.

Agradecer aos meus pais, minha mãe Rosely Mancilha e meu pai Paulo Barbosa, por todo o esforço, a dedicação a família e a preocupação desde cedo com minha educação a fim de me tornar uma pessoa dedicada, me doando sempre ao máximo e comprometido a fazer o melhor. Sou grato por suas orações, conselhos e orientações que me moldam e que ecoarão eternamente em minha mente me guiando na vida. Agradecer ao meu irmão Uriel, por todo seu apoio e por ser um grande ouvinte e também aconselhador em momentos importantes de minha jornada.

Ao meu amigo da universidade César Augusto, que de forma também resiliente tem traçado essa jornada comigo, mas que em momentos oportunos foi de grande apoio e um excelente amigo.

Expresso também minha gratidão ao meu orientador Rogério Soares por seu voto de confiança a mim, paciência, por todo o conhecimento compartilhado em minha trajetória e por seu crédito ao trabalho desenvolvido.

Por fim agradeço a todos que estiveram direta e indiretamente envolvidos em minha carreira acadêmica, torcendo de forma positiva pelo meu sucesso.

Gratidão a todos!

## RESUMO

Este trabalho analisa a importância da refrigeração na conservação de alimentos em face do aumento populacional e da demanda crescente por alimentos. Discute-se a evolução das técnicas de armazenamento, práticas inovadoras, destacando a refrigeração como essencial para garantir a segurança alimentar. Desafios como o impacto ambiental e a acessibilidade são abordados, assim como oportunidades para desenvolver tecnologias sustentáveis. Em última análise, o objetivo é promover a segurança alimentar, reduzir o desperdício e avançar em direção à sustentabilidade na refrigeração de alimentos.

**Palavras-chave:** conservação de alimentos; refrigeração; sustentabilidade; inovação; acesso à refrigeração; impacto ambiental.

## **ABSTRACT**

This work analyzes the importance of refrigeration in food conservation in the face of population growth and growing demand for food. The evolution of storage techniques and innovative practices are discussed, highlighting refrigeration as essential to guarantee food safety. Challenges such as environmental impact and accessibility are addressed, as well as opportunities to develop sustainable technologies. Ultimately, the goal is to promote food safety, reduce waste and move toward sustainability in food refrigeration.

**Keywords:** food preservation; refrigeration; sustainability; innovation; refrigeration accessibility; environmental impact.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>12</b>
<b>4 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
4.1. HISTÓRIA DA REFRIGERAÇÃO DE ALIMENTOS NO BRASIL.....	13
4.2. CRESCIMENTO DO SETOR DE ALIMENTOS NO PAÍS.....	15
4.3. IMPORTÂNCIA DA CADEIA DO FRIO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA .....	16
4.4. RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO DE ALIMENTOS: FUNDAMENTOS, BENEFÍCIOS E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE TEMPERATURAS .....	18
4.5. PROLONGAMENTO DA VIDA ÚTIL DOS ALIMENTOS .....	21
4.6. CICLOS DE REFRIGERAÇÃO COMUNS NO SETOR ALIMENTÍCIO .....	24
4.7. DESAFIOS E PERDAS NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS .....	30
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
5.1 TECNOLOGIAS DE REFRIGERAÇÃO PARA CONSERVAÇÃO DE ALIMENTOS .	33
5.1.1 Fluidos refrigerantes na conservação de alimentos .....	33
5.1.2. Isolamento térmico .....	39
5.1.3. Compressores para sistemas de refrigeração .....	42
5.1.4. Evaporadores .....	47
5.1.5. Métodos Avançados de Refrigeração e suas Aplicações no Brasil .....	51
5.1.6. A Amônia (NH <sub>3</sub> ) e o Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) como alternativas de fluidos refrigerantes .....	56
5.2. SETORES DE APLICAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO .....	57
5.2.1. Indústria de alimentos.....	57
5.2.2. Agricultura e pecuária .....	58
5.2.3. Supermercados e varejo.....	60
5.2.4. Restaurantes e serviços de alimentação.....	61
5.2.5. Logística e transporte de alimentos .....	62
<b>6 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>63</b>
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A alimentação é um dos pilares de manutenção da vida humana. Um hábito que ao longo da história passou por diversas mudanças devido a evolução das necessidades do homem. Sendo assim, a necessidade por conservação e armazenamento de alimentos remonta desde os primórdios da humanidade. Primeiramente com os humanos primitivos, que precisavam armazenar alimentos para enfrentar grandes períodos de escassez, como invernos rigorosos ou secas prolongadas. Métodos rudimentares, como secagem ao sol e a defumação eram usados para prolongar a vida útil dos alimentos. Com o passar do tempo e o desenvolvimento de civilizações, surgiram técnicas mais sofisticadas, sendo hoje a preocupação com a conservação de alimentos uma realidade mundial. Segundo Silva (2018), por conta do crescimento populacional, tornou-se vital o desenvolvimento de técnicas que pudessem aumentar a produção de alimentos e gerassem um maior tempo de vida útil no armazenamento.

A crescente produção de alimentos trouxe consigo a necessidade de armazenar os excedentes. Dentro deste contexto foi possível notar particularidades, que possibilitaram o surgimento dos processos de conservação e aumento de vida útil, dentre eles a secagem, salga, resfriamento e congelamento.

A refrigeração de alimentos é uma prática fundamental para garantir a segurança alimentar e retardar a deterioração dos alimentos. Desde os tempos antigos, os seres humanos têm buscado maneiras de preservar alimentos, inicialmente utilizando métodos simples, como armazenamento em abrigos subterrâneos ou semissubterrâneos, com temperaturas geralmente entre 10 °C e 15 °C conhecidos caves frescas ou em casos de haver necessidade de transportar e armazenar produtos perecíveis em curto prazo, os alimentos eram embalados em gelo, que mantêm a temperatura baixa, método conhecido como embalagem em gelo ou neve. Com o avanço da tecnologia, a refrigeração evoluiu para formas mais sofisticadas, como a utilização de geladeiras e freezers. Essa evolução permitiu não apenas aumentar a vida útil dos alimentos, mas também preservar seu sabor, coloração, propriedades nutricionais e garantir a saúde do consumidor. No cenário mundial, a quantidade de comida produzida não é mais o tema principal, mas sim a qualidade e a sanidade do alimento. Segundo o Instituto Internacional de Refrigeração (IIR), ao longo de um ano são produzidas aproximadamente 1,661 bilhões de toneladas de alimentos, mas 475 milhões de toneladas são perdidas devido à

falta de refrigeração adequada. Essas perdas são particularmente elevadas em países em desenvolvimento, onde a capacidade de refrigeração é muito menor do que está disponível em países desenvolvidos.

No entanto, ainda existem desafios a serem superados. Um desses desafios é a acessibilidade ao transporte e armazenamento. Muitos produtores rurais e pequenos comerciantes têm limitações a equipamentos de refrigeração adequado devido à falta de acessibilidade, em geral devido ao custo inicial elevado visto que equipamentos de refrigeração modernos podem ser caros, a manutenção e operação destes equipamentos, a dificuldade de acesso à energia elétrica, a falta de capacitação técnica para operar os equipamentos, a falta de financiamento ou subsídios governamentais específicos para adoção dessas tecnologias e as condições ambientais.

Além disso, a sustentabilidade da refrigeração de alimentos também é um desafio. A refrigeração consome uma grande quantidade de energia elétrica, o que pode ter um impacto significativo no meio ambiente. Portanto, é necessário investir em tecnologias mais eficientes e sustentáveis para reduzir o impacto ambiental da refrigeração. Exemplos incluem o uso de soluções mais modernas como o Ciclo de Refrigeração Transcrítico de CO<sub>2</sub> (sistema que utiliza CO<sub>2</sub> como único fluido refrigerante, operando acima do ponto crítico do CO<sub>2</sub>), compressores de velocidade variável, isolamento avançado, tecnologias de recuperação de calor, gestão de energia inteligente, armazenamento térmico, energia solar, sistemas de absorção, monitoramento e controle avançado. Ao implementar essas soluções e promover a conscientização sobre a importância da sustentabilidade, podemos reduzir o impacto ambiental da refrigeração de alimentos.

Apesar desses desafios, existem também oportunidades. A crescente demanda por alimentos seguros e de alta qualidade oferece oportunidades para o desenvolvimento de novas tecnologias e práticas de refrigeração. Além disso, a necessidade de reduzir o desperdício de alimentos também cria oportunidades para inovações na refrigeração (Silva, 2018).

A integração de sensores de rastreamento em tempo real, juntamente com embalagens ativas e inteligentes, possibilita o controle da qualidade dos alimentos e a extensão de sua vida útil. Além disso, soluções de refrigeração móvel e miniaturizada, como geladeiras solares e caixas de resfriamento de baixo consumo de energia, são ideais para áreas com acesso limitado à eletricidade. Tecnologias emergentes, como a refrigeração magnética de estado

sólido, têm o potencial de melhorar a eficiência energética e reduzir a dependência de refrigerantes químicos. Tudo isso contribui para atender às crescentes demandas por alimentos frescos e reduzir o desperdício (Silva, 2018).

Além disso, a inovação na refrigeração desempenha um papel fundamental na redução do desperdício de alimentos. Sistemas de refrigeração a vácuo, tecnologias de resfriamento de precisão, refrigeração magnética e refrigeração criogênica são algumas das soluções que podem ajudar a melhorar a eficiência e a qualidade do armazenamento de alimentos. O armazenamento de energia renovável para refrigeração também se mostra promissor, garantindo que os alimentos permaneçam frescos durante interrupções de energia elétrica da rede principal.

Em resumo, a refrigeração de alimentos no Brasil é uma prática essencial que tem um impacto significativo na indústria alimentícia, na agricultura e na sociedade como um todo. Apesar dos desafios existentes, há também muitas oportunidades para inovação e melhoria. Com investimento em pesquisa e desenvolvimento, é possível superar esses desafios e aproveitar as oportunidades para melhorar a segurança alimentar, reduzir o desperdício e promover a sustentabilidade.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste estudo é analisar o uso da refrigeração de alimentos no Brasil, avaliando seu impacto na segurança alimentar, na qualidade dos produtos, na sustentabilidade da cadeia de abastecimento e nos custos envolvidos, considerando o contexto de diferentes tipos de alimentos, como carnes e hortifrutigranjeiros, ao longo da cadeia de produção, transporte, armazenamento e consumo.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Investigar as tecnologias e práticas de refrigeração de alimentos mais comuns utilizadas no Brasil, destacando as inovações e tendências, bem como os fluidos refrigerantes empregados e sua conformidade com os critérios de baixo impacto ambiental, como ODP (Potencial de Destruição do Ozônio) e GWP (Potencial de Aquecimento Global).

- Avaliar o impacto da refrigeração na redução do desperdício de alimentos ao longo da cadeia de produção, distribuição e consumo, considerando a influência de diferentes tipos de alimentos e sistemas de refrigeração.
- Analisar os desafios e oportunidades relacionados à refrigeração de alimentos no contexto brasileiro, incluindo questões de acessibilidade, infraestrutura e sustentabilidade, bem como a adoção de sistemas mais modernos de refrigeração, como a refrigeração magnética de estado sólido, para reduzir os impactos negativos ao meio ambiente e melhorar a eficiência energética.

### 3 METODOLOGIA

Será realizada uma revisão bibliográfica abrangente sobre o tema da refrigeração de alimentos no Brasil, incluindo aspectos históricos, técnicos, econômicos e ambientais. Serão consultados fontes acadêmicas, relatórios governamentais, dados estatísticos, estudos de caso e literatura técnica relevante. A revisão bibliográfica permitirá uma compreensão aprofundada do estado atual do uso da refrigeração de alimentos no país, bem como dos desafios e oportunidades associados.

Será conduzido um levantamento de dados primários e secundários para coletar informações sobre o uso da refrigeração de alimentos no Brasil. Serão considerados dados estatísticos sobre produção, consumo, desperdício, eficiência energética, tecnologias de refrigeração empregadas, entre outros aspectos relevantes. Os dados serão obtidos de fontes confiáveis, como instituições governamentais, associações setoriais, empresas do setor de alimentos e pesquisas acadêmicas.

Serão definidos os termos de busca que serão utilizados para identificar a literatura relevante sobre refrigeração de alimentos no contexto brasileiro. Os termos de busca incluirão palavras-chave como "refrigeração de alimentos", "segurança alimentar", "desperdício de alimentos", "tecnologias de refrigeração", "sustentabilidade", entre outros, combinados com "Brasil".

Os dados relevantes serão coletados a partir das fontes de informação selecionadas, utilizando-se métodos como acesso a bases de dados acadêmicas (por exemplo, *PubMed*,

*Scopus, Web of Science*), consulta a bibliotecas digitais e físicas, busca em repositórios institucionais e contatos com autores de estudos relevantes.

Os dados coletados serão analisados e sintetizados de forma sistemática, identificando padrões, tendências, lacunas de conhecimento e insights relevantes sobre o tema da refrigeração de alimentos no Brasil. Serão utilizadas técnicas de análise qualitativa e quantitativa, conforme apropriado para cada tipo de informação.

## **4 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **4.1. HISTÓRIA DA REFRIGERAÇÃO DE ALIMENTOS NO BRASIL**

A história da refrigeração de alimentos no Brasil remonta a uma evolução significativa na forma como os alimentos são armazenados e distribuídos no país. Embora não haja uma referência direta nas fontes fornecidas à história específica do Brasil, é possível traçar paralelos com o contexto global. O advento da refrigeração, conforme destacado por Dupont, El Ahmar e Guilpart (2009), teve um impacto profundo na nutrição em todo o mundo, desempenhando um papel fundamental na conservação de alimentos e na expansão do acesso a produtos perecíveis.

No cenário brasileiro, a história da refrigeração de alimentos está intimamente ligada ao crescimento do setor agroindustrial e à expansão das cadeias de produção e distribuição de alimentos. A introdução de tecnologias de refrigeração permitiu o armazenamento de alimentos perecíveis por períodos mais longos, abrindo portas para o desenvolvimento da indústria de alimentos no país. Embora as fontes não ofereçam dados específicos sobre a cronologia desse desenvolvimento no Brasil, pode-se inferir que a refrigeração desempenhou um papel crucial no crescimento do setor de alimentos (Abreu *et al.*, 2018)

À medida que o Brasil se tornou um importante produtor e exportador de alimentos, a necessidade de garantir a qualidade e a segurança dos produtos refrigerados se tornou cada vez mais evidente. A introdução de tecnologias avançadas, como monitoramento da cadeia do frio, sistemas de rastreamento e logística eficiente, foi essencial para atender às demandas crescentes de um mercado em expansão. A pesquisa de Spagnol *et al.* (2017) destaca os

avanços tecnológicos na monitorização da cadeia do frio, fornecendo insights sobre como o Brasil tem investido em garantir a qualidade dos alimentos refrigerados.

A história da refrigeração de alimentos no Brasil não se limita apenas às questões tecnológicas, mas também envolve desafios como o transporte de produtos perecíveis em um país de dimensões continentais. Portanto, é necessário considerar os aspectos logísticos envolvidos na cadeia de frio que desempenham um papel crítico na preservação da qualidade dos alimentos. A referência de Abreu et al. (2018) aborda a gestão de qualidade no transporte de alimentos perecíveis, evidenciando a importância de práticas logísticas eficazes.

A invenção do microscópio no século XVI por Hans Janssen e Zacharias Janssen revelou a presença abundante de microrganismos, amplamente disseminados na água e nos alimentos, imperceptíveis a olho nu. Dentre esses microrganismos, estão as bactérias responsáveis pela decomposição dos alimentos e o desencadeamento de diversas doenças e epidemias. Cientistas notáveis, incluindo o renomado químico francês Louis Pasteur, demonstraram que a proliferação dessas bactérias poderia ser impedida ou controlada pela aplicação do frio, ou seja, pela redução da temperatura ambiente (Zanotti, s.d.).

No século XVIII, essas descobertas impulsionaram a expansão da indústria do gelo, reduzindo a dependência da obtenção natural de gelo, que estava limitada ao inverno e a regiões frias, sujeita a problemas de fornecimento irregulares. Em 1834, Jacob Perkins criou a primeira patente de refrigeração com base na compressão de vapor, fundamentada na teoria de Oliver Evans. Nos Estados Unidos, surgiu o primeiro sistema mecânico de fabricação e gelo artificial, servindo como precursor dos sistemas de compressão frigorífica modernos. Em 1855, na Alemanha, foi desenvolvido outro método para produzir gelo artificial, utilizando o princípio da absorção, concebido em 1824 por Michael Faraday. Em 1861, a primeira fábrica de congelamento de carne do mundo foi estabelecida na Austrália, empregando compressores de amônia, inventados por Ferdinand Carré em 1860. Em 1949, Clarence Birdseye inovou ao criar um sistema eficaz de congelamento rápido a seco, reduzindo o tempo de processamento para apenas uma hora e meia. Essas descobertas e avanços na indústria de refrigeração, aliados à eletricidade, pavimentaram o caminho para a criação dos modernos sistemas de refrigeração eletrônicos e automatizados que conhecemos hoje (Zanotti, s.d.).

## 4.2. CRESCIMENTO DO SETOR DE ALIMENTOS NO PAÍS

O crescimento do setor de alimentos no Brasil é uma trajetória notável que se desenrolou ao longo das últimas décadas. O relatório anual da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA) em 2015 destaca a importância estratégica do país na produção e exportação de alimentos. O Brasil se consolidou como um dos principais atores globais, fornecendo uma ampla gama de produtos alimentícios, tanto para consumo interno quanto para mercados internacionais. Esse setor desempenha um papel significativo na economia brasileira, gerando empregos e contribuindo para o crescimento econômico.

A expansão do setor de alimentos no Brasil não se limita apenas à produção e exportação, mas também abrange a diversificação da oferta de produtos alimentícios. Nos últimos anos, houve um aumento na variedade de alimentos disponíveis no mercado brasileiro, acompanhado pelo surgimento de novos segmentos, como alimentos orgânicos, funcionais e gourmet. Essa diversificação é um reflexo da crescente demanda dos consumidores por opções mais saudáveis e sofisticadas.

No contexto brasileiro, o setor de alimentos tem se beneficiado significativamente dos avanços tecnológicos e das inovações em diferentes etapas da cadeia produtiva, desde o processamento até a distribuição. Um estudo conduzido por Abreu *et al.* (2018) destaca especificamente a importância da gestão de qualidade no transporte de alimentos perecíveis, evidenciando os desafios logísticos enfrentados no país. No Brasil, devido à vasta extensão territorial e às condições climáticas variadas, o transporte de alimentos perecíveis pode ser especialmente desafiador, pois é crucial manter a cadeia de frio intacta para garantir a qualidade e a segurança dos produtos. Soluções inovadoras, como sistemas de rastreamento e monitoramento da cadeia do frio conforme se pode ver na figura 1, têm sido implementadas com sucesso para mitigar esses desafios. Esses sistemas permitem o acompanhamento em tempo real das condições de temperatura durante todo o transporte, desde o ponto de origem até o destino, garantindo que os alimentos permaneçam dentro dos parâmetros ideais de temperatura e preservem sua qualidade. Essa abordagem não apenas melhora a eficiência logística, reduzindo as perdas de alimentos devido à deterioração, mas também aumenta a confiança dos consumidores na segurança dos produtos que consomem.

**Figura 1 - Sistema de rastreamento e monitoramento da Cadeia do Frio**



Fonte: Adaptado de TRACKSTER, 2024.

