



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Determinação do Ponto de viabilidade entre Eficiência Energética, Qualidade: Um Estudo de Caso em Túnel de Congelamento Contínuo com Amônia em Indústria de alimentos.

Muriel Lima Pimentel

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA

Determinação do Ponto de viabilidade entre Eficiência Energética, Qualidade: Um Estudo de Caso em Túnel de Congelamento Contínuo com Amônia em Indústria de Alimentos.

Muriel Lima Pimentel

Sob orientação do professor

Gustavo Olivares

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Administração Pública**, no Curso de Graduação em Administração Pública.

Seropédica, RJ
Novembro de 2025

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L734d Lima Pimentel, Muriel, 1986-
Determinação do Ponto de viabilidade entre
Eficiência Energética, Qualidade: Um Estudo de Caso
em Túnel de Congelamento Contínuo com Amônia em
Indústria de alimentos. / Muriel Lima Pimentel. -
Seropédica , 2025.
39 f.: il.

Orientador: Gustavo Olivares. Trabalho de
conclusão de curso(Graduação). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Administração Pública , 2025.

1. Qualidade em indústria 4.0. 2. tecnológicas IoT
. 3. Eficiência Energética . 4. controle térmico . I.
Olivares, Gustavo , 1970-, orient. II Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Administração Pública
III. Título.

MURIEL LIMA PIMENTEL

Monografia submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel, no Curso de Graduação em Administração Pública.

MONOGRAFIA APROVADA EM 02/12/2025.

Assinatura

Prof. Dr. Gustavo Olivares

Orientador – Presidente

Departamento de Administração Pública

UFRRJ

Assinatura

Prof. Dr. Caio Peixoto Chain

Departamento de Administração Pública

UFRRJ

Assinatura

Prof. Dr. Marcelo Sales Ferreira

Departamento de Ciências Administrativas

UFRRJ

DEDICATÓRIA

Minha amada filha, Ana Julia, este trabalho não é apenas um Trabalho de Conclusão de curso; é um pedaço da nossa história, escrito com lágrimas de esforço e tinta de amor incondicional.

Desde o momento em que você chegou aos meus braços, você se tornou o meu motor, a razão maior para nunca desistir. Lembro-me de cada noite, da exaustão que pesava, mas que era aliviada quando eu te via.

Eu tive que encontrar tempo no meio de tudo do trabalho, das provas, das madrugadas estudando – para ser, acima de tudo, a sua mãe. Conciliei apostilas com o desejo de te ver orgulhosa e com a responsabilidade de te ensinar o dever de casa na mesa da cozinha, explicando a matéria mais difícil enquanto o relógio corria.

Houve dias em que o desânimo quase me venceu, em que o cansaço era insuportável, mas bastava ver a confiança nos seus olhos, enquanto eu tentava ser a melhor mãe e a melhor aluna ao mesmo tempo, para eu encontrar a força para continuar. Você, minha filha, é a prova viva de que o amor de uma mãe não conhece limites nem cansaço. Você é a minha inspiração e a minha maior conquista.

Com esta graduação concluída, quero que você saiba: ser sua mãe foi o meu maior diploma, e provar que é possível ser mãe, profissional e estudante, é a lição que deixo para você.

Nunca deixe que ninguém diga que você não é capaz de ter tudo o que deseja. Lute, estude, trabalhe e ame. Eu fiz isso por mim, por nós, e por todas as mulheres que carregam o mundo nas costas e, ainda assim, o movem.

Dedico este trabalho de conclusão do curso a você minha filha. É a celebração de que, com amor e garra, os sonhos se tornam realidade.

Com todo o meu amor e gratidão eterna,

Sua Mãe.

AGRADECIMENTOS

Aos Meus Mestres e Guias...

A jornada que hoje se encerra com a entrega deste Trabalho de Conclusão de Curso não teria sido possível sem a luz e a orientação de vocês, meus queridos e inestimáveis Professores.

Mais do que apenas transmissores de conhecimento, vocês foram verdadeiros mestres que me guiaram com paciência, rigor e humanidade através dos desafios da graduação.

Em um momento de minha vida em que eu tive que conciliar a maternidade, o trabalho e os estudos – uma tripla jornada exaustiva – o incentivo e a compreensão de vocês foram o combustível que me manteve em movimento.

Um Agradecimento Especial ao Meu Orientador

Ao Professor Gustavo Olivares, meu sincero e profundo agradecimento. Sua orientação foi o pilar central na construção deste trabalho.

