



SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COMERCIAL ALIMENTAR SUPERMERCADISTA: UMA INTRODUÇÃO ÀS NORMAS DE SEGURANÇA OPERACIONAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

COMMERCIAL FOOD REFRIGERATION SYSTEM FOR SUPERMARKETS: AN INTRODUCTION TO OPERATIONAL SAFETY AND ENERGY EFFICIENCY STANDARDS

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN COMERCIAL DE ALIMENTOS PARA SUPERMERCADOS: INTRODUCCIÓN A LAS NORMAS DE SEGURIDAD OPERATIVA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA.

RICARDO FREGONESE | ricardo.fregonese@unitau.br | Universidade de Taubaté /SP

IVAIR ALVES DOS SANTOS | ivair.santos@unitau.br | Universidade de Taubaté /SP

ROQUE ANTÔNIO MOURA | roque.amoura@unitau.br | Universidade de Taubaté /SP

RESUMO

Este estudo analisa as inter-relações entre conformidade normativa, segurança operacional, eficiência energética e sustentabilidade ambiental aplicadas aos sistemas de refrigeração comercial no segmento do varejo alimentar supermercadista. O parque frio dessas instalações desponta como um elemento mecânico estratégico e indispensável para a integridade da segurança alimentar, respondendo por uma parcela crítica que oscila entre 40% e 60% de toda a demanda de energia elétrica requerida pelas lojas. Metodologicamente, a investigação delineou-se como uma pesquisa aplicada de abordagem qualitativa e finalidade exploratório-descritiva, estruturada sob a forma de uma revisão bibliográfica, documental e normativa de trabalhos publicados no intervalo entre 2015 e 2025. Os resultados demonstram que o cumprimento rigoroso do arcabouço regulatório englobando diretrizes como a ABNT NBR 16069, ISO 5149, ASHRAE Standards e as Normas Regulamentadoras do MTE atuam de maneira multidimensional para mitigar os riscos mecânicos, elétricos e químicos, expandindo a vida útil do maquinário e prevenindo perdas financeiras na cadeia do frio. Adicionalmente, verifica-se que a transição tecnológica imposta pela Emenda de Kigali impulsiona o emprego de fluidos refrigerantes naturais, com destaque para o dióxido de carbono em regime transcrito. A integração desses fluidos a algoritmos inteligentes de modulação térmica reduz em mais de 60% as taxas do indicador de Impacto de Aquecimento Equivalente Total (TEWI) e gera economias elétricas imediatas superiores a 20%. Conclui-se que a articulação entre as boas práticas de engenharia e os critérios da agenda ESG confere às organizações uma relevante mitigação de passivos ambientais e otimização de custos, consolidando o ecodesenho como fator de competitividade no setor.

Palavras-chave: Refrigeração Comercial; Supermercados; Eficiência Energética; Sustentabilidade; Segurança Operacional.

ABSTRACT

This study analyzes the interrelationships between regulatory compliance, operational safety, energy efficiency, and environmental sustainability applied to commercial refrigeration systems in the supermarket food retail segment. The cold storage facilities of these installations stand out as a strategic and indispensable mechanical element for food safety integrity, accounting for a critical portion that ranges between 40% and 60% of the total electricity demand required by the stores. Methodologically, the investigation was designed as applied research with a qualitative approach and exploratory-descriptive purpose, structured as a bibliographic, documentary, and normative review of works published between 2015 and 2025. The results demonstrate that strict compliance with the regulatory framework, encompassing guidelines such as ABNT NBR 16069, ISO 5149, ASHRAE Standards, and the Regulatory Standards of the Brazilian Ministry of Labor and Employment (MTE), acts in a multidimensional way to mitigate mechanical, electrical, and chemical risks, extending the lifespan of machinery and preventing financial losses in the cold chain. Additionally, it is observed that the technological transition imposed by the Kigali Amendment promotes the use of natural refrigerants, particularly carbon dioxide in transcritical regimes. The integration of these fluids with intelligent thermal modulation algorithms reduces Total Equivalent Warming Impact (TEWI) rates by more than 60% and generates immediate electricity savings exceeding 20%. It is concluded that the articulation between good engineering practices and ESG agenda criteria provides organizations with significant mitigation of environmental liabilities and cost optimization, consolidating ecodesign as a factor of competitiveness in the sector.

Keywords: Commercial Refrigeration; Supermarkets; Energy Efficiency; Sustainability; Operational Safety.