#### 4.3. IMPORTÂNCIA DA CADEIA DO FRIO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

Segundo Matos e Almeida (2020), o funcionamento eficaz da cadeia de frio envolve etapas que são sequenciais e interligadas, começando com o processamento e a preparação dos alimentos, e se estendendo até a oferta dos produtos ao consumidor final. Durante essa jornada, é essencial manter uma vigilância constante sobre as variáveis de controle, como temperatura e umidade, para garantir a integridade dos produtos perecíveis (Santos *et al.*, 2019). Primeiramente, o resfriamento ou congelamento adequado logo após a produção ajuda a reduzir o crescimento de microrganismos, preservando o sabor, a textura e o valor nutricional dos alimentos (Rizzo *et al.*, 2011). Depois, a conservação em câmaras refrigeradas que estejam bem calibradas garante a manutenção de temperaturas estáveis, evitando variações que possam afetar a qualidade dos alimentos (Spagnol *et al.*, 2017). Na próxima etapa do transporte, o uso de veículos equipados com sistemas de refrigeração e dispositivos para monitoramento da temperatura assegura que a manutenção dos produtos seja mantida, protegendo-os de variações bruscas de temperatura (Abreu *et al.*, 2018). Por fim, nos pontos de distribuição e venda, a fiscalização das condições ambientais e a adoção de práticas corretas de manuseio completam o processo que assegura que os alimentos cheguem ao consumidor em perfeitas condições (Matos; Almeida, 2020).

Para garantir que a cadeia de frio preserve sua qualidade, é fundamental considerar diversos fatores, além de acompanhar a temperatura em cada uma das etapas. Em relação à

infraestrutura, é fundamental que haja investimentos em equipamentos de refrigeração modernos, que devem dispor de sistemas de backup e sensores que possam comunicar em tempo real qualquer possível falha (Costa; Souza, 2021). Além disso, a formação das equipes envolvidas em cada fase do processo é fundamental, pois práticas inadequadas de limpeza, armazenamento ou transporte podem gerar perdas consideráveis e colocar em risco a saúde pública (Spagnol *et al.*, 2017). Do ponto de vista da gestão, a implementação de planos de contingência, em conjunto com o uso de tecnologias da informação, como plataformas de rastreamento digital, eleva a confiança no processo. Isso ocorre porque permite a adoção de ações corretivas imediatas quando problemas são identificados (Abreu *et al.*, 2018).

Os custos para manter essa estrutura de refrigeração podem ser altos, incluindo desde a aquisição e a manutenção dos equipamentos até o consumo de energia (Costa; Souza, 2021). Porém, falhas no controle da temperatura levam a perdas ainda mais elevadas, não só pelo descarte de alimentos que foram comprometidos, mas também pelas possíveis consequências legais e de saúde que podem surgir da venda de produtos inadequados (Rizzo *et al.*, 2011). Ao examinar a relação custo-benefício, percebe-se que a prevenção de variações de temperatura e a manutenção de uma cadeia de frio eficiente trazem economia a longo prazo, já que essas medidas ajudam a minimizar perdas, a reduzir riscos e a aumentar a satisfação do consumidor final (Santos *et al.*, 2019).

Além do impacto imediato nos custos, uma boa gestão da cadeia de frio está profundamente ligada à sustentabilidade e à responsabilidade social (Matos; Almeida, 2020). A batalha contra o desperdício de alimentos, realizada através de um controle de temperatura rigoroso, não só se torna um diferencial competitivo para as empresas desse setor, mas também demonstra um compromisso ético com a sociedade e o meio ambiente (Costa; Souza, 2021). Para resumir, manter um monitoramento constante e eficiente da temperatura em todas as etapas da cadeia do frio é fundamental para que o consumidor possa acessar produtos de alta qualidade, que atendem aos padrões de segurança alimentar e têm uma durabilidade maior. Essa prática ajuda a reduzir as taxas de desperdício no mercado e fortalece a imagem das organizações perante um público que está cada vez mais exigente em relação à origem e à sustentabilidade dos produtos (Santos *et al.*, 2019).

#### 4.4. RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO DE ALIMENTOS: FUNDAMENTOS, BENEFÍCIOS E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE TEMPERATURAS

O controle de temperatura é um ponto crucial para a preservação dos alimentos, já que afeta diretamente a velocidade das reações químicas, enzimáticas e microbiológicas que estão ligadas à degradação dos produtos. O resfriamento, geralmente aplicado em produtos que podem estragar e precisam ser mantidos a temperaturas superiores a 0°C, tem como objetivo reduzir a proliferação de microrganismos e prolongar a vida útil dos itens. Além disso, ele ajuda a preservar características sensoriais importantes, como a textura, o sabor e a aparência. Por outro lado, o congelamento, que normalmente acontece a temperaturas abaixo de -18°C, diminui ainda mais a atividade de água nos alimentos e atrasa a maior parte das reações de deterioração. Assim, enquanto o resfriamento reduz o metabolismo das bactérias com temperaturas um pouco mais baixas, o congelamento causa a formação de cristais de gelo nos alimentos, resultando em uma diminuição ainda maior na quantidade de água disponível para essas reações (ASHRAE, 2022).

Durante o processo de processamento e armazenamento, a escolha entre resfriamento e congelamento é frequentemente determinada por uma série de fatores. Isso inclui as características do alimento, como o teor de água e a composição nutricional, a validade que se deseja alcançar, as necessidades de distribuição e logística, bem como os custos operacionais ligados ao consumo de energia do ciclo de refrigeração (ASHRAE, 2022, p. 356). Alimentos como frutas e vegetais frescos, que são sensíveis a temperaturas muito baixas, costumam ser armazenados em câmaras frias. Essa prática ajuda a reduzir perdas por desidratação e a evitar danos causados pelo congelamento, que poderiam prejudicar suas características sensoriais. Por outro lado, carnes, peixes e produtos semi-preparados que precisam ter uma longa durabilidade nas prateleiras costumam passar pelo congelamento, mantendo temperaturas geralmente entre -18°C e -35°C, para garantir a melhor preservação possível (ASHRAE, 2022).

Quando você escolhe o congelamento, a rapidez com que a temperatura do alimento cai é fundamental para a qualidade final. Congelamentos rápidos ajudam a criar cristais de gelo menores e mais uniformes. Assim, reduz-se a chance de ocorrerem danos estruturais no produto, preservando, por exemplo, a suculência e a textura originais. Um método de congelamento lento pode resultar na formação de cristais de grandes dimensões, que podem

levar à destruição de células e fibras nos alimentos (ASHRAE, 2022, p. 369-459). Na prática, é possível instalar sistemas como túneis de congelamento, que podem funcionar com ar forçado ou por contato direto. A escolha do método deve levar em conta o tipo de alimento, o volume a ser processado e as condições operacionais desejadas.

O resfriamento tem a intenção de manter os produtos em temperaturas que ficam acima do ponto de congelamento, geralmente variando entre 0°C e 10°C, dependendo do tipo de produto. Em plantas com folhas mais delicadas ou em frutas tropicais que são sensíveis a mudanças bruscas de temperatura, é feito um controle rigoroso para impedir que a temperatura fique muito baixa, reduzindo assim o risco de danos causados pelo frio e mantendo as propriedades vitamínicas (ASHRAE, 2022, p.356). Além disso, durante os processos de resfriamento, a umidade relativa do ambiente tem um papel essencial na proteção contra perdas excessivas de água, seja pela transpiração das plantas ou pela condensação em produtos que estão sendo resfriados. Assim, os sistemas de refrigeração projetados para o armazenamento de hortifrutigranjeiros, por exemplo, precisam de um controle simultâneo de temperatura e umidade para minimizar a perda de peso e manter a qualidade dos alimentos por um tempo mais longo.

Um outro ponto relevante diz respeito à seleção das temperaturas de operação. De acordo com as diretrizes estabelecidas pelo Manual ASHRAE de 2022 — Refrigeração, cada produto tem uma faixa ideal de temperatura que garante sua qualidade durante o armazenamento (ASHRAE, 2022). O especialista do setor deve levar em conta fatores como: (1) a composição do alimento, principalmente o nível de água e de gorduras; (2) a suscetibilidade a choques térmicos ou a danos causados pelo frio; (3) a velocidade necessária para o resfriamento ou congelamento; e (4) a vida útil exigida para o produto. Com isso, define-se a temperatura ideal, levando em consideração fatores como a circulação do ar, a troca de calor e os métodos de controle da umidade. Em certas circunstâncias, optar pelo congelamento se torna essencial quando o que se busca é aumentar a durabilidade. Isso é especialmente verdadeiro para carnes e peixes congelados, que podem ser armazenados por períodos que vão de alguns meses até mais de um ano, dependendo do tipo de produto (ASHRAE, 2022).

Quando se trata de preservar as características nutricionais, tanto o resfriamento quanto o congelamento, quando feitos corretamente, conseguem preservar os níveis de

vitaminas e minerais. Um quadro ilustrativo (Quadro 1) pode ajudar na definição do sistema de controle de temperatura ideal para diferentes categorias de alimentos:

**Quadro 1 – Tipos de alimento e método de controle de temperatura**

<b>Tipo de alimento</b>	<b>Temperatura de armazenagem</b>	<b>Método recomendado</b>
Hortaliças Folhosas	0°C a 5°C, com umidade relativa elevada	Resfriamento, para evitar injúrias por frio; preservar valor nutricional; prevenir perdas por desidratação.
Carnes (bovina, suína)	-18°C a -35°C (congeladas)	Congelamento, para melhor preservação a longo prazo; evita contaminação microbiana; prolonga vida útil.
Peixes e Frutos do Mar	-20°C a -35°C	Congelamento, para retardar a deterioração e oxidação; preservar valor nutricional; manter textura.
Frutas Tropicais (Manga, Banana)	5°C a 12°C	Resfriamento controlado (dependendo da fruta), para evitar choque térmico; controlar umidade relativa; preservar sabor e aroma.
Frutas de Clima Temperado (Maçã, Pera)	Aproximadamente 0°C (dependendo da fruta)	Resfriamento, para reduzir a respiração dos frutos; manter a qualidade sensorial; evitar perdas por desidratação.

**Fonte:** Adaptado de ASHRAE *Handbook – Refrigeration*, 2022.

Esta tabela mostra a importância de considerar os parâmetros de temperatura e umidade relativa, para prevenir tanto o ressecamento excessivo de produtos quanto o surgimento de cristais de gelo em células de tecidos sensíveis. É fundamental destacar que esses valores podem sofrer alterações de acordo com as diretrizes técnicas específicas estabelecidas em normas, padrões e pesquisas publicadas pela ASHRAE (2022).

Por último, a durabilidade dos alimentos em sistemas de refrigeração ou congelamento também depende de boas práticas de manuseio, do preparo correto antes de guardá-los e da manutenção adequada do espaço refrigerado. Qualquer processo de resfriamento ou congelamento não garante a durabilidade esperada se houver problemas na sanitização, na proteção contra contaminações cruzadas ou no controle eficiente da temperatura nos estoques (ASHRAE, 2022). Portanto, recomenda-se que todas as etapas — que incluem desde a colheita, o abate ou a produção, passando pela limpeza e pré-resfriamento, até o armazenamento final — sejam executadas de acordo com protocolos de

segurança alimentar e controle de temperatura e umidade, com o objetivo de otimizar a conservação das propriedades nutricionais e garantir a segurança do consumidor final.

#### 4.5. PROLONGAMENTO DA VIDA ÚTIL DOS ALIMENTOS

A refrigeração não só aumenta a durabilidade dos alimentos, como também desempenha um papel essencial na prevenção de doenças alimentares e na diminuição dos custos operacionais associados à rápida deterioração (ABPA, 2015). Portanto, implementar estratégias de refrigeração eficientes é fundamental para o controle de patógenos, já que manter temperaturas iguais ou inferiores a 4 °C reduz consideravelmente o desenvolvimento de microrganismos responsáveis pela contaminação de carnes, laticínios e produtos hortifrutigranjeiros (Silva *et al.*, 2020). Além disso, a implementação correta de tecnologias de monitoramento e automação, como as soluções de Internet das Coisas (IoT) e Inteligência Artificial (IA) oferecidas pela SyOS, fortalece a rastreabilidade dos dados e a precisão no controle da temperatura em toda a cadeia de suprimentos, levando a uma redução significativa das perdas (SYOS, 2022).

Um aspecto importante, apoiado pelos documentos da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2015), refere-se à importância de manter condições adequadas de refrigeração para assegurar a segurança alimentar. Isso é especialmente crucial para produtos de origem animal, que são mais suscetíveis devido à elevada quantidade de nutrientes que favorecem o crescimento de microrganismos. Ao aumentar a durabilidade de produtos que têm uma vida útil curta, não apenas se reduz a quantidade de alimentos que se perde, mas também se diminuem os gastos com devoluções, descarte de produtos e a incidência de surtos de doenças alimentares (ABPA, 2015). Nesse cenário, utilizar sistemas de refrigeração modernos e eficientes, combinados com automação e análise de dados em tempo real, possibilita identificar alterações de temperatura antes que elas afetem a qualidade dos produtos (SYOS, 2022). Um estudo de caso conduzido pela SyOS, em parceria com redes de varejo, mostrou que os lucros financeiros podem chegar a R\$ 6,5 milhões por ano. A pesquisa apontou que, em supermercados, a refrigeração permite uma diminuição nas perdas de 5,68% para aproximadamente 1,5% em frutas, verduras e legumes. No caso das carnes, essa redução é de 2,94% para cerca de 1,5%. Já nos mercados, as perdas em frutas, verduras e legumes caem de 5,10% para em torno de 1,2%, e nas carnes, a queda vai de 3,65% para aproximadamente 1%. Esses dados evidenciam que a administração eficiente da temperatura e

dos estoques, aliada a sistemas de Internet das Coisas (IoT) e Inteligência Artificial (IA), traz melhorias significativas (SYOS,2022). Adicionalmente, há a chance de diminuir os custos com energia em até R\$ 7,5 milhões por ano, através da otimização dos ciclos de descongelamento e da manutenção adequada dos equipamentos (SYOS, 2022).

Sob a perspectiva científica, manter um controle térmico adequado reduz a velocidade das reações químicas, como a oxidação de lipídios e a degradação de vitaminas, além de diminuir consideravelmente a taxa de proliferação microbiana (Rizzo *et al.*, 2011; Spagnol *et al.*, 2017). Assim, assegura-se não apenas a qualidade nutricional dos alimentos, mas também sua segurança para consumo. Isso ocorre porque as espécies de bactérias e fungos que são sensíveis ao frio (psicrófilos e mesófilos) têm sua atividade reduzida em temperaturas próximas de 0 °C (Opas, 2019). Além de diminuir as perdas ao longo da cadeia produtiva, a adoção de boas práticas de refrigeração está intimamente ligada à sustentabilidade, pois ajuda a reduzir o consumo de recursos naturais e a evitar a geração excessiva de resíduos (Spagnol *et al.*, 2017). Assim, considerando os aspectos financeiros e sociais, a combinação do controle de temperaturas, a automação inteligente de processos e um planejamento logístico mais eficiente se destaca como um diferencial competitivo no mercado, especialmente na área de alimentos, onde a demanda por frescor e segurança cresce de maneira significativa (ABPA, 2015; SYOS, 2022).

Com o objetivo de ilustrar a relevância desse controle na diminuição ou prevenção do crescimento microbiano, a seguir, apresentamos a Tabela 1, que lista os principais microrganismos encontrados em produtos alimentares, as temperaturas ideais para reduzir sua atividade e os alimentos nos quais costumam ser encontrados. Essas informações reforçam a necessidade urgente de uma gestão cuidadosa das condições de armazenamento:

**Tabela 1 – Tipos de microrganismos contaminantes de alimentos**

(continua)

<b>Microrganismo</b>	<b>Alimentos de maior ocorrência</b>	<b>Faixa de temperatura de controle*</b>
Salmonella spp.	Carnes de aves, ovos, laticínios	≤ 4 °C
Escherichia coli	Carnes bovinas, vegetais crus, leites não pasteurizados	≤ 4 °C
Listeria monocytogenes	Laticínios, carnes processadas e produtos refrigerados prontos para uso	0 a 4 °C

**Tabela 1 – Tipos de microrganismos contaminantes de alimentos**

(conclusão)

<b>Microrganismo</b>	<b>Alimentos de maior ocorrência</b>	<b>Faixa de temperatura de controle*</b>
Staphylococcus aureus	Produtos cárneos, maioneses, saladas proteicas	0 a 4 °C
Bacillus cereus	Arroz cozido, sopas, molhos	0 a 5 °C
Fungos do gênero Aspergillus	Grãos (amendoim, milho, cereais em geral), frutas secas	0 a 5 °C
Fungos do gênero Penicillium	Pães, queijos, frutas cítricas	0 a 5 °C

**Fonte:** Opas, 2019.

*Nota.* Temperaturas próximas ou inferiores a 4 °C são consideradas ideais para inibir o desenvolvimento da maioria dos patógenos listados, embora alguns microrganismos possam apresentar crescimento lento em faixas próximas a 5 °C ou 6 °C (Opas, 2019; Rizzo et al., 2011).

A alocação de recursos em sistemas de refrigeração de alto desempenho, em conjunto com a formação de profissionais e a implementação de novas tecnologias, tem sido gradativamente incorporada como uma estratégia essencial para a competitividade e a sustentabilidade da indústria alimentícia (Silva *et al.*, 2020). Neste contexto, as evidências fornecidas pelos relatórios da ABPA (2015) e os casos de sucesso divulgados pela SyOS (2022) ilustram os benefícios financeiros e operacionais decorrentes da diminuição de perdas, especialmente na cadeia de perecíveis, onde a adequada gestão da temperatura resulta em uma redução na ocorrência de produtos fora das especificações, um aumento na satisfação do consumidor final e a consolidação de padrões de qualidade (ABPA, 2015; SYOS, 2022). Destaca-se, portanto, que a refrigeração não deve ser encarada unicamente como um meio de conservação temporária, mas sim como integrante de um ecossistema de boas práticas que abarca desde a produção, o transporte, o armazenamento até a comercialização final, com impactos favoráveis na salvaguarda da saúde pública e na viabilidade econômica das empresas participantes de toda a cadeia alimentar.

#### 4.6. CICLOS DE REFRIGERAÇÃO COMUNS NO SETOR ALIMENTÍCIO

Nos sistemas de refrigeração utilizados na indústria alimentícia, a retirada do calor é fundamental para preservar e estender a durabilidade dos produtos, garantindo a qualidade microbiológica e sensorial. Cada tipo de alimento apresenta diferentes faixas de temperatura que devem ser respeitadas: carnes, peixes, frutas e laticínios têm suas próprias exigências em relação ao resfriamento, congelamento e até mesmo ultracongelamento. Assim, há diversos tipos de configurações de ciclos de compressão de vapor, cada uma delas apropriada para uma faixa específica de temperatura ou para uma determinada aplicação industrial (ASHRAE, 2022).

Ao projetar um sistema de refrigeração eficiente, é fundamental realizar um estudo termodinâmico de cada ciclo, levando em consideração as necessidades específicas que o cenário exige. Assim, a análise energética de qualquer ciclo de refrigeração fundamenta-se na Primeira Lei da Termodinâmica. Considerando um regime permanente e desconsiderando as variações de energia cinética e potencial, a equação geral para o balanço de energia pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} * \Delta h \quad (4.1)$$

Onde:

- $\dot{Q}$  é a taxa de calor (kW) trocada entre o sistema e o meio externo,
- $\dot{W}$  é o trabalho (kW) suprido ao sistema (geralmente pela compressão mecânica),
- $\dot{m}$  é a vazão mássica de refrigerante (kg/s),
- $\Delta h$  é a variação de entalpia do fluido no processo (kJ/kg).