Sua paciência inesgotável, o olhar crítico sempre perspicaz e a dedicação em me guiar, ajustando-se à minha realidade e aos meus prazos apertados, foram cruciais. Muito mais do que um orientador, o senhor foi um mentor que me incentivou a ir além, a acreditar na minha capacidade e a dar o meu melhor, mesmo nos dias mais difíceis.

Agradeço por todo o tempo e sabedoria investidos. Sua crença em mim foi fundamental para a conclusão desta etapa.

Agradeço a todos os demais professores:

Pela paciência em sanar minhas dúvidas e revisar meus rascunhos;

Pela inspiração que me fez buscar a excelência e ir além do esperado;

Pela crença no meu potencial, mesmo quando eu mesma duvidava.

Vocês não apenas me ensinaram a teoria e a técnica; vocês me mostraram a ética e a paixão necessárias para exercer esta profissão. O conhecimento que levo daqui é um legado direto da dedicação de cada um de vocês.

Este diploma é, em grande parte, um reflexo do compromisso de vocês com a educação e com o futuro de seus alunos.

Com minha sincera admiração e eterna gratidão,

Muriel Lima Pimentel

RESUMO

PIMENTEL, Muriel Lima. **Determinação do Ponto de viabilidade entre Eficiência Energética, Qualidade: Um Estudo de Caso em Túnel de Congelamento Contínuo com Amônia em Indústria de Alimentos**, 2025, 39p. Monografia (Bacharelado em Administração Pública). Instituto de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

A indústria alimentícia contemporânea enfrenta o desafio complexo de equilibrar processos energeticamente eficientes e sustentáveis com a obrigatoriedade de manter padrões rigorosos de qualidade e segurança alimentar. Este estudo teve como objetivo central determinar o ponto ótimo operacional em um túnel de congelamento contínuo com amônia, equilibrando a redução do consumo energético através de desligamentos programados com a manutenção da temperatura do produto em -12°C , conforme exigido pela legislação brasileira. A pesquisa, de natureza quantitativa e experimental, foi realizada na fábrica HOT DOG ao longo de 60 dias, utilizando data loggers de alta precisão para monitoramento contínuo das variáveis térmicas. Os resultados demonstraram que, enquanto os desligamentos durante a semana se mostraram inviáveis devido à alta carga térmica, o desligamento por 24 horas consecutivas nos finais de semana mostrou-se plenamente viável, resultando em economia energética de até 64% sem comprometer a qualidade do produto final. O estudo contribui para a otimização de processos industriais, alinhando eficiência econômica, sustentabilidade ambiental e conformidade regulatória, oferecendo um modelo replicável para outras unidades produtivas do setor alimentício.

Palavras-chave: Eficiência energética; Congelamento contínuo; Sustentabilidade; Indústria alimentícia; Gestão térmica; Otimização operacional.

ABSTRACT

PIMENTEL, Muriel Lima. **Determination of the Viability Point between Energy Efficiency and Quality: A Case Study in a Continuous Ammonia Freezing Tunnel in the Food Industry.** 2025. 39p. Monograph (Bachelor in Public Administration). Institute of Social Applied Sciences, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

The contemporary food industry faces the complex challenge of balancing energy-efficient and sustainable processes with the requirement to maintain rigorous quality and food safety standards. This study aimed to determine the optimal operational point in a continuous freezing tunnel with ammonia, balancing energy consumption reduction through programmed shutdowns with maintaining product temperature at -12°C , as required by Brazilian legislation. The quantitative and experimental research was conducted at the HOT DOG factory over 60 days, using high-precision data loggers for continuous monitoring of thermal variables. The results demonstrated that while shutdowns during the week proved infeasible due to high thermal load, shutdown for 24 consecutive hours on weekends proved fully feasible, resulting in energy savings of up to 64% without compromising final product quality. The study contributes to the optimization of industrial processes, aligning economic efficiency, environmental sustainability and regulatory compliance, offering a replicable model for other production units in the food sector.