RESUMEN

Este estudio analiza las interrelaciones entre el cumplimiento normativo, la seguridad operativa, la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental aplicadas a los sistemas de refrigeración comercial en el segmento de venta minorista de alimentos en supermercados. Las instalaciones de almacenamiento en frío de estos establecimientos se destacan como un elemento mecánico estratégico e indispensable para la integridad de la seguridad alimentaria, representando una porción crítica que oscila entre el 40 % y el 60 % de la demanda total de electricidad requerida por las tiendas. Metodológicamente, la investigación se diseñó como una investigación aplicada con un enfoque cualitativo y un propósito exploratorio-descriptivo, estructurada como una revisión bibliográfica, documental y normativa de trabajos publicados entre 2015 y 2025. Los resultados demuestran que el estricto cumplimiento del marco normativo, que abarca directrices como ABNT NBR 16069, ISO 5149, las normas ASHRAE y las normas reglamentarias del Ministerio de Trabajo y Empleo de Brasil (MTE), actúa de manera multidimensional para mitigar los riesgos mecánicos, eléctricos y químicos, extendiendo la vida útil de la maquinaria y previniendo pérdidas financieras en la cadena de frío. Además, se observa que la transición tecnológica impuesta por la Enmienda de Kigali promueve el uso de refrigerantes naturales, en particular el dióxido de carbono en regímenes transcíticos. La integración de estos fluidos con algoritmos inteligentes de modulación térmica reduce las tasas de Impacto Total Equivalente en el Calentamiento (TEWI) en más del 60 % y genera ahorros inmediatos de electricidad superiores al 20 %. Se concluye que la articulación entre las buenas prácticas de ingeniería y los criterios de la agenda ESG proporciona a las organizaciones una mitigación significativa de los pasivos ambientales y una optimización de costos, consolidando el ecodiseño como un factor de competitividad en el sector.

Palabras clave: Refrigeración comercial; Supermercados; Eficiencia energética; Sostenibilidad; Seguridad operativa.

1. INTRODUÇÃO

No contexto do varejo alimentar contemporâneo, a infraestrutura mecânica voltada à refrigeração comercial atua como um componente estratégico fundamental para a viabilidade operacional das empresas. A função desses sistemas vai além da simples conservação térmica de mercadorias perecíveis; eles constituem a base para garantir a segurança alimentar, mitigar riscos biológicos, preservar as características qualitativas dos produtos e otimizar os fluxos de processos nos supermercados (Evangelista, 2008).

No panorama brasileiro, o setor supermercadista destaca-se pelo uso intensivo de eletricidade. Estudos técnicos indicam que as centrais de compressão e os balcões de exposição respondem por uma parcela expressiva dos custos energéticos, variando de 40% a 60% do consumo global de uma loja (Tassou *et al.*, 2011).

Diante dessa magnitude, intervenções e melhorias no rendimento térmico do ciclo de compressão mecânica de vapor possuem a capacidade de proporcionar retornos financeiros expressivos, diminuindo os custos operacionais fixos do segmento.

Além dos fatores econômicos, a necessidade global de mitigar os impactos das mudanças climáticas tem impulsionado transformações tecnológicas profundas na engenharia do frio. Tratados internacionais proeminentes, tais como o Protocolo de Montreal e a Emenda de Kigali, estabeleceram prazos severos para a descontinuação de substâncias que destroem a camada de ozônio e para a redução drástica de hidrofluorcarbonos (HFCs) que apresentam elevado potencial de aquecimento global (Correia; Viagi; Moura, 2026). Essa regulamentação obriga o mercado a adotar fluidos refrigerantes alternativos de matriz ecológica, com ênfase nos fluidos naturais.

Entretanto, embora o meio acadêmico disponha de pesquisas isoladas abordando a conservação de energia, a segurança física de instalações ou a sustentabilidade das plantas, identifica-se uma carência de investigações que unifiquem essas vertentes de maneira integrada.

Há uma lacuna teórica e prática sobre a harmonização simultânea entre os critérios normativos vigentes, a performance termodinâmica do ciclo, as exigências ecológicas e as diretrizes de governança ambiental, social e corporativa (ESG) voltadas às especificidades do comércio de alimentos (Correia; Viagi; Moura, 2026).

A dispersão dessas informações restringe o desenvolvimento de ferramentas metodológicas sistêmicas capazes de orientar decisões mais seguras nas fases de projeto, operação e manutenção preditiva das centrais frigoríficas.