O desempenho energético também deve ser levado em conta. Normalmente expresso pelo Coeficiente de Performance (COP), definido como a razão entre o efeito útil de refrigeração ( $Q_{frio}$ ) e o trabalho despendido na compressão ( $W_{comp}$ ):

$$COP = \frac{Q_{frio}}{W_{comp}} \quad (4.2)$$

Quanto maior o COP, mais eficiente é o processo (Asharae, 2022). Na prática, o objetivo é otimizar esse parâmetro, equilibrando os custos de instalação, a temperatura desejada e as condições de operação.

A seleção do refrigerante e o desenvolvimento de condensadores, evaporadores e válvulas de expansão estão diretamente ligados às propriedades termodinâmicas, como a pressão de saturação, a entalpia de vaporização e a densidade, além do comportamento do fluido durante as mudanças de fase. As informações necessárias podem ser encontradas em tabelas e gráficos de propriedades (p-h, T-s), conforme apresentado no ASHRAE *Handbook – Refrigeration* (ASHRAE, 2022).

Na área de refrigeração para alimentos, existem quatro configurações principais de ciclos de compressão a vapor que são frequentemente utilizadas para atender a demandas de temperatura específicas para a conservação dos produtos. Essas configurações estão detalhadas na tabela 2, que apresenta o ciclo, suas características, as temperaturas típicas e suas respectivas aplicações.

**Tabela 2 – Principais ciclos de refrigeração do setor de alimentos**

Ciclo	Características Principais	Faixa de temperatura típica	Aplicação
Compressão de Vapor (Estágio Único)	Compressor mecânico único, condensador, válvula de expansão e evaporador.	10 °C a -5 °C	Resfriamento e congelamento moderado.
Compressão de Vapor (Múltiplos Estágios)	Duas ou mais etapas de compressão, com resfriamento intermédio para reduzir a razão de compressão.	Até -35 °C ou -40 °C	Congelamento profundo de carnes, sorvetes e outras aplicações.
Ciclo em Cascata	Dois subsistemas de compressão, com refrigerantes distintos; condensador do ciclo de baixa temperatura resfriado pelo evaporador do ciclo de alta temperatura.	-35 °C a -60 °C (até -70 °C)	Ultracongelamento de pescados, sorvetes, produtos de alto valor.
Transcrítico (CO <sub>2</sub> )	Dióxido de carbono como refrigerante; operação em pressões acima do ponto crítico em um <i>gas cooler</i> .	Até -45 °C	Armazenamento congelado, supermercados e logística fria.

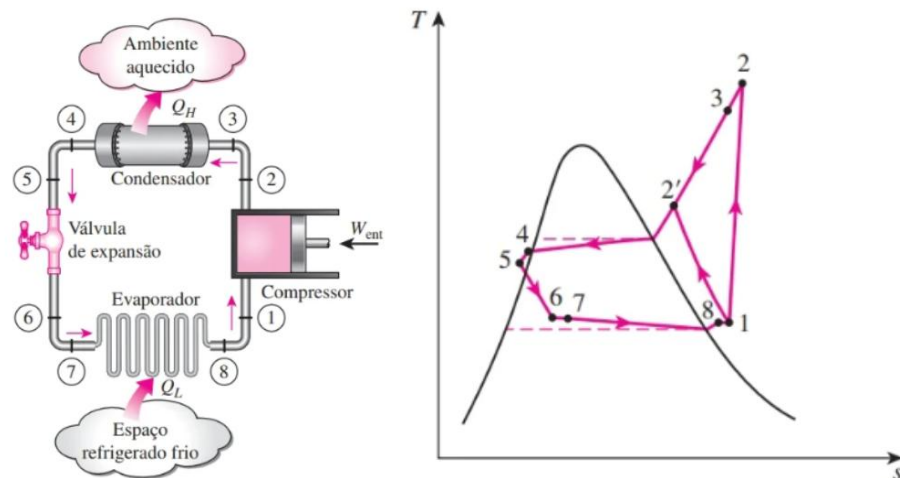
**Fonte:** Adaptado de ASHRAE *Handbook – Refrigeration*, 2022.

A escolha dos ciclos de refrigeração em sistemas destinados ao processamento, resfriamento e congelamento de alimentos demanda uma avaliação cuidadosa das condições de operação que se deseja alcançar. De um lado, temos os ciclos mais simples, que funcionam em uma única fase e são perfeitos para refrigeração em temperaturas amenas. Por outro lado, há os ciclos de compressão de vapor com vários estágios e os sistemas em cascata,

que são feitos especificamente para temperaturas bastante frias, comuns em alguns processos de congelamento. Além disso, a procura por alternativas mais sustentáveis e a diminuição do uso de fluidos sintéticos têm estimulado a expansão do ciclo transcrito de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em contextos industriais. É relevante ressaltar que, nesta pesquisa, decidiu-se não incluir o ciclo de absorção, uma vez que ele é menos utilizado nas cadeias de frio industriais do setor alimentício (Stoecker, 2018).

O ciclo básico de compressão a vapor, conforme mostrado na figura 2, consiste, basicamente, nas etapas de compressão do fluido refrigerante enquanto está na fase gasosa, condensação em alta pressão, expansão que resulta na diminuição da pressão e evaporação, que possibilita a absorção de calor do ambiente que se quer refrigerar (Stoecker, 2018). Esse ajuste pode ser facilmente realizado para aplicações industriais de refrigeração, modificando as pressões e temperaturas de operação conforme a necessidade de um maior ou menor controle da remoção de calor.

**Figura 2 – Sistema de refrigeração com ciclo de único estágio**



Fonte: Çengel, 2011.

No resfriamento de alimentos em temperaturas que variam entre  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  e  $10\text{ }^\circ\text{C}$ , como acontece nas câmaras de conservação de frutas, hortaliças ou em produtos que não são congelados, geralmente são suficientes sistemas de um único estágio. A praticidade na construção e os custos mais baixos de instalação e manutenção explicam por que esse método é amplamente utilizado na indústria de alimentos, principalmente em locais onde não é necessário ter temperaturas extremamente baixas.

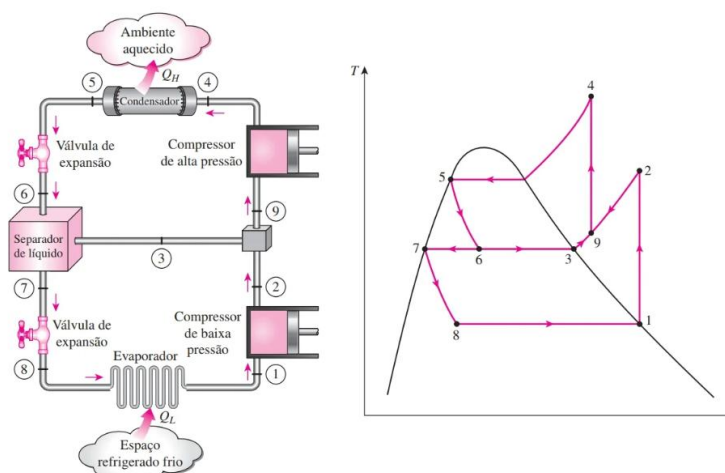
Em situações que demandam temperaturas mais baixas — frequentes em processos de congelamento — a abordagem de estágio único pode se mostrar ineficiente ou até mesmo inviável. Nesse cenário, os ciclos de compressão a vapor em vários estágios se tornam importantes porque permitem:

- Reduzir a taxa de compressão em cada fase, minimizando o esforço mecânico e a temperatura de saída.
- Gerenciar com maior precisão as condições de evaporação é essencial para produtos cárneos ou lácteos que necessitam de congelamento a temperaturas inferiores a  $-25\text{ °C}$ .
- Elevar o coeficiente de performance (COP) em comparação a um único estágio operando em regime extremo (Stoecker, 2018, p. 67-80).

Ter um resfriamento intermediário (ou misturá-lo com um líquido refrigerante) entre as etapas de compressão é essencial para manter a temperatura do vapor estável antes de ser comprimido novamente. Isso garante um desempenho geral mais eficiente (Stoecker, 2018).

Em processos de múltiplos estágios, como mostrado na figura 3, as temperaturas de evaporação costumam ficar em torno de  $-30\text{ °C}$ , podendo chegar até  $-40\text{ °C}$  dependendo do tipo de alimento, já que alguns pescados requerem condições mais severas. Nesse intervalo de operação, um estágio único mostraria um consumo de energia alto, o que tornaria o sistema menos interessante (Stoecker, 2018). Quando as necessidades se limitam à refrigeração leve, optar por várias etapas de compressão nem sempre é uma decisão economicamente viável. O projeto deve ser baseado na carga térmica, nos custos de manutenção e na continuidade da linha de produção.

**Figura 3 – Sistema de refrigeração com ciclo de múltiplos estágios**

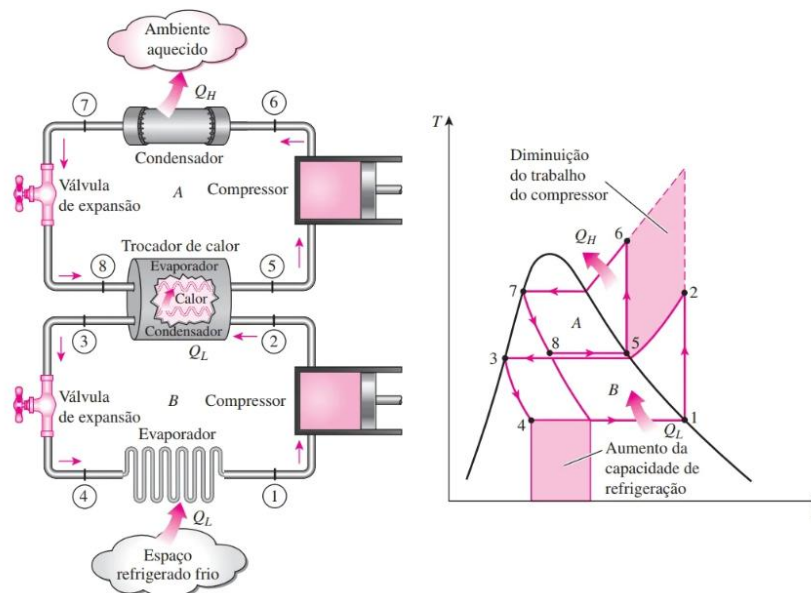


Fonte: Çengel, 2011.

Os sistemas em cascata apresentados na figura 4 são utilizados principalmente em processos de ultracongelamento, especialmente quando é preciso alcançar temperaturas muito baixas, abaixo de  $-50\text{ °C}$ . Nessa configuração, dois ou mais circuitos de compressão a vapor são interligados em série. Isso possibilita que o calor condensado do primeiro circuito seja absorvido e resfriado pelo segundo, com cada um utilizando o seu próprio refrigerante (Stoecker, 2018). Os benefícios do modelo em cascata englobam:

- Emprego de fluidos específicos para cada intervalo de temperatura — como, por exemplo, amônia no sistema de alta temperatura e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no sistema de baixa temperatura;
- Pressões operacionais mais apropriadas para cada tipo de refrigerante, permitindo um funcionamento contínuo em temperaturas muito reduzidas.
- Minimização de questões ambientais ao utilizar fluidos com menor impacto e maior conformidade com as exigências regulatórias (Stoecker; Jabardo, 2018, p. 354-358).

**Figura 4 – Sistema de refrigeração com ciclo de cascata de dois estágios**



Fonte: Çengel, 2011.

O ciclo transcrito de dióxido de carbono, como ilustrado na figura 5, surge como uma opção promissora, impulsionado por legislações ambientais mais rigorosas e pela demanda por refrigerantes com baixo Potencial de Aquecimento Global (GWP). Diferente do ciclo tradicional de compressão a vapor, onde a condensação acontece em um regime subcrítico, o ciclo transcrito tem a capacidade de funcionar acima do ponto crítico do  $\text{CO}_2$ ,

que é em torno de 31 °C e 7.400 kPa. Nesse caso, o condensador é substituído por um resfriador de gás (Stoecker, 2018). Assim, o funcionamento do ciclo transcrito inclui as seguintes etapas:

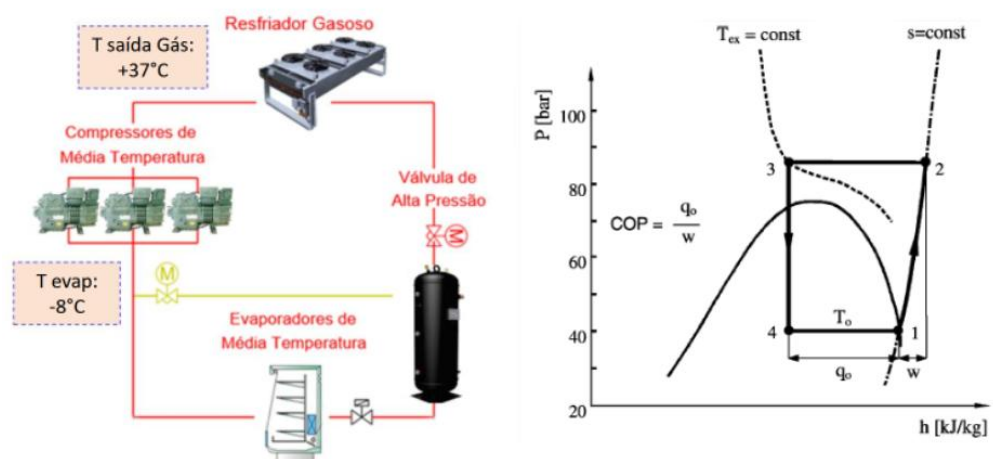
1. **Compressão** — o fluido atinge pressões supercríticas e temperaturas elevadas;
2. **Resfriamento no gas cooler** — ao invés de se condensar totalmente, o CO<sub>2</sub> sofre redução de temperatura a pressões muito elevadas, saindo em estado supercrítico;
3. **Expansão** — a pressão é bruscamente reduzida, conduzindo parte do fluido à condição de vapor e parte à condição de líquido;
4. **Evaporação** — o CO<sub>2</sub> evaporado a baixas temperaturas absorve calor do meio a refrigerar, promovendo o efeito de refrigeração (Stoecker, 2018).

Ao entender as etapas do funcionamento do ciclo, observamos as vantagens do CO<sub>2</sub> transcrito:

- **Baixo impacto ambiental** — o dióxido de carbono tem GWP muito inferior aos halocarbonos convencionais;
- **Excelente troca térmica** — o CO<sub>2</sub> apresenta elevada condutividade térmica e reduzidas perdas de carga, possibilitando trocadores mais compactos;
- **Aplicações flexíveis** — pode ser empregado como circuito de alta ou de baixa temperatura, sendo compatível inclusive com sistemas em cascata (Stoecker, 2018).

Contudo, o ciclo transcrito de CO<sub>2</sub> requer pressões mais altas que os ciclos subcríticos usuais, demandando atenção aos construtivos especiais, além de controle refinado do ponto de operação para otimizar a troca de calor no gas cooler.

**Figura 5 – Sistema de refrigeração com ciclo transcrito de CO<sub>2</sub>**



Fonte: Eletrofrio Refrigeração, 2019.

Portanto, para a seleção adequada do ciclo a ser utilizado, existem alguns fatores a serem levados em consideração. As principais variáveis para decidir entre, único estágio, múltiplos estágios, cascata ou transcrito de CO<sub>2</sub> incluem (Stoecker, 2018):

- **Temperatura de evaporação:** ciclos em cascata e transcrito de CO<sub>2</sub> suportam faixas muito baixas, ideais para congelamentos profundos;
- **Demanda de carga térmica:** grandes sistemas podem se beneficiar de soluções mais robustas e eficientes a longo prazo, como o CO<sub>2</sub> transcrito em combinação com amônia ou outros fluidos em sistemas híbridos;
- **Características do fluido refrigerante:** segurança, compatibilidade com materiais e legislativos; o CO<sub>2</sub> destaca-se pelo baixo GWP, ao passo que a amônia permanece competitiva em aplicações industriais tradicionais;
- **Complexidade de manutenção:** sistemas transcritos exigem componentes robustos que resistam a pressões elevadas, enquanto ciclos cascata requerem supervisão cuidadosa dos dois circuitos.
- **Custos:** se o investimento inicial for critério determinante, um estágio único é mais simples; porém, em uso contínuo, soluções como estágios múltiplos, cascata ou transcrito de CO<sub>2</sub> podem economizar energia e mostrar-se mais vantajosas.

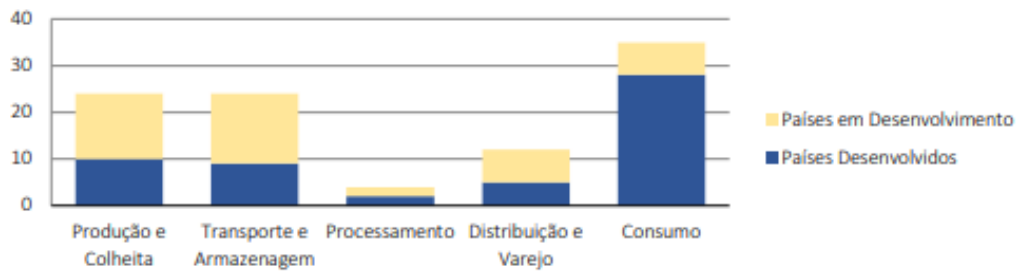
#### 4.7. DESAFIOS E PERDAS NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

A indústria de alimentos enfrenta desafios significativos e alguns deles incluem segurança alimentar, mudanças nos hábitos de consumo, transparência e rastreabilidade, inovação tecnológica e controle de custos. O monitoramento adequado da cadeia de abastecimento, incluindo o transporte e armazenamento de produtos perecíveis, é fundamental para lidar com esses desafios. Uma abordagem eficaz para a gestão de custos e a redução de perdas na indústria de alimentos envolve a implementação de tecnologias avançadas, como a tecnologia de identificação por radiofrequência (RFID) e sistemas de sensores sem fio.

Embora haja divergência nos resultados encontrados em vários estudos na literatura, parece haver um consenso de que as causas, o volume e as implicações das perdas e do desperdício de alimentos variam conforme o nível de desenvolvimento da região em que o fenômeno é investigado (Macheka *et al.*, 2017; Papargyropoulou *et al.*, 2014; Parfitt *et al.*, 2010). O Gráfico 1 ilustra a quantidade estimada pela FAO (2011) de perdas e desperdício de

alimentos (em %) em países desenvolvidos e em desenvolvimento. A distribuição dessas perdas e desperdício de alimentos difere significativamente entre as regiões desenvolvidas e em desenvolvimento.

**Gráfico 1 – Perdas e desperdício de alimentos (em %)**



Fonte: FAO, 2011.

Nas regiões desenvolvidas, há uma porção relativamente alta de desperdício de alimentos no estágio de consumo. Pode-se argumentar que as normas sociais nessas áreas não são suficientemente rígidas para incentivar a eficiência alimentar, levando as pessoas com maior poder aquisitivo a comprar mais alimentos do que realmente necessitam. Já nas regiões em desenvolvimento, observa-se uma parcela maior de perdas durante o transporte e armazenamento (Ishangulyyev *et al.*, 2019). Estima-se que haja uma diferença de seis vezes nesse estágio entre a África Subsaariana e a América do Norte, o que provavelmente se deve a infraestruturas logísticas menos desenvolvidas, especialmente no que diz respeito ao armazenamento refrigerado.

A tecnologia RFID é utilizada para identificar e rastrear objetos através de ondas de rádio. Em resumo, o leitor RFID emite sinais de rádio, que são captadas pela antena do sistema e que ativam o chip, que em seguida envia um sinal de resposta com as informações armazenadas para um leitor de RFID, que decodifica os dados e os envia para um sistema de processamento e integração de dados. Com isso a tecnologia permite o acompanhamento em tempo real da localização e condições dos produtos, incluindo temperatura e umidade. Um estudo realizado por Abad *et al.* (2009) demonstrou a eficácia do uso de RFID na monitorização da cadeia de frio de pescado intercontinental, destacando como essa tecnologia pode contribuir para a redução de perdas e garantia da qualidade dos produtos.