Keywords: Energy efficiency; Continuous freezing; Sustainability; Food industry; Thermal management; Operational optimization.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1. | Fluxograma do processo produtivo | 26 |
| Tabela 1. | Resultados dos testes de desligamento do túnel de congelamento ao longo das semanas | 28 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | Contextualização do problema | 11 |
| 1.2 | Definição do problema de pesquisa | 11 |
| 1.3 | Objetivos da pesquisa | 12 |
| 1.3.1 | <i>Objetivos gerais</i> | 12 |
| 1.3.2 | <i>Objetivos específicos</i> | 12 |
| 1.4 | Justificativa e relevância | 13 |
| 1.5 | Delimitação do estudo | 14 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 15 |
| 2.1 | Gestão da qualidade da Indústria 4.0 | 15 |
| 2.2 | Eficiência energética em sistemas de refrigeração | 16 |
| 2.3 | Tecnologias emergentes em controle térmico | 18 |
| 2.4 | Marco regulatório e normativo | 19 |
| 3 | METODOLOGIA | 21 |
| 3.1 | Tipo de pesquisa e abordagem | 21 |
| 3.2 | Local e período de estudo | 21 |
| 3.3 | Variáveis e instrumentos de coleta | 22 |
| 3.3.1 | <i>Variáveis independentes</i> | 22 |
| 3.3.2 | <i>Variáveis dependentes</i> | 22 |
| 3.3.3 | <i>Variáveis de controle</i> | 22 |
| 3.3.4 | <i>Instrumentos de coleta</i> | 23 |
| 3.4 | Procedimentos operacionais | 23 |
| 4 | RESULTADOS E ANÁLISES | 26 |
| 4.1 | Caracterização do cenário inicial | 26 |
| 4.2 | Análise dos testes de desligamento semanal | 26 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.3 | Avaliação dos desligamentos de final de semana | 30 |
| 4.4 | Impacto na eficiência energética | 30 |
| 4.5 | Conformidade com padrões de qualidade | 31 |
| 4.6 | Análise SWOT do sistema de congelamento contínuo e da estratégia de desligamentos programados | 31 |
| 4.6.1 | <i>Forças (Strengths)</i> | 32 |
| 4.6.2 | <i>Fraquezas (Weaknesses)</i> | 32 |
| 4.6.3 | <i>Oportunidades (Opportunities)</i> | 33 |
| 4.6.4 | <i>Ameaças (Threats)</i> | 34 |
| 4.6.5 | <i>Síntese integrada da análise SWOT</i> | 34 |
| 5 | CONCLUSÕES | 35 |
| 5.1 | Considerações finais | 35 |
| 5.2 | Contribuições do estudo | 35 |
| 5.2.1 | <i>Contribuições teóricas</i> | 35 |
| 5.2.2 | <i>Contribuições metodológicas</i> | 36 |
| 5.2.3 | <i>Contribuições práticas</i> | 36 |
| 5.2.4 | <i>Contribuições econômicas</i> | 36 |
| 5.3 | Limitações da pesquisa | 36 |
| 5.4 | Sugestões para pesquisas futuras | 37 |
| 5.4.1 | <i>Expansão do escopo</i> | 37 |
| 5.4.2 | <i>Avanços tecnológicos</i> | 37 |
| 5.4.3 | <i>Análise econômica aprofundada</i> | 37 |
| 5.4.4 | <i>Aspectos regulatórios</i> | 37 |
| | REFERÊNCIAS | 38 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

A indústria alimentícia contemporânea enfrenta um desafio triplo e complexo: a necessidade de implementar processos produtivos energeticamente eficientes, ambientalmente sustentáveis e que mantenham padrões rigorosos de qualidade e segurança alimentar. Este desafio se intensifica no contexto atual de crise energética global, pressões ambientais crescentes e exigências regulatórias cada vez mais severas. Os sistemas de refrigeração, em particular os túneis de congelamento contínuos, emergem como componentes críticos nessa equação, representando entre 60% e 70% do consumo energético total em plantas de processamento de alimentos.

No Brasil, o setor de alimentos processados tem demonstrado crescimento consistente, com aumento anual médio de 3,5% na produção, pressionando ainda mais a eficiência dos sistemas de refrigeração. Os túneis de congelamento contínuos, amplamente utilizados para produtos cárneos, vegetais e preparados alimentícios, operam em regime contínuo e demandam quantidades significativas de energia para manter as baixas temperaturas necessárias à preservação dos alimentos.

A amônia (NH_3), como fluido refrigerante, tem ganhado destaque devido às suas características termodinâmicas favoráveis e ao baixo impacto ambiental quando comparada aos refrigerantes halogenados. Com Potencial de Aquecimento Global (GWP) zero e Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP) nulo, a amônia se alinha perfeitamente com as diretrizes do Protocolo de Montreal e do Acordo de Paris.