Diante desse cenário, este estudo objetiva analisar, sob o escopo da engenharia mecânica, a articulação entre a conformidade regulatória, a confiabilidade operacional, a eficiência energética e a sustentabilidade socioambiental em sistemas de refrigeração aplicados a supermercados.

Busca-se, dessa forma, mapear as macrotendências regulatórias globais que direcionam a seleção de novos fluidos operantes e a concepção de projetos térmicos alinhados aos preceitos do *ecodesign*.

2. REVISÃO DA LITERATURA

As soluções de frio aplicadas ao setor comercial operam, em sua maioria, a partir do ciclo termodinâmico de compressão mecânica de vapor. Essa arquitetura padrão é composta por quatro elementos principais interconectados em um circuito fechado: o compressor, o condensador, o mecanismo de expansão (seja por válvula ou tubo capilar) e o evaporador (Dossat, 2004).

A dinâmica motriz desse sistema consiste em absorver as cargas térmicas sensível e latente de um compartimento ou produto resfriado e, utilizando energia mecânica e a transição de fase do fluido operante, rejeitar esse calor excedente para o ambiente externo, que se encontra em um patamar de temperatura mais elevado (Çengel; Boles, 2013).

2.1 CONFORMIDADE NORMATIVA E REGULAMENTAR

O cumprimento das diretrizes técnicas representa um dos fundamentos da engenharia do frio na atualidade, dado que o emprego de parâmetros normatizados busca uniformizar os processos e reduzir os riscos operacionais em instalações de grande porte (Brasil, 2004; Brasil, 2022).

No escopo dos projetos comerciais, destacam-se os seguintes instrumentos regulatórios:

- ABNT NBR 16069: Estabelece os parâmetros de segurança física para a operação de sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor.
- ISO 5149: Regulamento internacional focado nas exigências operacionais e de preservação ambiental para plantas frigoríficas e bombas de calor.
- Normas Regulamentadoras do MTE (NR-10, NR-12, NR-13 e NR-35): Resguardam as condições de trabalho dos técnicos ao preverem requisitos para serviços em eletricidade, proteção em maquinários, operação de vasos de pressão e atividades em altura ao longo das etapas de montagem e manutenção.
- RDC nº 216/Anvisa: Determina as boas práticas para serviços de alimentação, instituindo faixas térmicas rígidas para assegurar a integridade biológica de insumos estocados.
- ASHRAE Standard 15 e Standard 34: Padrões globais que categorizam o grau de inflamabilidade e toxicidade de compostos químicos, direcionando o projeto seguro de salas de máquinas.

2.2 TRANSIÇÃO TECNOLÓGICA E O REFLEXO DOS TRATADOS INTERNACIONAIS

O segmento global de refrigeração comercial passou por modificações estruturais profundas impulsionadas por acordos de preservação ambiental. O Protocolo de Montreal exerceu papel restritivo ao definir os prazos de eliminação de substâncias halogenadas que contêm cloro, como os clorofluorcarbonos (CFCs) e os hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), em razão do potencial de destruição da camada de ozônio dessas moléculas (Stoecker; Jones, 1985; Whitman *et al.*, 2017).

Posteriormente, a validação da Emenda de Kigali ampliou a abrangência desses mecanismos de controle ao estipular metas para a redução gradual do consumo e da manufatura de hidrofluorcarbonos (HFCs). Embora esses fluidos sintéticos não causem danos à camada de ozônio, eles apresentam um elevado Potencial de Aquecimento Global (GWP), demandando sua substituição gradativa (Incropera *et al.*, 2008).

2.3 METODOLOGIAS E ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A otimização do rendimento de uma planta térmica instalada no varejo de alimentos está associada ao controle rigoroso das trocas calóricas indesejadas e ao aumento da eficiência dos componentes mecânicos (Correia; Viagi; Moura, 2026). Entre os principais procedimentos de engenharia aplicados para conter o consumo elétrico nesses estabelecimentos, sobressaem-se:

- Pressão de Condensação Flutuante (*Floating condensing pressure*): Lógica de controle que reduz a pressão de descarga em consonância com o decréscimo da temperatura de bulbo úmido do ambiente externo, atenuando a razão de compressão do sistema.
- Pressão de Sucção Flutuante (*Floating suction pressure*): Mecanismo de ajuste dinâmico que eleva a pressão de evaporação até o limite de conservação dos alimentos, diminuindo o esforço mecânico exigido do compressor.
- Inversores de Frequência em Compressores: Ajuste eletromecânico da velocidade de rotação do motor para alinhar o fluxo volumétrico do fluido às flutuações reais da carga térmica no ponto de venda.
- Válvulas de Expansão Eletrônicas: Asseguram a regulação precisa do superaquecimento do fluido na saída do bloco evaporador, elevando a performance do trocador sob condições de carga parcial.