A gestão da temperatura é de suma importância na indústria de alimentos, especialmente em relação a produtos perecíveis. De acordo com Nascimento *et al.* (2014), o monitoramento da temperatura é essencial para garantir a qualidade dos produtos agrícolas

durante o transporte. A utilização de sensores sem fio permite um controle preciso das condições de temperatura e pode ajudar a evitar perdas devido a variações não planejadas.

Dados estatísticos e estudos têm revelado que setores específicos da produção de alimentos enfrentam desafios mais significativos em relação a custos e perdas. Por exemplo, o setor de produtos perecíveis, como frutas e verduras, é particularmente suscetível a perdas durante o transporte e armazenamento devido à sua sensibilidade à temperatura e umidade (Rizzo *et al.*, 2011).

O quadro a seguir destaca as áreas em que a indústria de alimentos enfrenta desafios significativos em termos de redução de custos e minimização de perdas:

**Quadro 2 – Áreas e Desafios da Indústria**

<b>Setor da Produção de Alimentos</b>	<b>Desafios na Redução de Custos</b>	<b>Setores com Maior Incidência de Perdas</b>
Produtos Perecíveis	Variações de temperatura e umidade durante o transporte e armazenamento	Produtos perecíveis, especialmente frutas e verduras, devido à sua sensibilidade à temperatura
Alimentos Processados	Controle de qualidade e segurança, incluindo a prevenção de contaminação cruzada	Alimentos processados, devido à complexidade das operações de produção e à necessidade de monitoramento constante
Produtos Lácteos	Necessidade de manter a temperatura adequada para evitar deterioração	Produtos lácteos, pois são altamente perecíveis e requerem refrigeração constante
Produtos de Carne e Pescado	Controle rigoroso da temperatura e higiene para evitar riscos à saúde	Produtos de carne e pescado, devido à possibilidade de crescimento bacteriano e deterioração

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024.

Essa tabela ilustra como diferentes setores da indústria de alimentos enfrentam desafios específicos em relação a custos e perdas, destacando a importância da gestão eficaz da cadeia de suprimentos e o uso de tecnologias avançadas, como RFID e sensores sem fio, para mitigar esses desafios.

Abaixo a tabela 3 ilustra a relação de temperaturas para evitar proliferação de bactérias e toxinas.

**Tabela 3 – Relação de temperaturas e eventos que cessam**

Temperatura	Eventos que cessam
20 °C	Produção de toxinas em <i>Staphylococcus</i> e <i>Clostridium botulinum</i> tipos A e B
10 °C	Multiplificação de <i>Staphylococcus</i>
6,7 °C	Multiplificação de <i>Clostridium botulinum</i>
5 °C	Multiplificação de <i>Salmonella</i>
3.3 °C	Produção de toxinas em <i>Clostridium botulinum</i> tipo E
0 °C	Risco devido ao crescimento e atividade de bactérias causadoras de intoxicações alimentares
-8 °C	Multiplificação de bactérias
-10 °C	Multiplificação de leveduras
-12 °C	Multiplificação de mofos
-18 °C	Reações químicas (sua velocidade é tão lenta que são consideradas nulas)

Fonte: Badia-Melis *et al.*, 2015.

Além disso, a referência à Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS) destaca a importância das tecnologias de conservação na segurança de alimentos. Essas tecnologias desempenham um papel crucial na prevenção de perdas e na garantia da qualidade dos produtos ao longo da cadeia de abastecimento.

Portanto, a indústria de alimentos continua a enfrentar desafios na gestão de custos e na redução de perdas, mas as tecnologias e estratégias adequadas desempenham um papel fundamental na superação desses desafios.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 TECNOLOGIAS DE REFRIGERAÇÃO PARA CONSERVAÇÃO DE ALIMENTOS

#### 5.1.1 Fluidos refrigerantes na conservação de alimentos

Os fluidos refrigerantes desempenham um papel vital no funcionamento dos sistemas de refrigeração por compressão a vapor pois são responsáveis por absorver e remover o calor de um ambiente, mantendo temperaturas controladas e adequadas para a conservação de alimentos, especialmente em sistemas de refrigeração industrial e comercial. A escolha do fluido refrigerante é crítica, pois afeta a capacidade de refrigeração, e se bem escolhido pode minimizar impactos ambientais.

De acordo com a ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), os fluidos refrigerantes são classificados quanto à sua natureza nas seguintes categorias gerais:

1. **Halogenados:**

Possuem em sua composição elementos halógenos, como cloro, flúor e bromo. Os principais exemplos incluem:

- a. **CFCs (Clorofluorocarbonos):** São altamente estáveis, porém com alto potencial de depleção do Ozônio (ODP) e elevado GWP;
- b. **HCFCs (Hidroclorofluorocarbonos):** Em relação aos CFCs são menos nocivos à camada de ozônio, mas ainda são bem regulados por sua contribuição ao aquecimento global;
- c. **HFCs (Hidrofluorocarbonos):** Não destroem a camada de ozônio, mas igualmente aos HCFCs contribuem ao aquecimento global;
- d. **HFOs (Hidrofluorolefinas):** uma classe de refrigerantes desenvolvidos para substituir os HFCs nos sistemas de refrigeração e outras aplicações térmicas. São conhecidos comumente por serem olefinas fluoretadas, possuindo baixo ODP e GWP tendo maior sustentabilidade ambiental.

2. **Orgânicos:**

São refrigerantes derivados do carbono e não possuem halógenos em sua composição. O principal exemplo de fluidos refrigerantes orgânicos são os hidrocarbonetos, formados apenas por hidrogênio e carbono, possuindo baixo GWP, ODP zero, excelente eficiência energética, mas com alta inflamabilidade (classe A3).

3. **Inorgânicos:**

Refrigerantes que são compostos químicos que não possuem carbono na sua estrutura molecular (ou possuem em condições específicas), sendo usados nos sistemas de refrigeração devido às suas características únicas. Comumente são conhecidos como refrigerantes naturais quando são encontrados na natureza, mas podem ser sintetizados para aplicações diversas. Esses fluidos possuem baixo GWP e baixo ou quase nenhum ODP, além de sua alta estabilidade química.

4. **Misturas:**

É uma categoria de refrigerantes que compreende a combinação de dois ou mais

refrigerantes a fim de proporcionar características específicas para as mais diversas aplicações. Dentre as misturas, temos há dois tipos muito comuns:

a. **Zeotrópicas:**

São misturas que apresentam deslizamento de temperatura durante a mudança de fase no processo de refrigeração, um exemplo é o R-407C.

b. **Azeotrópicas:** Misturas que agem como um único fluido refrigerante, sem a existência de deslizamento de temperatura, um exemplo é o R-507.

A classificação dos fluidos é essencial para selecionar refrigerantes com base em requisitos técnicos, ambientais e de segurança, garantindo que o desempenho do sistema seja otimizado.

A eficiência dos fluidos refrigerantes é um fator-chave na eficiência dos sistemas de refrigeração por suas propriedades termodinâmicas, temperatura de operação, compatibilidade com os componentes do sistema, segurança, ciclo de vida além de influenciar diretamente no consumo de energia e, conseqüentemente, os custos operacionais. Portanto, a seleção de fluidos refrigerantes com baixo GWP é uma tendência que segue protocolos internacionais como o Protocolo de Montreal e as emendas do Acordo de Kigali, que trazem restrições e banimento a alguns tipos de refrigerantes devido ao seu impacto ambiental significativo. Regulamentações ambientais mais rígidas estão sendo implementadas para trazer redução as emissões de gases de efeito estufa, promovendo a eliminação gradual de refrigerantes como os CFCs (Clorofluorocarbonos) e HCFCs (Hidroclorofluorocarbonos), devido ao seu elevado ODP (Potencial de Depleção do Ozônio) e os HFCs (Hidrofluorocarbonos), devido ao seu alto GWP (Potencial de Aquecimento Global). Esses compostos estão sendo substituídos por alternativas mais sustentáveis, como HFOs (Hidrofluorolefinas) e os refrigerantes naturais, que possuem menor impacto ambiental. (Badia-Melis *et al.*, 2015). GWP (Potencial de Aquecimento Global) e ODP (Potencial de depleção do ozônio) são índices usados para avaliar o impacto ambiental de diferentes substâncias. O GWP mede a quantidade de calor que um gás de efeito estufa retém na atmosfera em comparação com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante um período específico, geralmente 100 anos, o CO<sub>2</sub> referência com GWP igual a 1. O ODP avalia a capacidade de uma substância em degradar a camada de ozônio estratosférico em comparação com o CFC-11, que possui ODP de 1. Portanto, esses índices são essenciais para a regulamentação e controle de emissões de gases, ajudando a mitigar as mudanças climáticas e proteger a camada de ozônio.

**Tabela 4 – Principais Fluidos Refrigerantes e seus índices de impacto ambiental**

<b>Fluidos Refrigerantes</b>	<b>ODP</b>	<b>GWP (100 anos)</b>	<b>Classificação de Inflamabilidade e Toxicidade</b>	<b>Legenda da classificação</b>
R134a	0.0	1430	A1	Baixa toxicidade e baixa inflamabilidade
R404A	0.0	3922	A1	Baixa toxicidade e baixa inflamabilidade
R-11	1.0	4750	A1	Baixa toxicidade e baixa inflamabilidade
R-12	1.0	10900	A1	Baixa toxicidade e baixa inflamabilidade
R-22	0.055	1810	A1	Baixa toxicidade e baixa inflamabilidade
R-407C	0.0	3922	A1	Baixa toxicidade e baixa inflamabilidade
R-32	0.0	675	A2L	Baixa toxicidade e baixa inflamabilidade, mas com velocidade de propagação de chama limitada
R-1234yf	0.0	4	A2L	Baixa toxicidade e baixa inflamabilidade, mas com velocidade de propagação de chama limitada

**Fonte:** ASHRAE *STANDARD* 34, 2024.

Um quadro de informações pode ajudar a destacar os principais fluidos refrigerantes utilizados na conservação de alimentos, juntamente com suas propriedades ecológicas. Aqui no quadro 3, é apresentado um exemplo simplificado desse quadro:

**Quadro 3 – Fluidos Refrigerantes e suas aplicações**

(continua)

<b>Fluidos Refrigerantes</b>	<b>Propriedades Ecológicas</b>	<b>Aplicações Comuns</b>	<b>Tipos de alimentos*</b>
R134a	Alto GWP	Supermercados, transporte refrigerado	Bebidas (refrigerantes, sucos), laticínios, hortifrutis em geral
R404A	Alto GWP	Câmaras frigoríficas, transporte de alimentos congelados	Sorvetes, carnes, peixes, alimentos congelados em geral
CO <sub>2</sub> (R744)	Baixo GWP	Supermercados, sistemas de refrigeração de última geração	Laticínios, carnes, hortifrutis, congelados (em sistemas transcíticos ou cascata)

### Quadro 3 – Fluidos Refrigerantes e suas aplicações

(conclusão)

Fluidos Refrigerantes	Propriedades Ecológicas	Aplicações Comuns	Tipos de alimentos*
R507	Alto GWP	Câmaras de congelamento, unidades de refrigeração comercial	Carnes, peixes, alimentos resfriados ou congelados em geral
R449A (HFO/HFC)	Médio a Baixo GWP	Substituto de R404A e R507, refrigeração comercial em supermercados	Aplicável tanto para alimentos resfriados (laticínios, hortifrutis) quanto congelados (carnes, sorvetes), dependendo do projeto
NH <sub>3</sub> (R717)	Zero ODP / Zero GWP	Refrigeração industrial (frigoríficos, cervejarias etc.), grandes câmaras de armazenamento	Carnes, pescados, laticínios, frutas e legumes em larga escala
R290 (Propano)	Baixo GWP	Unidades compactas (freezers comerciais), aplicações de carga menor	Sorvetes, bebidas, alimentos em expositores refrigerados de pequeno porte

**Fonte:** Adaptado de ASHRAE *Handbook – Refrigeration*, 2022.

*Nota.* Os tipos de alimentos indicados refletem aplicações típicas descritas no ASHRAE *Handbook – Refrigeration* e na prática de mercado. Cada fluido pode ter usos mais amplos, dependendo do projeto específico (temperaturas de evaporação, capacidade, segurança etc.).

Os fluidos refrigerantes com baixo GWP, como o CO<sub>2</sub>, estão se tornando cada vez mais populares devido à sua menor pegada de carbono. Os sistemas transcíticos de CO<sub>2</sub> (R744) são uma alternativa mais ecológica em relação a sistemas com refrigerantes convencionais. Esses sistemas utilizam CO<sub>2</sub> como único fluido refrigerante em todas as etapas do circuito de refrigeração, operando acima do ponto crítico do CO<sub>2</sub> em certas condições. Uma característica importante desses sistemas é que o ponto crítico do CO<sub>2</sub> (31,1 °C e 73,8 bar) está dentro da faixa de operação do sistema, o que significa que em condições específicas de temperatura do ar externo, o CO<sub>2</sub> estará na condição supercrítica.

As vantagens dos sistemas transcíticos de CO<sub>2</sub> são significativas. Primeiramente, eles atendem às demandas do Protocolo de Montreal e da Emenda de Kigali, contribuindo para a conservação do meio ambiente. Além disso, esses sistemas comumente são muito eficientes no quesito energético, superando grande parte das alternativas disponíveis atualmente no mercado. O CO<sub>2</sub> como refrigerante tem uma eficiência até 8 vezes maior que outros fluidos refrigerantes, além de apresentar baixa toxicidade e não ser inflamável, o que aumenta a segurança na operação do sistema.

Outra vantagem notável é o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa. Marcelo Cola, especialista em refrigeração industrial da Danfoss, afirma que “O CO<sub>2</sub> usado no sistema de refrigeração é cerca de 3.922 vezes menos potente em termos de potencial de aquecimento global do que o refrigerante R-404A [...]” (CCAC - Coalizão sobre clima e ar limpo para reduzir poluentes climáticos de curta duração, UNEP, 2014)

No entanto, os sistemas transcíticos de CO<sub>2</sub> também apresentam desafios. Uma desvantagem significativa é o custo inicial mais elevado, pois os componentes capazes de operar com segurança em aplicações de alta pressão podem ser mais caros. Além disso, o coeficiente de desempenho (COP) do sistema é reduzido quando operado em condições ambientais mais elevadas.

Outro ponto a considerar é que o CO<sub>2</sub> funciona a temperaturas e pressões mais elevadas do que o HFC e outros fluidos refrigerantes. Em caso de vazamento, o CO<sub>2</sub> acumula-se no solo, deslocando o ar, e sendo inodoro, não pode ser detectado pelo olfato, exigindo assim medidas de segurança adicionais e sistemas de detecção apropriados.

A escolha do fluido refrigerante na conservação de alimentos é uma decisão estratégica que afeta tanto a sustentabilidade ambiental quanto os custos operacionais. Portanto, a indústria de alimentos está buscando continuamente alternativas mais ecológicas para atender às demandas de conservação de alimentos de maneira eficiente e ambientalmente responsável.

A eficácia de um fluido refrigerante na conservação de alimentos é determinada não apenas pela sua capacidade de resfriamento, mas também pela sua estabilidade termodinâmica e propriedades de transporte de calor (Kader, 2002).

No entanto, é importante ressaltar que a escolha do fluido refrigerante na conservação de alimentos não é uma abordagem única para todos os cenários. O tipo de alimento, as condições de armazenamento e transporte, e a regulamentação local desempenham um papel significativo na seleção do fluido refrigerante mais apropriado (Kumari *et al.*, 2015).

Segundo a EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) os fluidos refrigerantes mais ambientalmente amigáveis são os hidrocarbonetos (HC), hidrofluorolefinas (HFO) e fluidos naturais como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e amônia (NH<sub>3</sub>), que possuem baixo potencial de aquecimento global (GWP) e zero potencial de destruição da camada de ozônio (ODP). No que tange aos hidrocarbonetos, o propano (R-290) e isobutano (R-600a), possuem alta eficiência energética, mas são inflamáveis e requerem cuidados especiais no seu

manuseio, sendo geralmente mais baratos que os HFCs (Camporese, 2004) As HFOs, como o R-1234yf, possuem muito baixo GWP e zero ODP, embora possam ser mais caras inicialmente devido à novidade no mercado. Os fluidos naturais, como CO<sub>2</sub> (R-744) e NH<sub>3</sub> (R-717), oferecem alta eficiência e baixos custos operacionais, apesar de haver exigências especiais para os sistemas diante as suas altas pressões e toxicidade, respectivamente. (Thapa, 2024). Em comparação, os CFCs, banidos pelo alto ODP e GWP, e os HCFCs, que estão sendo eliminados gradativamente, apresentam custos ambientais elevados. Os HFCs sem ODP, mas com GWP alto a moderado, têm custos variados. Misturas de refrigerantes (blenders) combinam propriedades desejáveis para otimizar a eficiência, segurança e compatibilidade com sistemas existentes, reduzindo o impacto ambiental.

### 5.1.2. Isolamento térmico

A adoção de um bom isolamento térmico é fundamental para garantir a eficiência de sistemas de refrigeração em ambientes industriais, comerciais e logísticos. Isso porque ele impacta diretamente no consumo de energia e na qualidade dos alimentos que estão armazenados (ASHRAE, 2022). De forma resumida, o isolamento térmico diz respeito ao uso de materiais (Tabela 8) que possuem baixa condutividade, com a finalidade de reduzir a troca de calor entre o ambiente refrigerado e o exterior. Isso garante a manutenção das temperaturas ideais e protege a integridade dos produtos que se deterioram com facilidade (Stoecker, 2018).

Para fazer um dimensionamento apropriado do isolamento, é essencial levar em conta alguns aspectos: (i) a condutividade térmica ( $k$ ) de cada material, que influencia o coeficiente global de transferência de calor; (ii) a espessura ( $L$ ) necessária para reduzir ao máximo as perdas de energia; (iii) a área ( $A$ ) que está sujeita a variações de temperatura; e (iv) a diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre a parte mais fria e o ambiente externo (Cuiñas *et al.*, 2014). A equação que descreve a transferência de calor em um material homogêneo e em condição de estado estacionário é derivada da Lei de Fourier e pode ser representada pela seguinte fórmula:

$$Q = \frac{k * A * \Delta T}{L} \quad (5.1)$$

Em que  $Q$  é o calor transferido (W),  $k$  a condutividade térmica do material isolante ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $A$  a área de contato ( $m^2$ ),  $\Delta T$  a diferença de temperatura (K ou °C) e  $L$  a

espessura (m). Em projetos reais, utiliza-se frequentemente o coeficiente de transmissão de calor (U), que engloba não só a condutividade do isolante, mas eventuais resistências de contato e de convecção. Assim, a taxa de calor que atravessa o sistema por condução e convecção pode ser estimada por:

$$Q = U * A * \Delta T \quad (5.2)$$

onde o valor de U ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) é calculado pela soma recíproca das resistências térmicas que compõem o sistema, incluindo o material isolante, as interfaces e as superfícies internas e externas. É importante que esse valor seja mantido o mais baixo possível, a fim de minimizar a carga térmica sobre o sistema de refrigeração (ASHRAE, 2022; Correia *et al.*, 2018).