A transição para a Indústria 4.0 tem proporcionado novas oportunidades de otimização desses sistemas através da integração de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e *digital twins*. Estas ferramentas permitem um controle mais preciso das variáveis operacionais e a identificação de oportunidades de economia energética que anteriormente passavam despercebidas.

1.2 Definição do problema de pesquisa

O problema central desta pesquisa reside na identificação e validação do ponto ótimo operacional para túneis de congelamento contínuos com amônia, especificamente no equilíbrio entre a maximização da eficiência energética através de desligamentos programados e a manutenção da integridade térmica do produto, garantindo conformidade com os padrões legais de qualidade e segurança alimentar.

A legislação brasileira, através da Instrução Normativa 711/1995 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e da Resolução da Diretoria Colegiada – RDC 331/2019 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), estabelece que produtos cárneos congelados devem manter temperatura igual ou inferior a -12°C em toda a cadeia de frio, desde a saída do túnel de congelamento até o ponto de venda ao consumidor. Esta exigência técnica impõe limites operacionais rigorosos que, se não adequadamente gerenciados, podem resultar em não conformidades com impactos significativos na segurança alimentar.

O problema se desdobra em três dimensões inter-relacionadas: a técnica, relacionada às características termodinâmicas do processo; a econômica, associada aos custos operacionais; e a regulatória, vinculada à conformidade com as normas sanitárias. A identificação do ponto ótimo requer, portanto, uma abordagem multidimensional que considere estas variáveis de forma integrada.

Na prática, o desafio operacional consiste em determinar por quanto tempo o túnel pode permanecer desligado sem que a temperatura interna ultrapasse limites críticos que comprometam a qualidade do produto ou a conformidade regulatória. A inércia térmica do sistema, influenciada por fatores como a massa térmica da estrutura, o isolamento e a carga de produto, representa uma janela de oportunidade para a realização de desligamentos estratégicos.

1.3 Objetivos da pesquisa

1.3.1 Objetivo geral

Determinar o ponto ótimo operacional em um túnel de congelamento contínuo com amônia, estabelecendo o equilíbrio ideal entre eficiência energética, qualidade do produto e sustentabilidade ambiental através da implementação de desligamentos programados.

1.3.2 Objetivos específicos

Caracterizar o perfil térmico do túnel de congelamento durante operação contínua e em regimes de desligamento programado; quantificar o potencial de economia energética através de diferentes cenários de desligamento; validar a manutenção da temperatura do produto dentro dos limites legais (-12°C) nos diferentes regimes operacionais testados; desenvolver um protocolo operacional padronizado para desligamentos programados; avaliar o impacto econômico da implementação do protocolo proposto; identificar os fatores críticos para a replicabilidade do modelo em outras unidades produtivas.

1.4 Justificativa e relevância

A relevância desta pesquisa se manifesta em múltiplas dimensões, alinhando-se com as prioridades estratégicas do setor produtivo, das políticas públicas e da agenda de sustentabilidade global.

Do ponto de vista econômico, a otimização do consumo energético em túneis de congelamento representa uma oportunidade significativa de redução de custos operacionais. Estudos indicam que sistemas de refrigeração industrial respondem por aproximadamente 15% do consumo total de energia no setor de alimentos processados. A implementação de protocolos de desligamento programado pode resultar em economias na ordem de 20% a 30% nos custos com energia, impactando positivamente a competitividade das empresas nacionais.

Na dimensão ambiental, a pesquisa contribui para a redução da pegada de carbono da indústria alimentícia. Considerando, de acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2021), que o setor é responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de gases de efeito estufa, a otimização energética nos processos de congelamento representa uma contribuição relevante para o cumprimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris e nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

Do ponto de vista regulatório, o estudo oferece subsídios técnicos para o aprimoramento das normativas sanitárias, demonstrando a viabilidade de práticas operacionais que conciliam eficiência energética e segurança alimentar. Esta contribuição é particularmente relevante no contexto brasileiro, onde a harmonização entre eficiência produtiva e conformidade regulatória representa um desafio permanente para o setor industrial.

A relevância técnica da pesquisa reside na aplicação de metodologias avançadas de monitoramento térmico e análise de dados, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre o comportamento termodinâmico de túneis de congelamento em condições operacionais reais. A utilização de *data loggers* de alta precisão e a análise sistemática de grandes volumes de dados representam uma abordagem inovadora no contexto da indústria alimentícia nacional.