- Sistemas de Recuperação de Calor: Reaproveitamento da energia térmica rejeitada na tubulação de descarga dos compressores para o aquecimento de água de uso sanitário ou alimentação de ciclos de degelo.
- Gerenciamento Inteligente de Degelo: Substituição dos ciclos temporizados automáticos por varreduras baseadas em diferenciais de temperatura ou pressão, atuando somente quando há formação real de camada de gelo nas serpentinas.

2.4 INTEGRAÇÃO DOS CRITÉRIOS ESG À REFRIGERAÇÃO COMERCIAL

A avaliação do nível de sustentabilidade de uma estrutura comercial deve considerar indicadores consolidados pela comunidade científica. O Potencial de Aquecimento Global (GWP) e o Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP) atuam como indicadores químicos dos fluidos refrigerantes (IIAR, 2020).

De forma complementar, o Impacto de Aquecimento Equivalente Total (TEWI) e o Desempenho Climático do Ciclo de Vida (LCCP) calculam o balanço ecológico global por meio do somatório entre as emissões diretas (vazamentos do circuito) e indiretas, relacionadas à demanda de eletricidade gerada pela operação ao longo dos anos (ASHRAE, 2018).

A aplicação dos preceitos de governança corporativa ESG serve como um referencial para direcionar a implantação de uma refrigeração inteligente e sustentável sob três dimensões:

- Ambiental (E): Compreende a eficiência intrínseca da central e o controle de seus efluentes e resíduos. Contempla o uso de expositores fechados dotados de vidros de isolamento térmico avançado, a escolha de fluidos ecológicos e a atenuação direta das emissões de carbono.
- Social (S): Envolve os impactos sobre a comunidade e os colaboradores, englobando a manutenção de rotinas seguras para as equipes técnicas, a atenuação de ruídos sonoros em perímetros urbanos e a garantia de que os processos preservem a integridade sanitária dos alimentos ofertados.
- Governança (G): Diz respeito à clareza administrativa no acompanhamento de metas ambientais institucionais, assegurando a realização de auditorias regulares, a contenção de vazamentos gasosos e o descarte correto de componentes obsoletos.

2.5 FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O aproveitamento energético e as condições operacionais das centrais de refrigeração estão condicionados aos preceitos da Segunda Lei da Termodinâmica. Sob a ótica macroscópica, essa lei determina que o transporte de calor de uma região de menor temperatura para outra de maior nível térmico demanda o fornecimento de trabalho externo ao ciclo, cuja proporção cresce em função da entropia gerada internamente (Çengel; Boles, 2013; Evans, 2019).

Por ser irreversível, os componentes e os processos de troca térmica fazem com que o comportamento real do sistema se afaste das condições ideais do Ciclo de Carnot. As causas principais para a destruição de energia e a consequente perda de rendimento na refrigeração comercial incluem os seguintes fenômenos:

- **Processo de Compressão Não Isentrópico:** O desvio em relação à compressão idealizada (adiabática e reversível), motivado por perdas térmicas ambientais e atrito nos mecanismos internos, eleva a temperatura de descarga e demanda maior potência no eixo do compressor.
- **Perdas por Atrito Hidrodinâmico:** A resistência friccional das partes móveis do maquinário e o escoamento com perdas viscosas do fluido pelas paredes das tubulações convertem energia útil em calor dissipado.
- **Quedas de Pressão Singulares e Distribuídas:** Restrições concentradas em conexões, curvas, filtros e válvulas, somadas às perdas de carga ao longo das linhas de sucção e descarga, reduzem a pressão de evaporação e elevam a de condensação, expandindo a taxa de compressão geral (Stoecker; Jones, 1985).
- **Superaquecimento Excessivo na Sucção:** O ganho térmico indesejado do fluido ao longo da tubulação de retorno amplia o volume específico do gás antes do bloco de compressão, reduzindo a eficiência volumétrica e sobrecarregando o motor elétrico.
- **Condensação Inadequada por Abordagem Térmica Elevada:** Falhas de dimensionamento ou problemas de manutenção nos condensadores (como impregnação de sujidades nas aletas) reduzem a taxa de rejeição de calor para o exterior, elevando a pressão de alta do ciclo.

A eliminação sistemática dessas restrições por meio de modificações estruturais no projeto e da aplicação de manutenção preventiva é essencial para a otimização da planta (Incropera *et al.*, 2008).