Além da condutividade térmica, características como resistência à umidade, resistência mecânica, comportamento em relação ao fogo e estabilidade química também têm grande relevância. Na preservação de alimentos de alto valor, como cortes especiais de carne ou laticínios diferenciados, escolher um isolamento inadequado pode causar variações de temperatura que prejudicam, tanto a qualidade sensorial quanto a segurança do produto (Stoecker, 2018). Sob uma perspectiva construtiva, é importante destacar a necessidade de (i) eliminar as pontes térmicas nas articulações estruturais, (ii) garantir que não existam vazamentos nas portas e aberturas, e (iii) fazer vedações adequadas em tubulações e dutos que cruzam o espaço refrigerado.

Os pontos importantes que devem ser considerados são:

1. **Escolha do Material:** avaliar a densidade, a condutividade, a resistência à infiltração e a adequação às normas de segurança (como lã de vidro, poliuretano, poliestireno, fibra de madeira, entre outros).
2. **Espessura mínima do isolante:** é determinada com base em análises térmicas e investigações de viabilidade econômica; conforme a literatura, busca-se estabelecer um equilíbrio entre o custo de investimento e a economia de energia (Stoecker, 2018).
3. **Análise de Custos e Benefícios:** consiste na confrontação entre os gastos relativos à instalação de um isolante de maior eficiência e a diminuição da carga de refrigeração, assim como da demanda de energia ao longo da vida útil do sistema.
4. **Condições Operacionais e Ambientais:** exposição ao calor, umidade, radiação solar (no caso de contêineres), além de possíveis flutuações na temperatura externa que

podem demandar proteções complementares.

Dessa forma, é importante destacar que a eficiência do isolamento térmico influencia diretamente a seleção dos componentes essenciais do sistema de refrigeração, como o compressor, o condensador e o evaporador (ASHRAE, 2022). Um isolamento de alta eficiência geralmente exige uma menor capacidade do compressor, pois reduz a carga térmica diária. No entanto, se o planejamento for inadequado ou a espessura do isolamento for insuficiente, isso pode aumentar significativamente o consumo de energia elétrica e afetar a manutenção das condições termohigrométricas necessárias (Correia *et al.*, 2018).

Nesse contexto, a criação do isolamento precisa, além do dimensionamento de acordo com a Lei de Fourier ou o coeficiente U, também levar em conta detalhes construtivos. Isso ajuda a diminuir infiltrações de ar e transições de vapor d'água, o que resulta em um sistema de refrigeração mais confiável e com menos flutuações de temperatura interna (Stoecker, 2018).

**Tabela 8 – Principais tipos de isolantes**

(continua)

<b>Tipo de Isolante</b>	<b>Aplicações comuns</b>	<b>Custo Aproximado (por m<sup>2</sup>) em R\$</b>	<b>Alimentos em que é usado</b>	<b>Ciclo de Refrigeração Associado</b>
Lã de Vidro	Isolamento de câmaras frias de médio porte, contêineres refrigerados.	15 – 30	Carnes, frios, laticínios, hortifrutigranjeiros	Ciclo de compressão a vapor em média temperatura (5 a -5 °C), ciclo simples
Lã de Rocha	Túnel de congelamento, áreas sujeitas a altas temperaturas ou riscos de fogo.	25 – 50	Peixes, frutos do mar, massas pré-cozidas	Ciclo de duplo estágio em baixas temperaturas (abaixo de -18 °C), especialmente em linhas de congelamento
Poliestireno Expandido (EPS)	Painéis modulares para câmaras frigoríficas, embalagens e contêineres.	20 – 40	Hortaliças, produtos resfriados em geral	Ciclo de compressão a vapor com sub-resfriamento, ciclo simples a temperaturas positivas

**Tabela 8 – Principais tipos de isolantes**

(conclusão)

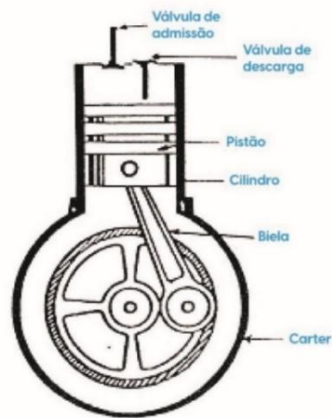
<b>Tipo de Isolante</b>	<b>Aplicações comuns</b>	<b>Custo Aproximado (por m<sup>2</sup>) em R\$</b>	<b>Alimentos em que é usado</b>	<b>Ciclo de Refrigeração Associado</b>
Poliestireno Extrudado (XPS)	Pisos de câmaras frias e revestimentos sujeitos a alta umidade.	25 – 45	Sorvetes, produtos cárneos congelados	Ciclo de compressão a vapor, ciclo de congelamento (–18 °C a – 25 °C)
Poliuretano	Painéis estruturais em câmaras de conservação, contêineres marítimos.	75 – 125	Embutidos, carnes, produtos de panificação	Ciclo de compressão a vapor com um ou mais estágios, dependendo da faixa de temperatura
Fibra Cerâmica	Áreas de alta temperatura (fornos, processos térmicos antes do resfriamento).	100 – 150	Produtos pré-cozidos, cozimento industrial antes do resfriamento	Ciclos industriais com trocadores de calor integrados, podendo utilizar cascatas para alta/baixa temp.
Celulose	Câmaras para produtos orgânicos ou processos ecológicos.	10 – 25	Pequenos mercados, hortifrúti e adegas	Ciclo de compressão simples, range de temperatura de resfriamento (acima de 0 °C)

**Fonte:** Adaptado de ASHRAE *Handbook – Refrigeration*, 2022.

### 5.1.3. Compressores para sistemas de refrigeração

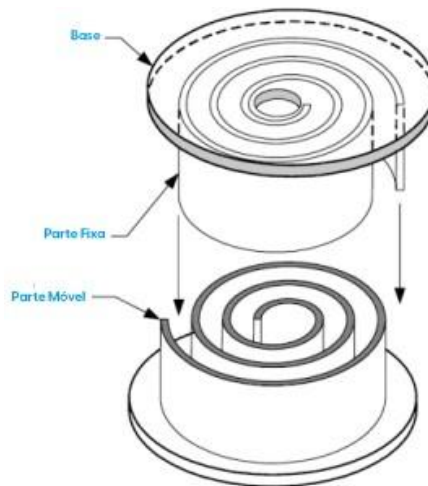
Existem diversos tipos de compressores utilizados na refrigeração de transporte e comercial, cada um com suas características específicas. Entre os mais comuns, destacam-se os compressores de pistão na figura 6, os compressores scroll na figura 7 e os compressores rotativos na figura 8 (Mainetti *et al.*, 2013).

**Figura 6 - Compressor de pistão**



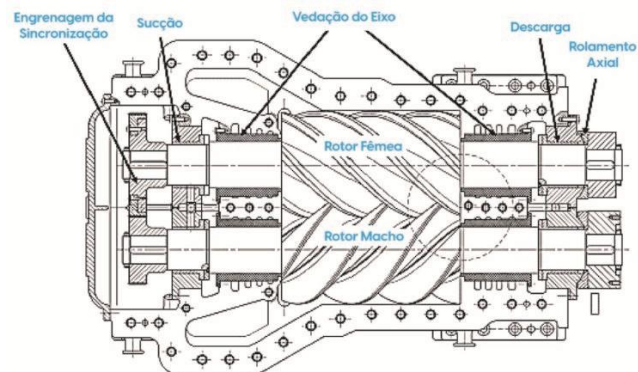
Fonte: Elgin, 2022.

**Figura 7 – Compressor rotativo – Scroll**



Fonte: Elgin, 2022.

**Figura 8 – Compressor rotativo – Parafuso**



Fonte: Elgin, 2022.

A seleção correta de compressores em sistemas de refrigeração é um tema de grande relevância na indústria, pois afeta diretamente o desempenho, a eficiência energética e a

confiabilidade de toda a instalação (ASHRAE, 2022). Além disso, o compressor é a peça responsável por garantir que o refrigerante circule corretamente durante o ciclo de refrigeração, permitindo, assim, a troca de calor entre o espaço resfriado e o ambiente externo. Stoecker (2018), ao abordar a refrigeração industrial, destaca que a escolha do compressor ideal deve considerar aspectos técnicos, eficiência energética e questões financeiras, sem deixar de seguir rigorosamente as normas de segurança aplicáveis.

Nesse sentido, os compressores de pistão, de forma geral, demonstram uma alta confiabilidade no seu funcionamento e oferecem resultados positivos em situações que demandam uma grande capacidade de refrigeração. A funcionalidade básica desses dispositivos se baseia no movimento alternado dos pistões em um cilindro, que promove a compressão do fluido refrigerante (Babiceanu, 2015). Esses compressores têm a capacidade de lidar com grandes variações de carga, mesmo que isso cause vibrações e níveis de ruído maiores quando comparados a outros modelos de compressores (Stoecker, 2018). Normalmente, esses equipamentos são empregados em caminhões frigoríficos, contêineres refrigerados e em grandes indústrias, sendo recomendados especialmente quando a confiabilidade é essencial em ambientes de alta intensidade operacional.

Os compressores scroll têm se destacado cada vez mais por causa do seu funcionamento silencioso, alta eficiência energética e simplificação na parte mecânica, já que possuem menos peças internas (Heidmann *et al.*, 2013). A compressão ocorre por meio de um conjunto de espirais (scrolls), onde uma é fixa e a outra é móvel. Elas se entrelaçam, reduzindo gradualmente o espaço disponível para o refrigerante. Essa tecnologia é frequentemente utilizada em sistemas de transporte refrigerado, onde é fundamental ter um baixo consumo de energia e redução do ruído durante o funcionamento. Além disso, ela é empregada em supermercados de médio porte e em outras situações comerciais que precisam de um bom isolamento sonoro.

Os compressores rotativos, com destaque para o compressor de parafuso, que funciona por deslocamento positivo, são valorizados pela variedade de capacidades, eficiência em diferentes níveis de carga e pela confiabilidade em usos contínuos (Kumari *et al.*, 2015). De forma geral, são compostos por parafusos conectados que, ao serem girados, comprimem o fluido refrigerante. Esses compressores apresentam uma boa estabilidade no funcionamento, ocupam um espaço físico relativamente pequeno e tornam mais fácil a adoção

de estratégias para controle de capacidade, especialmente em locais que precisam de um resfriamento preciso em condições que mudam (Stoecker, 2018).

O quadro a seguir apresenta um resumo das principais características dos diversos tipos de compressores empregados na refrigeração de transporte:

**Quadro 4 - Compressores**

<b>Tipo de Compressor</b>	<b>Características Principais</b>	<b>Aplicações Comuns</b>	<b>Tipos de Alimentos</b>
Compressor de Pistão	Eficiência e confiabilidade, adequado para aplicações de alta capacidade.	Instalações industriais de grande porte, caminhões e contêineres frigoríficos, câmaras de estocagem com alta rotatividade.	Carnes, laticínios em grande escala, peixes e derivados que exigem congelamento ou resfriamento intensivo.
Compressor Scroll	Eficiência energética, baixo ruído, ideal para aplicações de baixo consumo de energia.	Refrigeradores comerciais e residenciais, pequenas câmaras frigoríficas, ar-condicionado automotivo.	Laticínios, frutas e hortaliças em pequenas centrais, aplicações de refrigeração de transporte de médio porte.
Compressor Rotativo	Amplas faixas de capacidade, eficaz para resfriamento preciso em diferentes condições de carga.	Grandes instalações de processamento de alimentos, processos industriais contínuos, plantas de congelamento rápido (IQF).	Frutas, legumes minimamente processados, massas congeladas, produtos cárneos de larga escala (linhas de produção 24 h).

**Fonte:** Adaptado de ASHRAE *Handbook – Refrigeration*, 2022.

O compressor, em um sistema de refrigeração, tem o papel de elevar a pressão do refrigerante, permitindo que ele realize a transferência de calor no condensador (ASHRAE, 2022). Em ambientes industriais e comerciais, a correta definição desse componente afeta diretamente:

1. **Eficiência Energética:** a potência de compressão altera-se de acordo com a relação de compressão e a vazão mássica. Um dimensionamento incorreto pode levar a um consumo excessivo de energia.
2. **Capacidade de Refrigeração:** a satisfação das exigências de carga térmica está ligada à quantidade de refrigerante que circula pelo ciclo; assim, a eficiência volumétrica do compressor e suas perdas internas são fatores cruciais.

3. **Confiabilidade e Manutenção:** sistemas que funcionam em ambiente industrial (24 horas por dia) demandam robustez mecânica, procedimentos de lubrificação eficazes e acesso facilitado para possíveis manutenções (Stoecker, 2018).
4. **Interação com os Demais Componentes:** a escolha inadequada do compressor pode resultar em discrepâncias de pressão que prejudicam o processo de expansão, a alimentação dos evaporadores e a eficiência dos condensadores, especialmente em circunstâncias de variação de carga ou em temperaturas extremas (ASHRAE, 2022).

Ao escolher um compressor, é fundamental levar em conta fatores como a temperatura de evaporação ( $T_e$ ) e a temperatura de condensação ( $T_c$ ). Essas condições operacionais são determinantes tanto para a quantidade de refrigerante que circula quanto para a relação de compressão. É fundamental calcular com exatidão a capacidade de refrigeração necessária, para evitar tanto o excesso quanto a falta de dimensionamento do equipamento. Além disso, a eficiência volumétrica e a eficiência isoentrópica são parâmetros essenciais para avaliar o quão próximo o processo de compressão real está de uma condição ideal. É importante também monitorar a temperatura de descarga para prevenir possíveis danos ao óleo lubrificante e evitar riscos de superaquecimento. Em situações com grandes variações de carga, é essencial utilizar técnicas de modulação e desenvolver estratégias para controle da capacidade. Além disso, é fundamental avaliar as diferenças máximas de pressão que o compressor pode suportar sem sofrer danos mecânicos (Stoecker, 2018; ASHRAE, 2022). Para fundamentar os cálculos de pré-dimensionamento, costuma-se utilizar equações gerais da Termodinâmica, além de fazer balanços de massa e energia. A forma de conseguir a capacidade frigorífica pode ser feita da seguinte maneira:

$$Q_e = \dot{m}_r * (\Delta h_{evaporador}) \quad (5.3)$$

em que  $\dot{m}_r$  é a vazão mássica do refrigerante e  $\Delta h_{evaporador}$  representa a variação de entalpia no processo de evaporação. O valor de  $\dot{m}_r$  pode ser determinado pela relação

$$\dot{m}_r = \rho_{suc} * V_{disp} * \eta_v * n \quad (5.4)$$

considerando a densidade de sucção ( $\rho_{suc}$ ), o volume deslocado pelo compressor ( $V_{disp}$ ), a eficiência volumétrica ( $\eta_v$ ) e a rotação ou número de ciclos ( $n$ ). O cálculo da

potência de compressão envolve a diferença de entalpia entre as condições de sucção e de descarga, conforme

$$W = \dot{m}_r * (h_{desc} - h_{suc}) \quad (5.5)$$

ao passo que a eficiência isoentrópica

$$\eta_v = \frac{W_{ideal}}{W_{real}} \quad (5.6)$$

avalia quão próximo o trabalho de compressão realizado se aproxima de um processo ideal. Juntamente com as correlações práticas dos fabricantes, essas equações possibilitam um dimensionamento adequado do compressor para cada tipo de aplicação, garantindo boa confiabilidade, eficiência energética e a observância dos limites de segurança estabelecidos.

Em resumo, ao escolher um compressor, é fundamental considerar, ao mesmo tempo, variáveis termodinâmicas, mecânicas e operacionais. Isso porque a eficácia de um sistema de refrigeração depende da combinação adequada entre a seleção e a especificação do equipamento, o dimensionamento correto das tubulações e o controle preciso de parâmetros como superaquecimento e subresfriamento. Além disso, é vital seguir as condições operacionais em cada fase do ciclo. Conforme as diretrizes de Stoecker (2018) e o manual da ASHRAE (2022), esses fatores estão interligados com o objetivo de otimizar todo o sistema, garantindo um desempenho eficaz, diminuindo o consumo de energia e aprimorando a viabilidade econômica ao longo da vida útil do projeto.

#### 5.1.4. Evaporadores

A seleção e o dimensionamento dos evaporadores em sistemas de refrigeração são essenciais para garantir a eficácia do processo de conservação de alimentos e em outras aplicações industriais. Esses aparelhos têm como objetivo realizar a transferência de calor entre o espaço que precisa ser resfriado e o fluido refrigerante, provocando a mudança de fase do refrigerante – de líquido para vapor – e, por consequência, a absorção de calor (ASHRAE, 2022). Ao compreender de maneira adequada os princípios de funcionamento, as fórmulas de dimensionamento, as classificações mais comuns e a aplicação em diferentes tipos de produtos, é possível criar um projeto que seja seguro, com custos operacionais razoáveis e que

atenda de forma eficaz às necessidades térmicas de cada instalação (Stoecker, 2018). O quadro 5 apresenta os principais tipos de evaporadores empregados em sistemas de refrigeração de alimentos.

**Quadro 5 – Evaporadores comuns na indústria alimentícia**

<b>Tipo de evaporador</b>	<b>Aplicações comuns</b>	<b>Tipos de alimentos</b>
Evaporador aletado (ar-refrig.)	Câmaras frigoríficas de resfriamento e congelamento, túneis de congelamento, vitrines refrigeradas	Carnes, laticínios, frutas, hortaliças, produtos embalados
Evaporador inundado	Grandes instalações industriais, tanques de gelo, resfriamento de líquidos de processo	Processos industriais diversos (cervejarias, indústria química, leite e derivados)
Evaporador de placas	Resfriamento de líquidos alimentícios (leite, sucos) e sistemas fechados de transferência	Bebidas, laticínios e sucos concentrados
Evaporador tipo cascos e tubos	Processos industriais com alta capacidade, resfriamento de soluções secundárias (glicol, salmoura)	Produtos com necessidade de trocadores robustos
Evaporador de tubos lisos	Sistemas comerciais e industriais onde a limpeza frequente é exigida	Peixes, carnes e aplicações que requerem limpeza constante

**Fonte:** Adaptado de Refrigeração Industrial – Stoecker, 2022.

Os evaporadores, por definição, são a parte fundamental onde ocorre a extração de calor em todo o ciclo de refrigeração. Fazer uma escolha errada pode levar ao subdimensionamento, o que provoca uma refrigeração insuficiente e um aumento indesejado da temperatura no produto ou no ambiente refrigerado. Por outro lado, se houver sobredimensionamento, isso pode resultar em altos custos de investimento e até mesmo em oscilações no funcionamento do sistema. A relevância desses fatores se torna ainda mais clara em processos industriais e na conservação de alimentos. Nesses contextos, manter a temperatura adequada e, em algumas situações, a umidade relativa correta é essencial para prolongar a vida útil e garantir a qualidade dos produtos que estão sendo armazenados ou processados.

Segundo Stoecker (2018), ao projetar um evaporador, é essencial levar em conta não apenas o coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ) e a área de troca térmica ( $A$ ), mas também características estruturais, como o tipo de aletas, a disposição dos tubos e a distância entre os passes, além de fatores operacionais, como o intervalo de temperaturas de

evaporação, o nível de subresfriamento do líquido e o superaquecimento do vapor. A ASHRAE (2022) destaca a importância de se prestar atenção à diminuição da pressão do refrigerante dentro do evaporador, à velocidade de fluxo, ao risco de formação de gelo em serpentinas que operam a temperaturas abaixo de 0 °C, além da necessidade de adotar métodos de degelo que sejam seguros e eficientes.