1.5 Delimitação do estudo

O presente estudo foi delimitado espacial, temporal e tematicamente para garantir a viabilidade da pesquisa e a profundidade da análise.

A delimitação espacial restringe o estudo à fábrica HOT DOG, localizada no estado do Rio de Janeiro, especificamente ao túnel de congelamento contínuo com amônia da linha de produção de salsichas. Esta delimitação permite uma análise detalhada e contextualizada, embora limitando a generalização dos resultados.

A delimitação temporal compreende o período de 60 dias, entre maio e junho de 2025, abrangendo as condições climáticas de inverno na região. Esta escolha estratégica permitiu a avaliação do desempenho do túnel sob condições ambientais favoráveis, minimizando a influência de variáveis externas não controladas.

A delimitação temática focaliza o estudo nas variáveis térmicas e energéticas do processo de congelamento, especificamente: temperatura do ar no túnel, temperatura do produto, consumo energético e tempos de operação. Foram excluídas da análise variáveis relacionadas a outros aspectos do processo produtivo, como qualidade microbiológica, características sensoriais do produto ou aspectos logísticos da cadeia de frio.

O recorte analítico privilegiou a perspectiva da gestão operacional e da eficiência energética, considerando as interfaces com a qualidade do produto e a conformidade regulatória, mas sem aprofundar em aspectos específicos de engenharia de processos ou tecnologia de alimentos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Gestão da qualidade na Indústria 4.0

A evolução do conceito de qualidade na indústria alimentícia tem acompanhado as transformações tecnológicas e as mudanças nas expectativas dos consumidores. Na era da Indústria 4.0, a qualidade transcende a mera conformidade com especificações técnicas para se tornar um atributo dinâmico e multidimensional, integrado aos sistemas digitais de gestão e controle.

Para Deming (1990), a qualidade deve ser intrínseca ao processo produtivo, sendo resultado de um sistema bem concebido e consistentemente implementado. Esta visão encontra ressonância na Indústria 4.0, onde sistemas *ciber*-físicos permitem o monitoramento contínuo e o ajuste em tempo real dos parâmetros de qualidade. Juran (1999), por sua vez, define qualidade como "adequação ao uso", enfatizando a importância de atender às necessidades e expectativas dos clientes finais.

A integração de tecnologias digitais tem revolucionado a gestão da qualidade na indústria alimentícia. Sistemas de rastreabilidade baseados em blockchain, por exemplo, permitem o acompanhamento detalhado de toda a cadeia produtiva, desde a matéria-prima até o consumidor final. Esta transparência não apenas fortalece a confiança do consumidor, mas também facilita a identificação e correção de não conformidades.

A precisão operacional alcançada através de sensores IoT representa outro avanço significativo. A implementação de redes de sensores permite o monitoramento de variações térmicas com precisão de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, possibilitando um controle muito mais rigoroso das condições de processamento. Esta precisão é particularmente crítica em processos de congelamento, onde pequenas variações de temperatura podem impactar significativamente a qualidade final do produto.

A qualidade na Indústria 4.0 também está intrinsecamente vinculada à sustentabilidade. Sistemas inteligentes permitem otimizar o uso de recursos, reduzindo desperdícios e minimizando impactos ambientais sem comprometer padrões de qualidade. Esta visão integrada representa uma evolução significativa em relação às abordagens

tradicionais, que frequentemente tratavam qualidade e sustentabilidade como objetivos independentes e potencialmente conflitantes.

2.2 Eficiência energética em sistemas de Refrigeração

Os sistemas de refrigeração representam um dos maiores consumidores de energia na indústria alimentícia, com particular destaque para os túneis de congelamento contínuos. A otimização energética destes sistemas requer uma compreensão abrangente de seus princípios operacionais e das oportunidades de melhoria disponíveis.

Túneis de congelamento contínuos com amônia são predominantes na indústria de alimentos devido à alta eficiência térmica deste refrigerante e ao seu baixo custo operacional. A amônia possui excelentes propriedades termodinâmicas, incluindo alto calor latente de vaporização e boa transferência de calor, o que a torna particularmente adequada para aplicações de baixa temperatura.