A redução do intervalo de pressões entre as etapas de evaporação e condensação diminui o esforço mecânico exigido no ciclo, elevando o Coeficiente de Performance (COP) e proporcionando a redução do consumo específico de energia elétrica do supermercado (Incropera *et al.*, 2008; Correia; Viagi; Moura, 2026).

3. METODOLOGIA

O delineamento metodológico deste estudo estrutura-se sob a forma de uma revisão bibliográfica de caráter narrativo, classificada quanto à sua natureza como uma pesquisa aplicada.

A investigação adota uma abordagem qualitativa e assume uma finalidade exploratório-descritiva, visto que se propõe a mapear, analisar e detalhar as inter-relações entre eficiência energética, parâmetros normativos e sustentabilidade ambiental no segmento de refrigeração comercial (Gil, 2017).

Para a composição do corpus de análise, realizou-se um levantamento multifacetado que englobou diferentes tipologias de documentos técnicos e científicos.

Foram selecionados e examinados os seguintes materiais:

- a) Normas técnicas de abrangência nacional e internacional;
- b) Artigos científicos publicados em periódicos indexados;
- c) Manuais especializados de engenharia térmica e de refrigeração;
- d) Documentos e resoluções de caráter regulatório;
- e) Relatórios institucionais emitidos por órgãos oficiais do setor energético e ambiental.

A estratégia de busca de dados foi operacionalizada por meio de consultas virtuais a indexadores de alta relevância acadêmica e técnica.

As principais bases de dados consultadas consistiram na *Scopus*, *ScienceDirect*, *Springer Link*, *Ashrae Digital Library*, Google Acadêmico e no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Benevides *et al.*, 2024). Como critério de delimitação temporal, foram considerados os trabalhos publicados e homologados (Lakatos; Marconi, 2021).

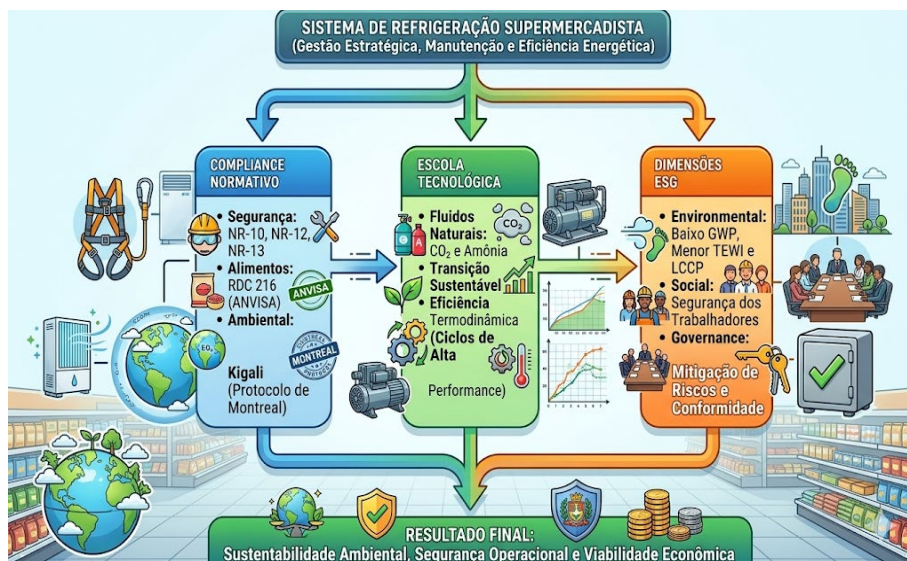
A triagem e o refinamento do material coletado priorizaram, estritamente, investigações que demonstrassem aderência direta aos seguintes eixos temáticos: indicadores de eficiência energética, salvaguardas de sustentabilidade, aplicação de fluidos refrigerantes de baixo Potencial de Aquecimento Global (GWP), sistemas de automação preditiva e a infraestrutura operacional de supermercados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COMERCIAL SUPERMERCADISTA

Na Figura 1, o sistema de refrigeração comercial supermercadista não deve ser analisado apenas sob a ótica isolada da engenharia mecânica.

Figura 1 | Sistema de refrigeração comercial supermercadista



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

O sistema de refrigeração comercial supermercadista opera sob a tríade *compliance* normativo que impõe os limites legais de segurança e saúde, a escolha da Escola Tecnológica com foco em fluidos naturais que viabiliza a transição ecológica e a eficiência térmica e as dimensões ESG da corporação, garantindo a redução de impactos climáticos (E), a proteção do trabalhador e segurança alimentar (S) e a mitigação de passivos legais e operacionais na governança (G).