Outro ponto importante diz respeito à recuperação e ao escoamento do óleo lubrificante dentro do evaporador, além de garantir que não haja acúmulo de refrigerante líquido em locais impróprios. Uma distribuição interna de refrigerante que não seja adequada, especialmente em circuitos mais longos, pode causar desequilíbrios na carga e afetar o desempenho do sistema. Isso pode levar a um aumento no consumo de energia e a uma redução na eficiência (ASHRAE, 2022).

$$Q = U * A * LMTD \quad (5.7)$$

na equação, Q representa a carga de refrigeração efetiva, U indica o coeficiente global de transferência de calor, A corresponde à área de troca térmica e LMTD se refere à diferença logarítmica das temperaturas. Os valores do coeficiente de transferência podem variar de acordo com a geometria do equipamento, a velocidade do fluido externo, o tipo de escoamento e a forma como o refrigerante circula internamente. Isso exige que o projetista leve em conta essas condições, alinhando-as com as exigências do projeto e as limitações da construção.

A definição da temperatura de evaporação precisa alcançar um equilíbrio entre a necessidade de liberar calor e as implicações energéticas de funcionar em níveis bastante baixos. Apesar de uma temperatura de evaporação mais baixa poder ajudar a retirar calor em algumas situações, essa estratégia tende a aumentar bastante o consumo de energia. Além disso, em processos que envolvem produtos sensíveis ou ambientes com umidade controlada, é essencial assegurar que a velocidade do ar e as condições da superfície do evaporador não resultem em desidratação excessiva ou na formação de gelo. Quando as temperaturas ficam abaixo de 0 °C, é importante escolher os métodos adequados para descongelar, como o aquecimento elétrico, o uso de gás quente ou a pulverização de água. Isso ajuda a evitar a formação de cristais de gelo e a manutenção do desempenho. É fundamental que o evaporador seja compatível com o refrigerante empregado, levando em conta fatores como a pressão de funcionamento, além da toxicidade e inflamabilidade. Essas variáveis afetam não

apenas o material do trocador, mas também as espessuras e dimensões das tubulações internas.

Para garantir que tudo funcione direitinho, é importante ficar de olho na redução da pressão dentro do evaporador. Isso porque quedas muito bruscas podem fazer o compressor precisar de mais potência, e, por outro lado, se o fluxo de escoamento ficar muito baixo, pode acabar prejudicando o retorno do óleo para o cárter. Em relação aos princípios da termodinâmica, fazemos uso da equação de balanço de energia quando tratamos do refrigerante, na qual

$$Q = \dot{m}_{refr} * (h_{saída} - h_{entrada}) \quad (5.8)$$

em que  $\dot{m}_{refr}$  é a vazão mássica de refrigerante e  $(h_{saída} - h_{entrada})$  corresponde à variação de entalpia entre a entrada e a saída do evaporador. Para dimensionar corretamente a queda de pressão, recorre-se a expressões como

$$\Delta P = f * \frac{L}{D} * \frac{\rho * v^2}{2} \quad (5.9)$$

neste contexto,  $f$  representa o coeficiente de atrito,  $L$  refere-se ao comprimento efetivo dos tubos,  $D$  corresponde ao diâmetro interno,  $\rho$  é a densidade e  $v$  sinaliza a velocidade média de escoamento. Em sistemas que resfriam o ar por meio da condensação de umidade, é possível incluir o cálculo do calor latente associado à remoção de água para obter uma estimativa mais precisa das trocas de calor. As equações mencionadas, adaptadas à geometria de cada tipo de evaporador, auxiliam o projetista a decidir se a expansão será direta, se o sistema funcionará com uma configuração inundada ou se serão exigidos circuitos mais complexos. Independentemente da situação, é fundamental avaliar aspectos como a manutenção dos níveis de umidade, o controle da velocidade do ar e a verificação da compatibilidade com o refrigerante escolhido (seja ele R-717, R-22, R-404A, R-134a ou outros). Isso é essencial para melhorar tanto a eficiência quanto a segurança da instalação (ASHRAE, 2022; Stoecker, 2018).

Assim, para que o evaporador funcione de forma contínua e segura, é recomendável fazer um monitoramento regular de fatores como a vazão e a pressão do refrigerante, assegurando que haja um nível apropriado de superaquecimento na saída. Além disso, é fundamental gerenciar o fluxo de ar ou de outro fluido secundário para garantir que as

condições de projeto relacionadas à velocidade e à temperatura de entrada sejam mantidas. É aconselhável também estabelecer práticas de limpeza e manutenção para eliminar o acúmulo excessivo de resíduos, poeira ou gelo, pois isso pode afetar a eficiência e a vida útil do equipamento. Além disso, é importante escolher métodos de descongelamento adequados, levando em conta tanto o perfil de temperatura em uso quanto as características físicas e de higiene do ambiente. A pessoa encarregada do projeto também precisa verificar se o evaporador é compatível com as propriedades termofísicas do refrigerante escolhido. Isso inclui levar em conta fatores como pressão, inflamabilidade e toxicidade. Além disso, é fundamental assegurar que sejam instalados dispositivos de segurança e válvulas de alívio, seguindo as normas vigentes. Segundo Stoecker (2018), escolher corretamente as dimensões e a configuração do evaporador pode elevar significativamente a eficiência do sistema de refrigeração. A ASHRAE (2022) ressalta a importância de adotar normas de segurança e boas práticas de projeto, garantindo assim a confiabilidade e a eficiência energética nas instalações de refrigeração.

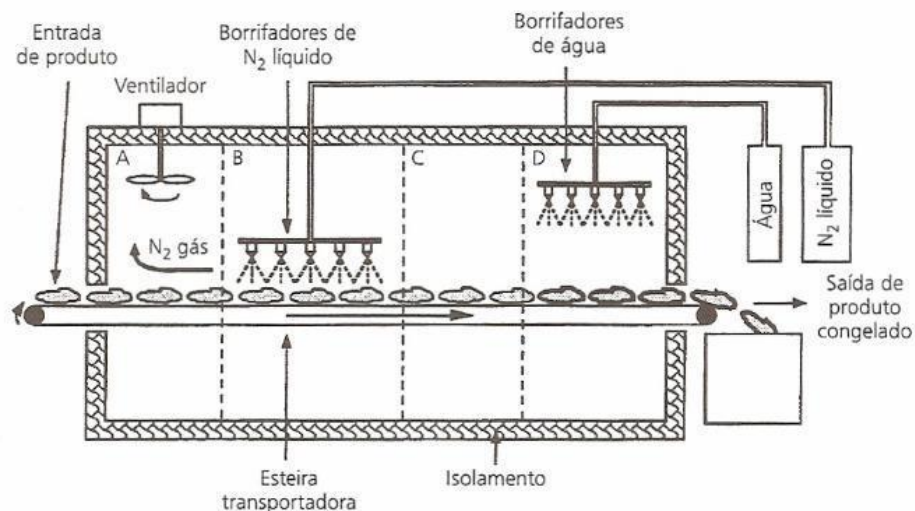
#### 5.1.5. Métodos Avançados de Refrigeração e suas Aplicações no Brasil

A preservação dos alimentos, especialmente por meio de técnicas mais modernas, é essencial para assegurar a qualidade e a durabilidade em diferentes fases da cadeia produtiva. No Brasil, essas estratégias se deparam com desafios relacionados à eficácia, à diminuição de desperdícios, ao respeito às normas internacionais de segurança e à longevidade dos produtos. Dentre as tecnologias mais significativas, podemos destacar a refrigeração criogênica, a refrigeração hidrotermal e a refrigeração assistida por vácuo. Cada uma delas tem suas próprias funções, focando na velocidade do resfriamento, na conservação das características sensoriais e na adaptação para diferentes categorias de alimentos. É fundamental compreender detalhadamente o funcionamento dos sistemas de refrigeração, os fluidos que empregam e a sua estrutura. Além disso, é fundamental entender as suas aplicações no Brasil para aprimorar o planejamento das operações nas indústrias e também para fomentar as pesquisas acadêmicas nesse campo.

No que diz respeito à refrigeração criogênica apresentada na Figura 9, a ideia central gira em torno do uso de gases que estão em estado líquido ou sólido e que conseguem alcançar temperaturas extremamente baixas, normalmente abaixo de  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (CRYOSPAIN, 2025). Os fluidos mais comumente utilizados são o nitrogênio líquido (LIN), que possui um

ponto de ebulição em torno de  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e o dióxido de carbono, que pode ser empregado tanto na forma de gelo seco ( $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) quanto como líquido. O contato dos alimentos com agentes criogênicos — seja por imersão, borrifação ou por meio de túneis de congelamento — contribui para a formação de pequenos cristais de gelo, o que previne danos significativos às estruturas celulares. Assim, essa técnica ajuda a manter a textura, o sabor e o valor nutricional dos alimentos (CRYOGROUP, 2025). Para carnes de qualidade superior e peixes de alto valor, assim como para produtos congelados de primeira linha, esse método assegura não apenas a manutenção das características sensoriais, mas também aprimora a estabilidade microbiológica (CRYOSPAIN, 2025). No Brasil, estados como Santa Catarina e Paraná, que se destacam na produção e exportação de carne suína e de aves, têm adotado esse método com frequência para garantir sua competitividade, tanto no mercado interno quanto no externo. Além disso, as áreas litorâneas que atuam na pesca marinha utilizam a criogenia para congelar rapidamente peixes e frutos do mar, com o objetivo de retardar as reações enzimáticas e prolongar a vida útil desses produtos.

**Figura 9 – Refrigeração Criogênica de Nitrogênio Direta**

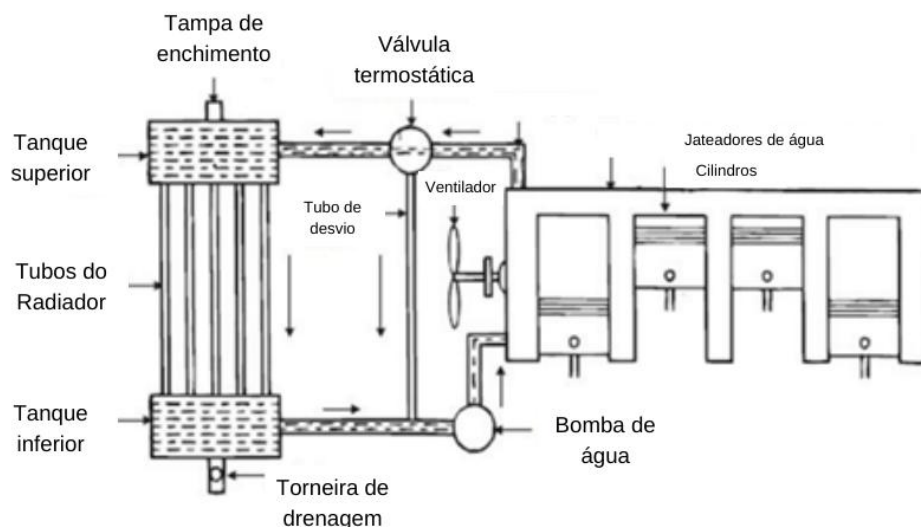


**Fonte:** Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2005.

Além disso, a refrigeração hidrotermal, conforme mostrado na figura 10 — que também é chamada de hidroresfriamento — consiste na imersão ou na aplicação de água fria de maneira pulverizada diretamente sobre o produto (Chitarra, 2025). Esse método se mostra particularmente eficaz em frutas e verduras que são colhidas em temperaturas altas, já que a água, tendo um alto coeficiente de transferência de calor, facilita a rápida remoção do que

chamamos de "calor de campo" (Elansari, 2025). Esse processo traz grandes benefícios para produtos que tendem a se degradar pela perda de umidade, como alface, espinafre, brócolis e mangas. Esses alimentos podem ter sua aparência, frescor e valor de mercado comprometidos se forem submetidos a resfriamentos lentos ou a condições de armazenamento inadequadas (Chitarra, 2025). Além disso, o uso de água devidamente sanitizada pode ajudar na limpeza das superfícies, diminuindo as contaminações. No Brasil, variedades como manga, uva e várias frutas tropicais se beneficiam muito desse sistema, especialmente em regiões produtoras como o Vale do São Francisco, de onde são exportadas grandes quantidades para o mercado internacional. Nas regiões periurbanas, como o Cinturão Verde de São Paulo, o hidroresfriamento proporciona rapidez no processamento e ajuda a manter a qualidade das hortaliças que são destinadas diretamente às feiras e centros de distribuição das grandes cidades.

**Figura 10 – Refrigeração Hidrotermal**

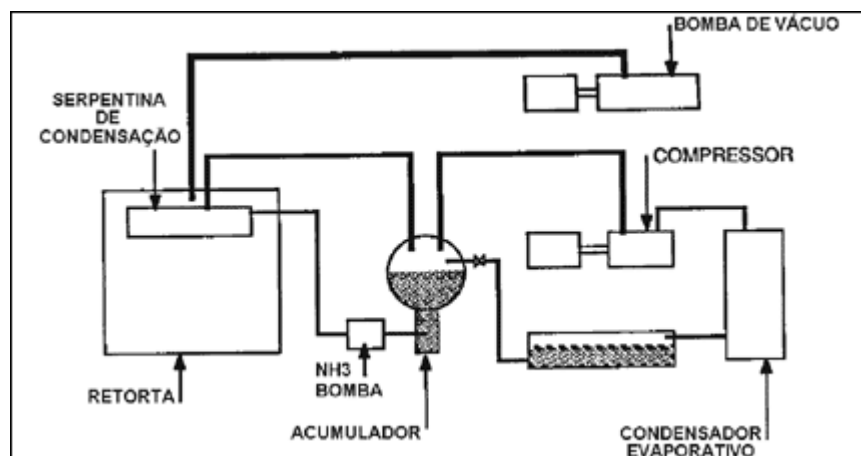


**Fonte:** Adaptado de ResearchGate, 2025.

A refrigeração ajudada por vácuo, como mostrado na figura 11, é uma novidade que aplica o conceito de resfriamento evaporativo em ambientes de pressão baixa (LEYBOLD, 2025; WEBER VACUUM GROUP, 2025). Ao colocar um alimento em uma câmara que está completamente vedada e diminuir a pressão significativamente, a água que está na superfície — e, em certa medida, dentro do alimento — se transforma em vapor a temperaturas bem menores do que os 100 °C que normalmente conhecemos (Devaraju, 2022). Esse fenômeno da evaporação atua de maneira rápida na remoção de calor, ajudando a tornar o processo de refrigeração mais uniforme em produtos que são bastante sensíveis ao

murchamento, como vegetais, ervas finas e flores comestíveis. Um dos pontos positivos dessa tecnologia é, de fato, a agilidade, que reduz o tempo em que os alimentos permanecem em faixas de temperatura propícias ao crescimento de microrganismos (LEYBOLD, 2025). No Brasil, a adoção dessa prática vem crescendo nas áreas voltadas para a horticultura de alto valor, como em Holambra (SP), que é famosa pela sua produção de flores. Além disso, várias propriedades situadas no Cerrado têm se especializado no fornecimento de hortaliças para grandes centros urbanos e mercados de exportação (WEBER VACUUM GROUP, 2025). A praticidade desse procedimento, combinada com sua eficácia para produtos que se deterioram rapidamente, aumenta a tendência de que essa técnica seja adotada em outros setores que precisam de uma rápida redução da temperatura logo após a colheita ou o processamento inicial.

**Figura 11 – Refrigeração assistida a vácuo com unidade de refrigeração de Amônia**



Fonte: Belzile, 1996.

Quando falamos sobre os sistemas e ciclos de refrigeração, cada método possui sua estrutura específica (Tabela 11), mas podemos destacar alguns aspectos que são comuns entre eles. Na criogenia, os aparelhos variam entre túneis e câmaras de congelamento, geralmente utilizando injeção controlada de nitrogênio (N<sub>2</sub>) ou dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), além de ventiladores potentes e sistemas transportadores por correia, com o objetivo de garantir a distribuição uniforme dos produtos. O hidroresfriamento, por sua vez, normalmente utiliza tanques ou esteiras de imersão e sistemas de aspersão, que precisam de um fluxo constante de água fria — que geralmente é mantida entre 0 e 2 °C — para aprimorar a transferência de calor (Chitarra, 2025). Por outro lado, o vácuo requer uma câmara resistente, junto com um sistema de bombas de vácuo que são projetadas para remover o ar e permitir a diminuição da

pressão a níveis adequados para a ebulição da água. Os condensadores, também conhecidos como trocadores de calor, têm a função de capturar o vapor gerado e fazem parte do sistema para manter a baixa pressão na câmara, evitando assim a sobrecarga das bombas (LEYBOLD, 2025).

**Quadro 6 – Características dos métodos avançados de refrigeração**

<b>Método</b>	<b>Principais Características</b>	<b>Aplicações Comuns</b>	<b>Tipos de Alimentos</b>
Refrigeração Criogênica	Uso de fluidos como nitrogênio líquido (-196 °C) ou CO <sub>2</sub> líquido (-78 °C) para resfriamento e congelamento rápido.	Linhas industriais de carnes, frutos do mar, pescados de alto valor agregado.	Carnes (bovina, suína, aves), pescado (peixes e frutos do mar).
Refrigeração Hidrotermal	Resfriamento por imersão ou aspersão em água gelada (0 °C a 4 °C), promovendo acelerada troca térmica.	Pós-colheita de frutas, legumes e hortaliças; redução de perdas na distribuição.	Hortaliças folhosas (alface, rúcula), raízes (cenoura) e frutas sensíveis.
Refrigeração Assistida por Vácuo	Redução da pressão atmosférica até níveis que induzem evaporação de água em temperaturas mais baixas.	Centrais de distribuição de hortaliças, unidades de processamento de produtos panificados.	Hortaliças folhosas, flores comestíveis, pães e produtos de confeitaria.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2025.

Assim, a relevância da implementação desses três métodos vai além da simples inovação tecnológica: ela está ligada à proteção da segurança alimentar, à preservação de características sensoriais e ao cumprimento das normativas nacionais e internacionais relacionadas ao transporte e à comercialização. Pesquisas que analisam os parâmetros de tempo, temperatura e umidade, juntamente com a caracterização físico-química dos produtos envolvidos, continuam sendo essenciais para aprimorar cada fase do processo (Agrimaint, 2025). Simultaneamente, a constante evolução dos equipamentos e a maior oferta de treinamentos especializados estão impulsionando a disseminação dessas práticas, ajudando o país a se afirmar como um dos principais produtores e exportadores de alimentos in natura e processados. A refrigeração criogênica, a hidrotermal e a assistida por vácuo, cada uma com suas características únicas, são soluções fundamentais para garantir a durabilidade e a competitividade de diversos setores alimentícios.

### 5.1.6. A Amônia (NH<sub>3</sub>) e o Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) como alternativas de fluidos refrigerantes

A amônia (NH<sub>3</sub>) é um dos fluidos refrigerantes mais antigos e eficazes usados na indústria de refrigeração, incluindo na conservação de alimentos. Sua utilização remonta ao século XIX, quando foi adotada em sistemas de refrigeração por compressão. Atualmente, a amônia continua sendo uma escolha comum em sistemas de refrigeração industriais e comerciais, especialmente em instalações de grande escala.

A amônia oferece várias vantagens como fluido refrigerante na conservação de alimentos: A amônia tem uma excelente capacidade de absorver calor e, portanto, é eficaz na remoção de calor dos compartimentos de armazenamento de alimentos. Ela é conhecida por sua alta eficiência energética, o que a torna uma opção econômica a longo prazo (Dittmer *et al.*, 2012).

A amônia tem um baixo Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP - Ozone Depletion Potential) e um baixo Potencial de Aquecimento Global (GWP - Global Warming Potential), tornando-a uma alternativa mais sustentável em comparação com outros fluidos refrigerantes, como os hidroclorofluorocarbonetos (HCFCs) ou os hidrofluorocarbonetos (HFCs) (Badia-Melis *et al.*, 2015).

A amônia é não tóxica quando utilizada corretamente e não deixa resíduos indesejados nos alimentos, garantindo a segurança alimentar (Kumari *et al.*, 2015). Facilidade de Detecção de Vazamentos: A amônia tem um odor distintivo e forte, tornando fácil a detecção de vazamentos, o que é importante para a segurança dos trabalhadores e a prevenção de perdas de produtos (Lang *et al.*, 2011).