Contudo, a operação destes sistemas enfrenta desafios significativos. A carga térmica variável, resultante das flutuações na produção e nas condições ambientais, requer ajustes dinâmicos na potência dos compressores. Estes ajustes, se não adequadamente gerenciados, podem resultar em ineficiências significativas e aumento do consumo energético.

As perdas por degelo representam outro desafio importante. É estimado que os ciclos frequentes de degelo podem consumir até 15% da energia total do sistema. A otimização destes ciclos, através do uso de sensores de gelo e algoritmos preditivos, representa uma oportunidade significativa de economia.

Entre as estratégias de otimização energética, os desligamentos programados emergem como uma abordagem particularmente promissora. A exploração da inércia térmica do sistema pode permitir reduções de 12% a 18% no consumo energético através de desligamentos estratégicos durante períodos de baixa produção ou interrupções programadas.

A recuperação de calor residual constitui outra frente importante de otimização, já que é possível reaproveitar até 30% da energia térmica rejeitada pelo sistema para pré-aquecimento de água ou outros usos industriais, melhorando significativamente a eficiência global do processo.

Do ponto de vista ambiental, a amônia apresenta vantagens significativas em relação aos refrigerantes sintéticos. Com Potencial de Aquecimento Global (GWP) zero e Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP) nulo, a amônia se alinha com as diretrizes

ambientais mais rigorosas. Contudo, sua toxicidade e inflamabilidade exigem sistemas de segurança robustos e procedimentos operacionais rigorosos.

2.3 Tecnologias emergentes em controle térmico

O avanço das tecnologias digitais tem transformado radicalmente as possibilidades de controle e otimização de sistemas térmicos industriais. No contexto específico dos túneis de congelamento, várias tecnologias emergentes oferecem potencial significativo para melhorias de eficiência e qualidade.

Os modelos preditivos baseados em inteligência artificial representam uma das fronteiras mais promissoras. O uso de redes neurais e algoritmos genéticos permite prever com precisão as variações térmicas durante o congelamento, oferecendo suporte à tomada de decisão para desligamentos programados com maior segurança e confiabilidade.

A automação integrada, combinando sensores IoT com sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), tem se mostrado uma aliada estratégica na otimização de processos térmicos. Esta integração permite respostas em tempo real a oscilações térmicas, elevando a eficiência energética de túneis de congelamento em até 25%.

Os *digitais twins* (gêmeos digitais) emergem como uma tecnologia particularmente inovadora. A simulação em tempo real do comportamento térmico e energético dos túneis permite a realização de testes virtuais e a implementação de ações corretivas mais eficazes, contribuindo tanto para o controle de qualidade quanto para a economia de energia.

Sistemas de controle baseados em lógica *fuzzy* e inteligência artificial têm demonstrado resultados significativos na otimização de sistemas de congelamento. Estes sistemas conseguem ajustar autonomamente a operação de ventiladores e compressores em função de dados coletados em tempo real, resultando em redução média de 18% no consumo energético em túneis industriais.

A integração de redes sem fio de sensores (WSNs) oferece vantagens significativas em termos de flexibilidade e custo de instalação. Ao utilizar WSNs com sensores de baixa latência, é possível obter diagnósticos precisos de falhas no isolamento térmico, antecipando perdas e otimizando ciclos de degelo.

Sistemas de visão computacional têm se mostrado eficazes para monitoramento indireto do processo de congelamento. Câmeras infravermelhas aliadas a algoritmos de

inteligência artificial podem identificar zonas de congelamento irregular dentro do túnel, permitindo ajustes localizados no fluxo de ar e reduzindo desperdício de energia.

Sistemas de controle adaptativo baseados em machine learning representam outra fronteira tecnológica importante. Estes modelos utilizam o histórico operacional do túnel para prever, com precisão, a demanda térmica diária, ajustando a operação dos compressores de forma preditiva e contribuindo para estabilidade térmica e economia energética.

Plataformas em nuvem e dashboards inteligentes completam o ecossistema tecnológico, centralizando o monitoramento de múltiplas variáveis de desempenho. Esta centralização melhora significativamente a rastreabilidade e a tomada de decisões, principalmente em plantas com produção contínua e alta variabilidade na carga térmica.