4.2 IMPACTO DA CONFORMIDADE NORMATIVA NA CONFIABILIDADE OPERACIONAL

A análise sistêmica das diretrizes regulatórias que incidem sobre a refrigeração comercial evidencia que a observância do arcabouço normativo gera impactos profundos e multidisciplinares. Esses reflexos englobam desde a integridade física do maquinário até a proteção da saúde dos trabalhadores e a preservação biológica dos produtos estocados.

No contexto do varejo supermercadista contemporâneo, a manifestação de uma falha severa em centrais de compressão centralizadas possui potencial para gerar prejuízos financeiros expressivos, causados diretamente pelo rompimento da cadeia do frio e pela perda de cargas refrigeradas e congeladas (Dossat, 2004).

Para além do impacto econômico imediato, flutuações térmicas descontroladas expõem os consumidores a riscos de contaminação alimentar, violando as exigências de vigilância sanitária e de saúde pública. Sob essa perspectiva, o cumprimento das normas ultrapassa o escopo de mera obrigação burocrática e passa a se consolidar como uma ferramenta estratégica de engenharia voltada à gestão de ativos e à contenção preditiva de sinistros.

4.3 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO COMERCIAL

No balanço de cargas elétricas de um estabelecimento supermercadista de médio ou grande porte, os sistemas frigoríficos representam historicamente a maior parcela da demanda por energia da instalação.

Estudos empíricos presentes na literatura demonstram a centralidade do setor de frio, cujo consumo em balcões de atendimento, ilhas expositoras e câmaras de retaguarda se sobrepõe significativamente às demandas de iluminação, climatização de conforto e demais utilidades das lojas.

Em decorrência dessa magnitude, pequenas evoluções no rendimento termodinâmico da planta provocam reflexos financeiros positivos no balanço econômico anual das empresas.

O incremento do Coeficiente de Performance (COP) está diretamente atrelado à incorporação de tecnologias avançadas de automação e controle. A atuação sinérgica de algoritmos baseados em pressões de condensação e sucção flutuantes, válvulas de expansão eletrônicas, inversores de frequência acoplados aos compressores e sistemas inteligentes de degelo por demanda reduz a razão de pressões do ciclo, gerando reduções no consumo de eletricidade superiores a 20% quando comparadas aos arranjos convencionais de mercado (Çengel; Boles, 2013).

4.4 INFLUÊNCIA DOS FLUIDOS REFRIGERANTES NA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

A seleção do fluido operante converteu-se em um desafio técnico complexo para o projeto de sistemas térmicos após a promulgação da Emenda de Kigali. O processo de substituição de compostos sintéticos halogenados por soluções de menor impacto ambiental requer o exame simultâneo de suas propriedades termodinâmicas, termofísicas e ecológicas (Arias *et al.*, 2020).

A transição química a partir do refrigerante sintético R404A para alternativas que apresentam baixo Potencial de Aquecimento Global (GWP) atenua a pegada de carbono global da instalação comercial. Adicionalmente aos ganhos ambientais, o mapeamento do *COP* médio anual obtido por diferentes fluidos indica disparidades operacionais importantes entre as substâncias químicas.

A superioridade termodinâmica dos fluidos naturais frente aos hidrofluorcarbonos (HFCs) confere à amônia (R717) e ao dióxido de carbono (R744) excelentes taxas de transferência de calor por unidade de trabalho requerido no eixo do compressor, maximizando o rendimento global da planta (Stoecker; Jones, 1985).

4.5 AVALIAÇÃO PELO INDICADOR TEWI E DESEMPENHO AMBIENTAL GLOBAL

O impacto ambiental real de uma instalação frigorífica comercial sobre as mudanças climáticas do planeta deve ser avaliado por meio do indicador de Impacto de Aquecimento Equivalente Total (TEWI).

Essa métrica consolida, em uma única expressão matemática, o somatório das emissões diretas (decorrentes de eventuais vazamentos de fluido refrigerante gasoso para a atmosfera ao longo da operação) e as emissões indiretas de dióxido de carbono (CO₂), associadas à geração da energia elétrica consumida pela planta durante o seu ciclo de vida (Incropera *et al.*, 2008).

Estudos fundamentados no indicador TEWI e no Desempenho Climático do Ciclo de Vida (LCCP) comprovam que o nível de sustentabilidade de uma central comercial não depende exclusivamente da natureza química do gás adotado, mas é condicionado pela sua eficiência energética em regime contínuo.