No entanto, a utilização da amônia requer cuidados específicos, incluindo a manutenção regular e o monitoramento rigoroso de vazamentos, devido ao seu odor desagradável e à sua toxicidade em concentrações elevadas. Além disso, a amônia não é adequada para todos os tipos de instalações de refrigeração, sendo mais comumente encontrada em sistemas industriais e comerciais de grande escala.

Nos últimos anos, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), também conhecido com R744, tem emergido como alternativa para refrigeração eficiente e sustentável. Com propriedades

termodinâmicas únicas, o CO<sub>2</sub> oferece uma alta densidade e capacidade de refrigeração, permitindo a utilização de sistemas compactos e eficazes, especialmente em aplicações transcíticas e cascatas. Assim como a amônia, o CO<sub>2</sub> apresenta um ODP nulo e um GWP extremamente baixos, características que reforçam sua adequação as regulamentações ambientais mais rigorosas. (Badia-Melis *et al.*, 2015). Além disso, o CO<sub>2</sub> não é tóxico, não inflamável e está amplamente disponível, reduzindo os custos operacionais e facilitando sua adoção em sistemas de diferentes escalas, desde supermercados até grandes instalações industriais.

Enquanto a amônia continua sendo uma escolha mais comum para grandes sistemas devido à sua eficiência energética e sustentabilidade ambiental, o CO<sub>2</sub> surge como uma opção versátil e moderna, unindo desempenho e sustentabilidade. A escolha entre esses dois fluidos deve considerar as necessidades específicas do sistema e as exigências ambientais, mas ambos representam soluções fundamentais na evolução das tecnologias de refrigeração.

## 5.2. SETORES DE APLICAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO

### 5.2.1. Indústria de alimentos

A indústria de alimentos é um setor de importância crítica na economia global, desempenhando um papel fundamental na oferta de alimentos seguros e nutritivos para a população. Ela engloba diversas etapas, desde a produção agrícola até a fabricação, processamento, distribuição e comercialização de produtos alimentícios. A indústria de alimentos é responsável por garantir o abastecimento de alimentos em escala mundial.

**Figura 12 – A indústria brasileira de alimentos**



Fonte: ABIA, 2020.

Conforme dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), a produção global de alimentos tem apresentado um aumento constante para atender ao crescimento populacional. No entanto, o setor de alimentos enfrenta desafios significativos, tais como a necessidade de reduzir o desperdício de alimentos e aprimorar a eficiência na cadeia de suprimentos.

De acordo com a FAO, cerca de um terço de todos os alimentos produzidos para consumo humano é perdido ou desperdiçado anualmente. Essa estatística não apenas representa uma perda substancial de recursos, mas também gera impactos ambientais adversos, uma vez que o desperdício de alimentos contribui para as emissões de gases de efeito estufa.

A indústria de alimentos também é suscetível a uma série de fatores, como oscilações nos preços das matérias-primas, demanda do consumidor, regulamentações governamentais e mudanças nas preferências do mercado. A capacidade de gerenciar custos e minimizar perdas é essencial para a sustentabilidade econômica desse setor.

O uso de tecnologias avançadas, como sistemas de refrigeração eficientes e sistemas de rastreamento de alimentos, desempenha um papel fundamental na redução de custos e perdas na indústria de alimentos. Essas tecnologias contribuem para a conservação de alimentos perecíveis, reduzindo o desperdício e garantindo a segurança alimentar.

Portanto, a indústria de alimentos é um setor fundamental que enfrenta desafios significativos relacionados ao desperdício de alimentos, custos e eficiência da cadeia de suprimentos. O uso de tecnologias avançadas e práticas sustentáveis desempenha um papel crucial na abordagem desses desafios e na garantia do abastecimento de alimentos seguros e de qualidade para a população global.

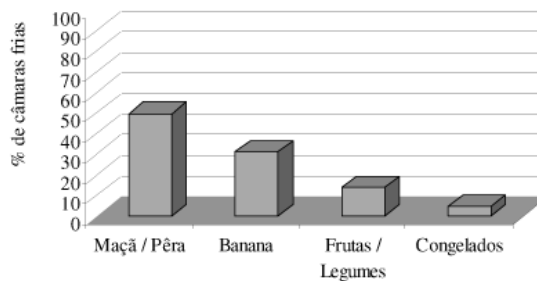
### 5.2.2. Agricultura e pecuária

A aplicação da refrigeração na agricultura e pecuária desempenha um papel fundamental na conservação de alimentos perecíveis e na manutenção da qualidade dos

produtos ao longo de toda a cadeia de abastecimento. Essa importância se reflete na crescente adoção de tecnologias de refrigeração em ambas as áreas.

Na agricultura, a refrigeração é amplamente utilizada para preservar frutas, legumes e outros produtos agrícolas. Isso é especialmente relevante em regiões onde a produção agrícola é sazonal, e os produtos precisam ser armazenados por longos períodos. A refrigeração ajuda a retardar o amadurecimento e a deterioração dos alimentos, mantendo sua frescura e valor nutricional. Além disso, permite o acesso a mercados distantes, ampliando as oportunidades de venda e exportação.

**Gráfico 2 – Diferentes produtos armazenados nas câmaras frias**



Fonte: Neto *et al.*, 2006.

De acordo com Macheka *et al.* (2017), a refrigeração desempenha um papel crucial na preservação de alimentos perecíveis na agricultura. Ela é essencial para manter a qualidade e prolongar a vida útil dos produtos agrícolas.

No setor de pecuária, a refrigeração desempenha um papel crítico na cadeia de abastecimento de carne, leite e outros produtos de origem animal. Isso inclui a refrigeração de câmaras de resfriamento e transporte de carne, bem como a conservação do leite em tanques de refrigeração. A manutenção de temperaturas adequadas é essencial para evitar a proliferação de bactérias e garantir a segurança alimentar.

Haug (1995) enfatiza a importância da refrigeração na pecuária, especialmente na conservação de carne e produtos lácteos. A refrigeração desempenha um papel vital na extensão da vida útil desses produtos e na manutenção da qualidade dos mesmos.

Portanto, a aplicação da refrigeração na agricultura e pecuária é crucial para garantir a disponibilidade de alimentos de qualidade, reduzir o desperdício e atender à crescente demanda por produtos agrícolas e de origem animal em todo o mundo.

### 5.2.3. Supermercados e varejo

A refrigeração é essencial nos supermercados e no setor de varejo, uma vez que esses estabelecimentos lidam com uma ampla variedade de produtos perecíveis, como alimentos frescos, laticínios, carnes e produtos congelados. A capacidade de manter esses produtos em temperaturas adequadas é crucial para garantir a qualidade e a segurança dos alimentos, bem como para atender às expectativas dos consumidores.

Nos supermercados, as prateleiras refrigeradas e as ilhas de congelamento desempenham um papel central na exibição e no armazenamento de produtos perecíveis. Os sistemas de refrigeração são projetados para manter temperaturas precisas, garantindo que os alimentos permaneçam frescos e seguros para o consumo. Além disso, sistemas de monitoramento e controle são comuns para garantir que as condições ideais sejam mantidas.

No setor de varejo, especialmente em lojas de conveniência e mercearias, os refrigeradores e freezers são amplamente utilizados para armazenar alimentos prontos para consumo, bebidas geladas e produtos congelados. Esses equipamentos permitem que os varejistas atendam às necessidades dos consumidores que desejam alimentos e bebidas resfriados ou congelados imediatamente.

De acordo com Papargyropoulou *et al.* (2014), os supermercados desempenham um papel crucial no combate ao desperdício de alimentos, uma vez que oferecem uma variedade de produtos perecíveis e podem implementar práticas de gestão de estoque e redução de perdas. A refrigeração adequada desempenha um papel importante nesses esforços, ajudando a manter os alimentos frescos por mais tempo.

Além disso, os sistemas de refrigeração em supermercados e varejo estão cada vez mais sendo projetados com eficiência energética em mente. Isso é importante não apenas para reduzir os custos operacionais, mas também para minimizar o impacto ambiental. A implementação de tecnologias mais sustentáveis, como refrigerantes de baixo impacto ambiental e sistemas de refrigeração de última geração, é uma tendência importante nesse setor.

A refrigeração desempenha um papel crítico nos supermercados e no varejo, garantindo a qualidade e a segurança dos alimentos perecíveis e contribuindo para a redução

do desperdício. A eficiência energética e a sustentabilidade também são considerações essenciais nesse contexto.

#### 5.2.4. Restaurantes e serviços de alimentação

A refrigeração nos restaurantes e serviços de alimentação, colaboram para a qualidade e a segurança dos alimentos. Os restaurantes e estabelecimentos de serviço de alimentação lidam com grandes quantidades de alimentos perecíveis diariamente, e a refrigeração é essencial para garantir a frescura dos ingredientes, prevenir a deterioração e minimizar o risco de contaminação alimentar.

Nos restaurantes, a refrigeração é usada para armazenar ingredientes como carnes, laticínios, frutas, legumes e outros produtos perecíveis. Além disso, as cozinhas comerciais geralmente possuem câmaras de resfriamento e freezers para conservar alimentos em grandes quantidades. A capacidade de manter esses ingredientes em temperaturas controladas é fundamental para a preparação de pratos de qualidade.

De acordo com Rizzo *et al.* (2011), a refrigeração desempenha um papel importante na segurança alimentar em restaurantes e estabelecimentos de serviço de alimentação. A manutenção de temperaturas adequadas ajuda a prevenir o crescimento de microrganismos patogênicos nos alimentos, reduzindo o risco de intoxicação alimentar.

Além disso, a refrigeração desempenha um papel na exposição de alimentos e bebidas aos clientes. Os balcões refrigerados e vitrines de exposição são comuns em restaurantes e estabelecimentos de serviço de alimentação, permitindo que os clientes vejam os produtos disponíveis. Isso é importante para atrair consumidores e influenciar suas escolhas alimentares.

No entanto, a eficiência energética também é uma consideração importante nesse setor. Os restaurantes geralmente operam com margens de lucro apertadas, e os custos de energia podem representar uma parte significativa das despesas operacionais. Portanto, muitos estabelecimentos estão adotando sistemas de refrigeração mais eficientes, como equipamentos com classificação *ENERGY STAR*, para reduzir os custos operacionais.

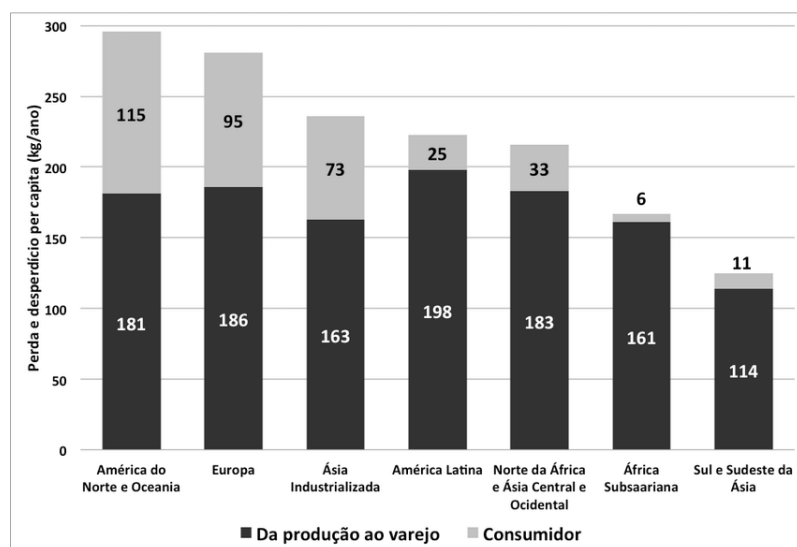
Em resumo, a refrigeração desempenha um papel vital nos restaurantes e serviços de alimentação, garantindo a qualidade, a segurança e a apresentação dos alimentos. A eficiência energética é uma tendência crescente, à medida que os estabelecimentos buscam equilibrar a qualidade dos alimentos com os custos operacionais.

### 5.2.5. Logística e transporte de alimentos

A logística e o transporte de alimentos desempenham um papel fundamental na garantia da disponibilidade de produtos frescos em mercados distantes. A refrigeração desempenha um papel crucial nesse contexto, pois permite o armazenamento e transporte de alimentos perecíveis em condições controladas de temperatura, garantindo que os produtos cheguem ao destino final com qualidade e segurança alimentar preservadas.

A cadeia de suprimentos de alimentos geralmente envolve múltiplos estágios, desde a produção até a distribuição e o varejo. Durante esse processo, os alimentos podem ser armazenados em câmaras frias, contêineres refrigerados ou veículos frigoríficos para manter as temperaturas ideais. Isso é particularmente relevante para produtos como frutas, legumes, carnes e laticínios, que são altamente perecíveis.

**Gráfico 3 – Perda e desperdício de alimentos por transporte indevido comparado ao consumidor**



Fonte: World Bank, 2014.

De acordo com Jedermann *et al.* (2014), a monitorização de temperatura e o controle durante o transporte de alimentos são essenciais para garantir a qualidade e a segurança alimentar. Falhas na manutenção das temperaturas adequadas podem levar à deterioração dos produtos e ao desperdício de alimentos. Portanto, sistemas de refrigeração confiáveis e eficazes são essenciais para minimizar as perdas ao longo da cadeia de abastecimento.

Além disso, a rastreabilidade e o monitoramento em tempo real são cada vez mais importantes na logística de alimentos. A tecnologia RFID (Radio-Frequency Identification) e sensores remotos estão sendo amplamente utilizados para acompanhar a temperatura dos produtos durante o transporte. Isso ajuda a identificar problemas em tempo real e tomar medidas corretivas para evitar perdas.

Em termos de transporte, contêineres refrigerados e caminhões frigoríficos são comuns na indústria de logística de alimentos. Eles são projetados para manter temperaturas controladas ao longo de rotas que podem abranger longas distâncias. Esses veículos são equipados com sistemas de refrigeração avançados, como compressores e evaporadores, para garantir o resfriamento eficiente dos produtos.

## **6 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Dentre as tecnologias emergentes na área da refrigeração, o resfriamento eletrocalórico destaca-se como uma opção promissora e ainda pouco explorada. Esse método utiliza materiais eletrocalóricos que, quando submetidos a um campo elétrico, apresentam variações de temperatura significativas, permitindo o resfriamento de maneira altamente eficiente e com menor impacto ambiental em comparação aos sistemas convencionais. Futuros estudos podem investigar a viabilidade de uso desses materiais em aplicações industriais e comerciais, especialmente para refrigeração de alimentos.

Entre as possíveis linhas de pesquisa, destacam-se identificação e desenvolvimento de materiais eletrocalóricos, abrindo precedentes necessários para explorar novos compostos com propriedades eletrocalóricas aprimoradas, incluindo maior amplitude de temperatura, durabilidade em condições industriais e compatibilidade com requisitos de segurança alimentar. Design de sistemas compactos e escaláveis, estudos que focariam no desenvolvimento de dispositivos que incorporem essa tecnologia em aplicações práticas,

como em refrigeradores comerciais, transporte de alimentos e câmaras frigoríficas. A miniaturização dos componentes e a eficiência térmica seriam pontos críticos abordados. A análise de impacto ambiental e custo-benefício, avaliando a sustentabilidade do ciclo de vida dos sistemas eletrocalóricos, considerando a fabricação dos materiais, a operação em longo prazo e o descarte, em comparação com sistemas tradicionais baseados em compressão de vapor, e pôr fim a integração com energias renováveis, onde seria analisada a possibilidade de combinar sistemas eletrocalóricos com fontes de energia renovável, como energia solar, oferece um caminho promissor para soluções mais sustentáveis e independentes de redes elétricas convencionais.

Além disso, explorar as combinações do resfriamento eletrocalórico com sistemas avançados de monitoramento e controle digital, analisando como a implementação de inteligência artificial e aprendizado de máquina pode otimizar o desempenho desses sistemas e os ajustando automaticamente os campos elétricos para diferentes demandas de refrigeração em tempo real.

Com o avanço dessas pesquisas, o resfriamento eletrocalórico tem o potencial de revolucionar o setor de refrigeração, proporcionando soluções que aliam alta eficiência energética, inovação tecnológica e um impacto ambiental reduzido, alinhando-se às crescentes demandas por sustentabilidade e inovação na cadeia do frio.

## 7 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o estudo da refrigeração voltada para a conservação de alimentos no Brasil vai além da simples avaliação do tamanho dos sistemas, sendo necessário entender de forma ampla toda a cadeia do frio. Neste trabalho, ficou claro que é fundamental unir aspectos que vão desde a produção e o processamento industrial, passando pela logística apropriada, até o armazenamento e a exibição final dos produtos para o consumidor. Essa integração mostra que é fundamental prestar atenção não só na escolha adequada dos fluidos refrigerantes — como o CO<sub>2</sub> e a amônia — mas também em investir em soluções tecnológicas que tornem a gestão da temperatura mais segura e eficiente. Isso se torna especialmente importante em um contexto onde a procura por qualidade e segurança alimentar está aumentando, o que, por sua vez, faz com que a indústria sinta a necessidade de investir em sistemas de refrigeração cada vez mais eficientes e sustentáveis.

Uma das principais contribuições deste estudo é a análise da utilização de novas tecnologias, como RFID, inteligência artificial (IA) e soluções de Internet das Coisas (IoT). Essas ferramentas aprimoram o monitoramento em tempo real e ajudam a reduzir erros humanos na manutenção das temperaturas ideais. Adotar esses recursos não só diminui o desperdício na cadeia de distribuição, mas também aumenta a rastreabilidade e a transparência dos processos. Isso traz mais confiabilidade para a cadeia do frio e, no fim das contas, ajuda a manter a qualidade dos alimentos até chegarem ao consumidor. Esse progresso tecnológico, por outro lado, precisa ser avaliado juntamente com o aumento dos custos e a complexidade da implementação. Isso traz a necessidade de treinar os profissionais e de uma gestão cuidadosa dos sistemas de refrigeração.

No contexto da Engenharia, os resultados deste estudo evidenciam a crescente necessidade de profissionais qualificados para desenvolver, implementar e gerenciar sistemas de refrigeração que cumpram exigências rigorosas de eficiência energética, sustentabilidade e segurança operacional. O desafio vai além de apenas entender os aspectos técnicos; envolve também a conexão entre diversas áreas, como a engenharia de processos, automação e logística, para assegurar que todas as fases da produção e distribuição de alimentos aconteçam de forma integrada e harmoniosa. Isso incentiva o surgimento de novas áreas de pesquisa e a criação de soluções inovadoras, especialmente em questões como a melhoria de fluidos refrigerantes alternativos, a otimização de sistemas de múltiplos estágios e a adoção de protocolos inteligentes para controle de temperatura.

Em resumo, é possível dizer que o progresso na refrigeração de alimentos, combinado com práticas sustentáveis e o uso consciente das novas tecnologias, serve como uma base sólida para o fortalecimento da indústria de alimentos no Brasil e globalmente. A engenharia é uma área essencial para o avanço desses sistemas, já que fornece os conhecimentos teóricos e práticos indispensáveis para elaborar soluções mais eficazes e com menos impacto no meio ambiente. Assim, ao ajudar a reduzir as perdas, manter a qualidade e garantir o bem-estar dos consumidores, a refrigeração alimentar se torna um elemento chave para a competitividade do setor. Isso ressalta a importância de pesquisas contínuas e políticas de incentivo que apoiem a excelência na gestão da cadeia do frio.