2.4 Marco regulatório e normativo

O setor de alimentos congelados opera sob um arcabouço regulatório complexo e multifacetado, envolvendo normas nacionais e internacionais que abordam aspectos de segurança alimentar, qualidade e eficiência energética. No âmbito nacional, a Instrução Normativa 711 do MAPA estabelece os requisitos técnicos para produtos cárneos congelados, incluindo a exigência de temperatura igual ou inferior a -12°C em toda a cadeia de frio. Esta norma reflete o entendimento científico consolidado de que temperaturas abaixo deste limite são necessárias para inibir o crescimento de patógenos como *Salmonella* e *Listeria monocytogenes*.

A RDC 331/2019 da ANVISA complementa este *framework*, estabelecendo requisitos adicionais para a segurança de alimentos, incluindo procedimentos de controle de processo e monitoramento de parâmetros críticos. A conformidade com estas normas não é apenas uma obrigação legal, mas também uma garantia de segurança para os consumidores.

No contexto internacional, a ISO 22000:2018 fornece um *framework* abrangente para sistemas de gestão de segurança de alimentos, enquanto a FSSC 22000 oferece um esquema de certificação reconhecido globalmente. Estas normas facilitam o comércio internacional e fortalecem a confiança dos consumidores.

No domínio da eficiência energética, a ISO 50001 estabelece requisitos para sistemas de gestão de energia, proporcionando uma abordagem sistemática para a melhoria contínua do

desempenho energético. A implementação desta norma em sistemas frigoríficos pode resultar em economias significativas, além de melhorar o posicionamento competitivo das empresas.

A ISO 14001, por sua vez, fornece um *framework* para sistemas de gestão ambiental, ajudando as organizações a minimizar seus impactos ambientais e a cumprir com obrigações regulatórias. No contexto dos sistemas de refrigeração, esta norma é particularmente relevante para a gestão de refrigerantes e a minimização de emissões.

O marco regulatório ambiental inclui ainda as diretrizes do Protocolo de Montreal e do Acordo de Paris, que influenciam a seleção de fluidos refrigerantes e as estratégias de eficiência energética. A transição para refrigerantes de baixo GWP, como a amônia, reflete o alinhamento do setor com estas diretrizes internacionais. A conformidade com este complexo marco regulatório requer não apenas a implementação de controles operacionais rigorosos, mas também a manutenção de documentação completa e a realização de auditorias regulares. A integração de sistemas digitais de monitoramento e controle facilita significativamente este processo, proporcionando dados em tempo real e gerando automaticamente a documentação necessária.

3. METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa e abordagem

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso de natureza quantitativa e experimental, conduzido em ambiente industrial real. A escolha pelo estudo de caso justifica-se pela necessidade de investigação aprofundada de um fenômeno contemporâneo em seu contexto real, particularmente quando as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidas.

A abordagem quantitativa foi selecionada em função da natureza dos dados coletados (temperaturas, tempos, consumos energéticos) e da necessidade de análise estatística para validação das hipóteses. Esta abordagem permite a quantificação precisa dos resultados e a generalização controlada dos achados.

O caráter experimental da pesquisa manifesta-se na manipulação deliberada de variáveis operacionais (tempos de desligamento) e na observação sistemática de seus efeitos sobre as variáveis dependentes (temperatura do produto, consumo energético). Esta manipulação foi conduzida em condições operacionais reais, com os devidos controles e precauções de segurança.

O período de coleta de dados, compreendendo 60 dias entre maio e junho de 2025, foi estrategicamente selecionado para coincidir com as condições de inverno na região, minimizando a influência de variáveis ambientais externas e permitindo o isolamento mais claro dos efeitos das intervenções experimentais.

3.2 Local e período de estudo

O estudo foi conduzido na fábrica HOT DOG, unidade industrial localizada no estado do Rio de Janeiro, especializada na produção de salsichas e outros produtos cárneos. A seleção desta unidade justifica-se por suas características representativas do setor e pela disponibilidade de infraestrutura adequada para a realização da pesquisa.

A fábrica possui certificações internacionais incluindo ISO 22000 e FSSC 22000, garantindo que os procedimentos operacionais seguem padrões reconhecidos globalmente. Esta condição é particularmente relevante para a validade externa dos resultados, na medida em que as práticas documentadas refletem padrões setoriais consagrados.

O túnel de congelamento objeto do estudo é do tipo contínuo, com capacidade nominal de 160 toneladas por dia, operando com amônia como fluido refrigerante. Suas dimensões físicas e características operacionais são representativas dos equipamentos utilizados em plantas de médio e grande porte no setor de alimentos processados.