Sob essa perspectiva, centrais frigoríficas que operam sob ciclo transcrito com o refrigerante natural CO₂ proporcionam reduções superiores a 60% nas emissões de gases de efeito estufa equivalentes ao longo de sua vida útil.

Esses parâmetros encontram total respaldo em indicadores internacionais de engenharia, os quais apontam economias de insumo elétrico que flutuam entre 20% e 45% quando a troca do fluido é associada ao uso de periféricos e sistemas avançados de controle.

4.6 SEGURANÇA OPERACIONAL E GESTÃO DE RISCOS INDUSTRIAIS

A salvaguarda da integridade física dos operadores e a confiabilidade mecânica dos ativos devem ser projetadas desde as fases iniciais de concepção tridimensional das centrais de refrigeração.

Os riscos associados ao funcionamento de centrais de compressão comercial de alta capacidade distribuem-se em quatro eixos de vulnerabilidade:

- **Riscos Mecânicos:** Ocorrência de fenômenos de fadiga estrutural motivados por vibração mecânica excessiva nas tubulações, golpes de líquido nos cilindros dos compressores, falhas por estresse em linhas de descarga e fadiga metalúrgica em vasos de pressão.
- **Riscos Elétricos:** Eventos de curto-circuito em painéis de comando e distribuição, surtos de sobrecorrente em motores elétricos e falhas na continuidade física dos sistemas de aterramento de carcaças.
- **Riscos Químicos:** Ocorrência de vazamentos de amônia (composto de elevada toxicidade), exposição a gases inflamáveis (como hidrocarbonetos de classe A3) e contaminação do circuito em decorrência da degradação térmica do óleo lubrificante sintético.
- **Riscos Operacionais Locais:** Descalibração de transdutores de pressão e sensores térmicos, falhas na lógica de programação dos controladores eletrônicos e perda de estabilidade térmica na estocagem de produtos.

A aplicação convergente das exigências contidas nas normas técnicas ABNT NBR 16069 e ISO 5149, associada ao cumprimento das Normas Regulamentadoras NR-10, NR-12 e NR-13, mitiga a probabilidade de falhas e acidentes.

Essa abordagem diminui o nível de severidade operacional das plantas por meio da introdução de redundâncias elétricas, barreiras mecânicas de proteção e mecanismos de alívio por válvulas de segurança devidamente calibradas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização desta pesquisa permitiu analisar, de forma integrada, a estreita inter-relação existente entre a conformidade normativa, a segurança de operação, a eficiência no consumo de energia e a sustentabilidade ecológica nos arranjos de refrigeração comercial aplicados ao varejo alimentar supermercadista.

Os dados levantados convalidam a premissa de que a cadeia do frio em estabelecimentos varejistas de alimentos representa o vetor de maior impacto na demanda de eletricidade, respondendo por fatias expressivas que variam entre 40% e 60% do consumo consolidado das lojas.

Constatou-se que a superação dos paradigmas tradicionais de projetos mecânicos de refrigeração, historicamente pautados em abordagens isoladas ou puramente reativas requer a unificação das salvaguardas técnicas e dos critérios socioambientais contemporâneos.

A análise dos resultados demonstrou de forma contundente que a estrita observância do arcabouço normativo englobando as diretrizes da ABNT NBR 16069, ISO 5149 e as Normas Regulamentadoras do TEM, não se restringe ao mero cumprimento de obrigações burocráticas legais. Ao contrário, consolida-se como uma ferramenta de governança corporativa e gestão de ativos capaz de expandir a vida útil do maquinário, blindar as instalações contra riscos mecânicos, elétricos ou químicos e resguardar a segurança biológica dos estoques alimentícios.

Do ponto de vista tecnológico e ambiental, a transição imposta por tratados internacionais como o Protocolo de Montreal e a Emenda de Kigali evidenciou a obsolescência de compostos halogenados tradicionais de alto impacto climático.

A migração em direção ao emprego de fluidos ecológicos naturais em especial o dióxido de carbono (CO₂ / R744) em regime transcítico desponta como a macrotendência mais viável e segura para a descarbonização das lojas.

Discutiu-se a adoção desses refrigerantes naturais associada a algoritmos inteligentes de eficiência como o de pressões de condensação e sucção flutuantes, inversores de frequência e válvulas eletrônicas, viabiliza reduções superiores a 60% nas taxas do indicador de impacto de aquecimento equivalente total (TEWI) ao longo da vida útil do sistema, gerando economias elétricas reais imediatas superiores a 20%.