## REFERÊNCIAS

- ABAD, E. *et al.* RFID smart tag for traceability and cold chain monitoring of foods: demonstration in an intercontinental fresh fish logistic chain. **Journal of Food Engineering**, v. 93, n. 4, p. 394-399, ago. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877409000661?via%3Dihub>. Acesso em: 06 ago. 2024.
- ABREU, H. *et al.* Gestão de qualidade no transporte de alimentos perecíveis. *In: FatecLog*, 12., 2021, Mogi das Cruzes. **Anais [...]**. Gestão da cadeia de suprimentos no Agronegócio: Desafios e oportunidades no contexto atual. Disponível em: <https://fateclog.com.br/anais/2021/parte2/888-1186-1-RV.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2024.
- AMADOR, C.; EMOND, J.-P.; NUNES, M. C. Application of RFID technologies in the temperature mapping of the pineapple supply chain. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 3, n. 1, p. 26-33, fev. 2009. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Maria-Cecilia-Do-Nascimento-Nunes-2/publication/225162573\\_Application\\_of\\_RFID\\_Technologies\\_in\\_the\\_Temperature\\_Mapping\\_of\\_the\\_Pineapple\\_Supply\\_Chain/links/556b84ee08aec22683037b25/Application-of-RFID-Technologies-in-the-Temperature-Mapping-of-the-Pineapple-Supply-Chain.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Maria-Cecilia-Do-Nascimento-Nunes-2/publication/225162573_Application_of_RFID_Technologies_in_the_Temperature_Mapping_of_the_Pineapple_Supply_Chain/links/556b84ee08aec22683037b25/Application-of-RFID-Technologies-in-the-Temperature-Mapping-of-the-Pineapple-Supply-Chain.pdf). Acesso em: 06 ago. 2024.
- ASHRAE. *ASHRAE Handbook – Refrigeration*. **American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers**, Atlanta, 2022. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/17PAmpnE6hsUXQBhyWAUOfFRmYC6gQDN7/view>. Acesso em: 17 mar. 2025.
- AUNG, M. M.; CHANG, Y. S. Traceability in a food supply chain: safety and quality perspectives. **Food Control**, v. 39, n. 1, p. 172-184, mai. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956713513005811>. Acesso em: 06 ago. 2024.
- BADIA-MELIS, R.; MISHRA, P.; RUIZ-GARCÍA, L. Food traceability: new trends and recent advances: a review. **Food Control**, v. 57, p. 393-401, nov. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956713515002698>. Acesso em: 06 ago. 2024.
- BEN-TZUR, I. *et al.* The power of an integrated monitoring technology system for minimizing quality and food safety risks in fresh produce supply chain. **Acta Horti**, v. 1079, n. 2010, p. 351-357, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/287940772\\_Systems\\_approach\\_to\\_reducing\\_waste\\_in\\_the\\_fresh\\_produce\\_supply\\_chain#read](https://www.researchgate.net/publication/287940772_Systems_approach_to_reducing_waste_in_the_fresh_produce_supply_chain#read). Acesso em: 06 ago. 2024.
- BRAND, D. **Mode shift in perishables**: how much has shifted, and what does the future hold? Nova Iorque: SEABURY GROUP, 2014. *E-book* (6 p.). Disponível em: <http://ipaper.ipapercms.dk/MCI/Various/SeaburyModeshiftinperishables/>. Acesso em: 6 ago. 2024.
- BOBBO, S. *et al.* HFC & HC Blends as Refrigerants. *In: International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2004, Indiana. **Anais [...]**. Indiana: Purdue University, 2004. 1

online. Disponível em:

<https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1632&context=iracc>. Acesso em 06 ago. 2024.

ÇENGEL, Yunus A. **Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: McGRAW-HILL, 2011.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras: ESAL-FAEPE, 1990. 320 p.

CONTENTORES isotérmicos Isotec® TBX. **GEBHARDT LOGISTIC SOLUTIONS**.

Disponível em: <https://www.gehardtls.com.br/contentor-isotermico-isotec-tbx>. Acesso em: 30 nov. 2024.

COLD Chain Monitoring. **TRACKSTER**, Kharghar, 2024. Disponível em:

<https://www.trackster.in/cold-chain-monitoring.html/>, Acesso em 06 ago. 2024.

COSTA, C. *et al.* A review on agri-food supply chain traceability by means of RFID technology. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 2, p. 353-366, set. 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/235352443\\_A\\_Review\\_on\\_Agri-food\\_Supply\\_Chain\\_Traceability\\_by\\_Means\\_of\\_RFID\\_Technology\\_A\\_Review\\_on\\_Agri-food\\_Supply\\_Chain\\_Traceability\\_by\\_Means\\_of\\_RFID\\_Technology#read](https://www.researchgate.net/publication/235352443_A_Review_on_Agri-food_Supply_Chain_Traceability_by_Means_of_RFID_Technology_A_Review_on_Agri-food_Supply_Chain_Traceability_by_Means_of_RFID_Technology#read). Acesso em: 06 ago. 2024.

CORREIA *et al.* SENSOR DE TEMPERATURA VIA RASPBERRY PARA TRANSPORTE DE REFRIGERADOS. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 19–26, jun. 2018. DOI: 10.17564/2359-4942.2018v3n1p19-26. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/exatas/article/view/5464/2897>. Acesso em: 06 ago. 2024.

CUIÑAS, I. *et al.* RFID-based traceability along the food-production chain. **IEEE Antennas & Propagation Magazine**, v. 56, n. 2, p. 196-207, abr. 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6837090>. Acesso em: 06 ago. 2024.

CRYOGENIC food processing: what it is and its characteristics. **CRYOSPAIN**, 2025.

Disponível em: <https://cryospain.com/cryogenic-food-processing>. Acesso em 10 mar. 2025.

DEVARAJU, R. *et al.* Fundamentals of Vacuum Cooling for Perishable Foods. **Just Agriculture**, Índia, v. 2, n. 9, p. 1-4, mai. 2022. Disponível em:

<https://justagriculture.in/files/newsletter/2022/may/39.%20Vacuum%20Cooling%20of%20Foods.pdf>. Acesso em 10 mar. 2025.

DITTMER, P.; VEIGT, M.; SCHOLZ-REITER, B.; HEIDMANN, N.; PAUL, S. The intelligent container as a part of the Internet of Things. *In*: 2012 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CYBER TECHNOLOGY IN AUTOMATION, CONTROL, AND INTELLIGENT SYSTEMS (CYBER), 2012, Bangkok, Thailand. **Anais [...]**. USA: IEEE, 2012. p. 209-214. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6392555>. Acesso em: 06 ago. 2024.

DUPONT, J. L.; EL AHMAR, A.; GUILPART, J. The role of refrigeration in worldwide nutrition. **International Institute of Refrigeration**. Informatory Note on Refrigeration and

Food, v. 18, n. 6, mar. 2020. Disponível em: <https://iifiir.org/fr/documents/39820/download>. Acesso em: 06 ago. 2024.

ELANSARI, A. M.; FENTON, D. L.; CALLAHAN, C. W. *In: Postharvest Technology Of Perishable Horticultural Commodities. **Precooling***. Flórida: Universidade da Flórida, 2019. p. 161-207. Disponível em: [https://irrec.ifas.ufl.edu/postharvest/HOS\\_5085C/Reading%20Assignments/2019-Postharvest\\_Technology-Yahia/2019-Ch.\\_06\\_Precooling-Yahia.pdf](https://irrec.ifas.ufl.edu/postharvest/HOS_5085C/Reading%20Assignments/2019-Postharvest_Technology-Yahia/2019-Ch._06_Precooling-Yahia.pdf). Acesso em: 10 mar. 2025.

FOOD and Beverage Services for the Cryogenic Industry. THE CRYOGROUP, 2025. Disponível em: <https://www.thecryogroup.com/industries-we-serve/food-beverage-cryogenics>. Acesso em 10 mar. 2025.

GAO, J. **Intelligent and interactive package based on RFID and WSN**. Suécia: Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2011. *Online*. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:461338/FULLTEXT06.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2024.

GARCIA, M.; BRI, D.; SENDRA, S.; LLORET, J. Practical deployments of wireless sensor networks: a survey. **International Journal on Advances in Networks and Services**, v. 3, n. 1, p. 170-185, 2010. Disponível em: [https://personales.upv.es/thinkmind/dl/journals/netser/netser\\_v3\\_n12\\_2010/netser\\_v3\\_n12\\_2010\\_15.pdf](https://personales.upv.es/thinkmind/dl/journals/netser/netser_v3_n12_2010/netser_v3_n12_2010_15.pdf). Acesso em: 06 ago. 2024.

HAAN, G. H.; HILLEGERSBERG, J.; JONG, E.; SIKKEL, K. Adoption of wireless sensors in supply chains: a process view analysis of a pharmaceutical cold chain. **Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research**, v. 8, n. 2, p. 138-154, ago. 2013. Disponível em: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S071818762013000200011&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071818762013000200011&lng=es&nrm=iso). Acesso em: 6 ago. 2024.

HEIDMANN, N. *et al.* A low-power wireless UHF/LF sensor network with web-based remote supervision: implementation in the intelligent container. *In: IEEE SENSORS 2013*, 2013, Baltimore. **Anais [...]**. USA: IEEE, 2013. p. 3-6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6688422>. Acesso em: 06 ago. 2024.

INTARCON. **Everything you need to know about refrigeration evaporators**. Córdoba: Intarcon, 11 out. 2022. Disponível em: <https://www.intarcon.com/en/everything-you-need-to-know-about-refrigeration-evaporators/>. Acesso em: 26 dez. 2024.

JEDERMANN, R. Project results. **Institute for Microsensors, actuators and systems**, Alemanha, 2014. Disponível em: <http://www.intelligentcontainer.com/en/project-results.html>. Acesso em: 06 ago. 2024.

JEDERMANN, R. *et al.* Testing network protocols and signal attenuation in packed food transports. **International Journal of Sensor Networks**, v. 9, n. 3-4, p. 170, 2011. Disponível em: [http://www.intelligentcontainer.com/fileadmin/Redakteure/pdfs/2011/\\_Jed11a\\_IJSNet903-404\\_Jedermann\\_et\\_al\\_Final.pdf](http://www.intelligentcontainer.com/fileadmin/Redakteure/pdfs/2011/_Jed11a_IJSNet903-404_Jedermann_et_al_Final.pdf). Acesso em: 06 ago. 2024.

JEDERMANN, Reiner *et al.* Reducing food losses by intelligent food logistics. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 372, n. 2017, p. 20130302, jun. 2014. Disponível em: [https://libkey.io/libraries/665/articles/50200514/full-text-file?utm\\_source=api\\_2480](https://libkey.io/libraries/665/articles/50200514/full-text-file?utm_source=api_2480). Acesso em: 06 ago. 2024.

JEDERMANN, Reiner *et al.* Remote quality monitoring in the banana chain. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 372, n. 2017, p. 20130303, 2014. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rsta.2013.0303>. Acesso em: 06 ago. 2024.

JEDERMANN, R.; PÖTSCH, T.; LLOYD, C. Communication techniques and challenges for wireless food quality monitoring. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 372, n. 2017, p. 20130304, 2014. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4006169/pdf/rsta20130304.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2024.

JEDERMANN, R.; RUIZ-GARCIA, L.; LANG, W. Spatial temperature profiling by semi-passive RFID loggers for perishable food transportation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 65, n. 2, p. 145-154, 2009. Disponível em: [https://oa.upm.es/5314/2/INVE\\_MEM\\_2009\\_69910.pdf](https://oa.upm.es/5314/2/INVE_MEM_2009_69910.pdf). Acesso em: 06 ago. 2024.

KADER, A. A. Postharvest biology and technology: An Overview. *In*: KADER, A. A. (Ed.). **Postharvest biology and technology**. 3th ed. Oakland: University of California Agricultural and Natural Resources, 2002. p. 39-48. Disponível em: [https://irrec.ifas.ufl.edu/postharvest/HOS\\_5330/Ch4-2002-Postharvest%20Technology%20of%20Horticultural%20Crops%20-%20Kader.pdf](https://irrec.ifas.ufl.edu/postharvest/HOS_5330/Ch4-2002-Postharvest%20Technology%20of%20Horticultural%20Crops%20-%20Kader.pdf). Acesso em: 10 mar. 2025

KALIZAN, J.; TUŠEK, J. Caloric Micro-Cooling: Numerical modelling and parametric investigation. **Energy Conversion and Management**, v. 225, p. 113421, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2108.12164>. Acesso em: 30 nov. 2024.

KAUSHIK, S.; SINGH, C. Monitoring and controlling in food storage system using wireless sensor networks based on Zigbee & Bluetooth modules. **International Journal of Multidisciplinary in Cryptology and Information Security**, v. 2, n. 3, p. 7-10, jun. 2013. Disponível em: <https://www.warse.org/IJMCIS/static/pdf/file/ijmcis01232013.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2024.

KETZENBERG, M. E.; BLOEMHOF-RUWAARD, J. M. The value of RFID technology enabled information to manage perishables. **ERIM Report Series Research in Management**. Rotterdam, p. 1-37, abr. 2009. Disponível em: <https://repub.eur.nl/pub/15412/ERS-2009-020-LIS.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2024.

KUMARI, L. *et al.* Application of RFID in agri-food sector. **Trends in Food Science & Technology**, v. 43, n. 2, p. 144-161, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224415000461>. Acesso em: 06 ago. 2024.

LANG, W. *et al.* The “Intelligent Container”: a cognitive sensor network for transport management. **IEEE Sensors Journal**, v. 11, n. 3, p. 688-698, 2011. Disponível em: <http://www.sfb637.uni-bremen.de/pubdb/repository/SFB637-B6-11-001-IJ.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2024.

LÜTTJEN, M.; DITTMER, P.; VEIGT, M. Quality driven distribution of intelligent containers in cold chain logistics networks. **Production Engineering**, v. 7, n. 2-3, p. 291-297, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/257726676\\_Quality\\_driven\\_distribution\\_of\\_intelligent\\_containers\\_in\\_cold\\_chain\\_logistics\\_networks#read](https://www.researchgate.net/publication/257726676_Quality_driven_distribution_of_intelligent_containers_in_cold_chain_logistics_networks#read). Acesso em: 30 nov. 2024.

MAINETTI, L. *et al.* An RFID-based tracing and tracking system for the fresh vegetables supply chain. **International Journal of Antennas and Propagation**, v. 2013, p. 1-15, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1155/2013/531364>. Acesso em: 30 nov. 2024.

MEJJAOULI, S.; BABICEANU, R. F. RFID-wireless sensor networks integration: decision models and optimization of logistics systems operations. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 35, p. 234-245, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612515000114>. Acesso em: 30 nov. 2024.

NUNES, M. C. *et al.* Improvement in fresh fruit and vegetable logistics quality: berry logistics field studies. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 372, n. 20130307-20130307, 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/262074265\\_Improvement\\_in\\_fresh\\_fruit\\_and\\_vegetable\\_logistics\\_quality\\_Berry\\_logistics\\_field\\_studies#read](https://www.researchgate.net/publication/262074265_Improvement_in_fresh_fruit_and_vegetable_logistics_quality_Berry_logistics_field_studies#read). Acesso em: 30 nov. 2024.

NUNES, M. T. B. *et al.* Revisão: alimentos frescos minimamente processados embalados em atmosfera modificada. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjft/a/qTvLWTLGCbMsk3vRZqBJD8S/?format=pdf>. Acesso em: 30 nov. 2024.

OGASAWARA, A.; YAMASAKI, K. A temperature-managed traceability system using RFID tags with embedded temperature sensors. **NEC Technical Journal**, v. 1, n. 2, p. 82-86, 2006. Disponível em: <https://www.nec.com/en/global/techrep/journal/g06/n02/pdf/t060219.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2024.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Armazenamento refrigerado de frutas e hortaliças: uma revisão de literatura. **Revista de Iniciação Científica, Universidade do Vale do Paraíba**, São Paulo, 2018. Disponível em: [https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2018/anais/arquivos/RE\\_0316\\_0481\\_01.pdf](https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2018/anais/arquivos/RE_0316_0481_01.pdf). Acesso em: 30 nov. 2024.

PEDROSO, M. C.; ZWICKER, R.; DE SOUZA, C. A. Adoção de RFID no Brasil: um estudo exploratório. **Revista de Administração**, v. 10, n. 1, p. 12-36, 2009. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/RAM/article/view/378/216>. Acesso em: 06 ago. 2024.

PEREIRA, V. DE F. *et al.* Evaluation of temperatures in a refrigerated container for chilled and frozen food transport. **Food Science and Technology**, v. 30, n. 1, p. 158–165, jan. 2010. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cta/a/3yWZ3bw78MR9QYhWqdDTQyL/?lang=en&format=pdf>. Acesso em: 06 ago. 2024.

PREVENÇÃO de perdas: como reduzir o desperdício de produtos refrigerados. **SYOS**, Rio de Janeiro, jul. 2024. Disponível em: <https://blog.syos.com/blog/prevencao-de-perdas-como-reduzir-o-desperdicio-de-produtos-refrigerados/>. Acesso em: 06 ago. 2024.

RIZZO, F.; BARBONI, M.; FAGGION, L.; AZZALIN, G.; SIRONI, M. Improved security for commercial container transports using an innovative active RFID system. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 34, n. 3, p. 846-852, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1084804510000809?via%3Dihub>. Acesso em: 06 ago. 2024.

STOECKER, Wilbert F.; JABARDO, José M. Saiz. **Refrigeração industrial**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 530 p.

THAPA, S. Hydrocarbons Prove Best Natural Refrigerant for Ultra-Low-Temperature Applications, Study Finds. **Natural Refrigerants**, 2024. Disponível em: <https://naturalrefrigerants.com/hydrocarbons-prove-best-natural-refrigerant-for-ultra-low-temperature-applications-study-finds/>. Acesso em 06 ago. 2024.

TRANSITIONING to Low-GWP Alternatives in Commercial Refrigeration. **United States Environmental Protection Agency**, 2016 Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-12/documents/international\\_transitioning\\_to\\_low-gwp\\_alternatives\\_in\\_commercial\\_refrigeration.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-12/documents/international_transitioning_to_low-gwp_alternatives_in_commercial_refrigeration.pdf), Acesso em 06 ago. 2024.

TRANSITIONING to Low-GWP Alternatives in Transport Refrigeration. **United States Environmental Protection Agency**, 2015. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/transitioning\\_to\\_low-gwp\\_alternatives\\_in\\_transport\\_refrigeration.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/transitioning_to_low-gwp_alternatives_in_transport_refrigeration.pdf), Acesso em 06 ago. 2024

UNDERSTANDING the right vacuum pump for your food application. **LEYBOLD**. 2021. Disponível em: <https://www.leybold.com/en-in/knowledge/blog/understanding-the-right-vacuum-pump-for-your-food-application>. Acesso em 10 mar. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **Congelamento criogênico**. Disponível em: [https://www.ufrgs.br/napead/projetos/vegetais-congelados/cong\\_criogenico.php](https://www.ufrgs.br/napead/projetos/vegetais-congelados/cong_criogenico.php). Acesso em: 30 nov. 2024.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Instituto de Física Gleb Wataghin. **Refrigeração criogênica**. São Paulo, 2022. Disponível em:

<https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2022/08/Refrigerac%CC%A7a%CC%83o-Crioge%CC%82nica.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2024.

VACUUM cooling - Fresh produce from harvest to table. **WEBER VACUUM GROUP**, Zwijndrecht, 2024. Disponível em: <https://webervacuum.group/blog/vacuum-cooling-fresh-produce-food-and-bakery>. Acesso em 10 mar. 2025.

WANG, Z. et al. Materials with high electrocaloric effect for refrigeration applications. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 5.1, p. 36-42, 2010. Disponível em: <https://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/remap/article/viewFile/171/137>. Acesso em: 30 nov. 2024.