A incorporação de tais soluções, combinada às métricas da agenda ESG, confere ao varejo alimentar um expressivo ganho de competitividade mercadológica e resiliência financeira perante as demandas globais de sustentabilidade.

Como limitação deste estudo, convém ressaltar o seu caráter essencialmente teórico e documental, baseado em revisão de literatura e análise qualitativa de cenários e indicadores macroeconômicos e mecânicos.

Embora os dados bibliográficos confirmem robustez conceitual e metodológica plena às conclusões obtidas, a ausência de ensaios empíricos instrumentados de campo ou simulações computacionais customizadas de dinâmica dos fluidos restringe a aplicação imediata destas taxas de ganho a plantas de perfis operacionais muito discrepantes.

Diante do exposto, recomenda-se para a continuidade desta linha de investigação o desenvolvimento de pesquisas aplicadas focadas na modelagem matemática e no monitoramento de campo a longo prazo de sistemas do tipo *Booster* Transcrítico em diferentes zonas climáticas do território brasileiro.

Com trabalho futuro, sugere-se investigar os impactos da automação preditiva baseada em algoritmos de inteligência artificial operando em tempo real na predição de microvazamentos de gases e na modulação dinâmica de *setpoints* térmicos sob flutuações de umidade relativa e temperatura ambiente das lojas.

REFERÊNCIAS

- ARIAS, J. *et al.* CO₂ refrigeration systems review: technological advancements and environmental impacts. **International Journal of Refrigeration**, Paris, v. 120, p. 45-58, 2020.
- ASHRAE. **ASHRAE Handbook**: Refrigeration. Atlanta: Ashrae, 2018.
- ASHRAE. **Standard 15 & 34**: safety standard for refrigeration systems and designation and safety classification of refrigerants. Atlanta: Ashrae, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16069**: Sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor — Requisitos de segurança. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- BENEVIDES, M. P.; XAVIER, K. R. S. L.; SILVA, A. P. S.; et al. **Sign talk assistive technology**: real-time recognition of the libras typical alphabet using artificial intelligence. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, São Paulo (SP), v. 18, n. 12, p. e010610, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n12-214. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n12-214>
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução RDC nº 216, de 15 de setembro de 2004. Dispõe sobre Regulamento Técnico de Boas Práticas para Serviços de Alimentação. **Diário Oficial da União**: República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 16 set. 2004.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs (PBH)**. Brasília, DF: MMA, 2022.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Normas Regulamentadoras (NR)**: disposições complementares ao Capítulo V (Da Segurança e da Medicina do Trabalho) do Título II da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT). Brasília, DF: MTE, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/normas-regulamentadoras-nrs>. Acesso em: 10 jun. 2026.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- CORREIA, F. E.; VIAGI, A. F.; MOURA, R. A. Engenharia de suprimentos multinível: um estudo sobre a padronização do AVAC-R em uma Instituição de Ensino. **Revista Ciências Exatas**, Taubaté, v. 32, n. 2, p. 1-14, 2026. DOI: 10.69609/1516-2893.2026.v32.n2.a4027. Disponível em: <https://periodicos.unitau.br/exatas/article/view/4027>. Acesso em: 10 jun. 2026.
- DOSSAT, Roy J. **Princípios de refrigeração**. 4. ed. São Paulo: Hemus, 2004.
- EVANGELISTA, José. **Tecnologia de alimentos**. 2. ed. São Paulo: Atheneu, 2008.
- EVANS, J. A. *et al.* Refrigeration and energy performance in food retailing: a comprehensive review. **Applied Energy**, London, v. 235, p. 112-124, 2019.
- GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- IIAR. International Institute of Ammonia Refrigeration. **IIAR Standards**: Safety standard for closed-circuit ammonia refrigeration systems. Alexandria: IIAR, 2020.
- INCROPERA, Frank P. *et al.* **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- ISO. International Organization for Standardization. **ISO 5149**: Refrigerating systems and heat pumps — Safety and Environmental Requirements. Geneva: ISO, 2014.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.
- STOECKER, Wilbert F.; JONES, Jerold W. **Refrigeração e ar-condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.
- TASSOU, S. A. *et al.* Energy consumption and conservation in food retailing. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 31, n. 2, p. 147-156, 2011.
- WHITMAN, W. C. *et al.* **Refrigeration and air conditioning technology**. 8. ed. Boston: Cengage Learning, 2017.