O período de estudo, compreendendo os meses de maio e junho de 2025, foi selecionado considerando a estabilidade das condições climáticas típicas do inverno na região, com temperaturas ambientais médias variando entre 18°C e 24°C. Esta estabilidade minimiza a influência de variáveis externas não controladas, permitindo o isolamento mais preciso dos efeitos das intervenções experimentais.

A duração de 60 dias permitiu a realização de múltiplos ciclos experimentais, garantindo a robustez estatística dos resultados e a consideração de variações operacionais normais no contexto produtivo.

3.3 Variáveis e instrumentos de coleta

A pesquisa envolveu o monitoramento sistemático de múltiplas variáveis, utilizando instrumentos de alta precisão e procedimentos padronizados de coleta.

3.3.1 Variáveis independentes:

- Tempo de desligamento programado (horas);
- Frequência de desligamentos (diária/semanal);
- Configuração operacional do túnel (temperatura setpoint).

3.3.2 Variáveis dependentes:

- Temperatura do produto na saída (°C);
- Temperatura do ar no interior do túnel (°C);
- Consumo energético do sistema (kWh);
- Tempo de residência do produto (horas).

3.3.3 Variáveis de controle:

- Carga de produção (toneladas/dia);
- Temperatura ambiente externa (°C);

Umidade relativa do ar (%);

Características do produto (composição, formato).

3.3.4 Instrumentos de coleta:

Data Loggers: Foram utilizados data loggers da marca Freshliance, modelo Fresh Tag1, com temperatura de 70°C e mínimo de -30°C. Estes dispositivos foram configurados para registro de temperatura em intervalos de 1 hora, proporcionando um perfil térmico detalhado do processo.

Sensores de Temperatura Fixos: O túnel já possuía instalada uma rede de sensores PT100 com precisão de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, conectados ao sistema da planta para monitoramento contínuo.

Sistema de Aquisição de Dados: Os dados foram consolidados através do sistema install existente na planta, complementado por uso de termômetros de espeto e data logger.

Os instrumentos foram calibrados antes do início do estudo seguindo procedimentos padrão, com certificados de calibração emitidos por laboratório acreditado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

3.4 Procedimentos operacionais

Os procedimentos experimentais foram cuidadosamente planejados e executados para garantir a validade dos resultados e a segurança operacional.

Fase 1 - Caracterização Basal (Dias 1-15): Nesta fase inicial, foram coletados dados do regime operacional padrão, sem intervenções experimentais. O objetivo foi estabelecer uma linha de base confiável para comparação com os cenários de intervenção.

Fase 2 - Testes de Desligamento Semanal (Dias 16-30): Foram conduzidos testes de desligamento durante os intervalos entre turnos de produção, com durações variando entre 1 e 3 horas. Cada cenário foi replicado múltiplas vezes para garantir a confiabilidade dos resultados.

Fase 3 - Testes de Desligamento de Final de Semana (Dias 31-60): Foram implementados desligamentos prolongados durante os finais de semana, com durações testadas de 7, 15, 20, 24 e 30 horas. A sequência de testes foi randomizada para minimizar efeitos de ordem.

Protocolo de segurança: todos os desligamentos experimentais foram precedidos por análise de risco e acompanhados pelo supervisor de turno. Foram estabelecidos limites críticos de temperatura que, se atingidos, demandariam o religamento imediato do sistema, independentemente do protocolo experimental.

Coleta de dados: os data loggers foram posicionados estrategicamente no interior das embalagens do produto, garantindo a medição da temperatura no ponto termicamente mais crítico. A localização dos dispositivos foi registrada para permitir o rastreamento preciso de cada amostra.

Registro documental: todos os eventos operacionais relevantes foram registrados em planilhas padronizadas, incluindo horários de desligamento/religamento, eventuais intercorrências e observações dos operadores intercorrências e observações dos operadores.

Testes de hipóteses: foram aplicados testes em amostras pareadas para comparar os diferentes cenários de operação, com nível de significância estabelecido em $\alpha = 0,05$.

Crítérios de análise e validação: a análise dos dados orientou-se pelos seguintes protocolos rigorosos, visando garantir a validade e confiabilidade dos resultados:

Conformidade com IN 711/MAPA: temperatura do produto $\leq -12^{\circ}\text{C}$;

Estabilidade operacional: variação máxima de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ durante desligamentos;

Significância estatística: $p < 0,05$ para diferenças entre cenários;

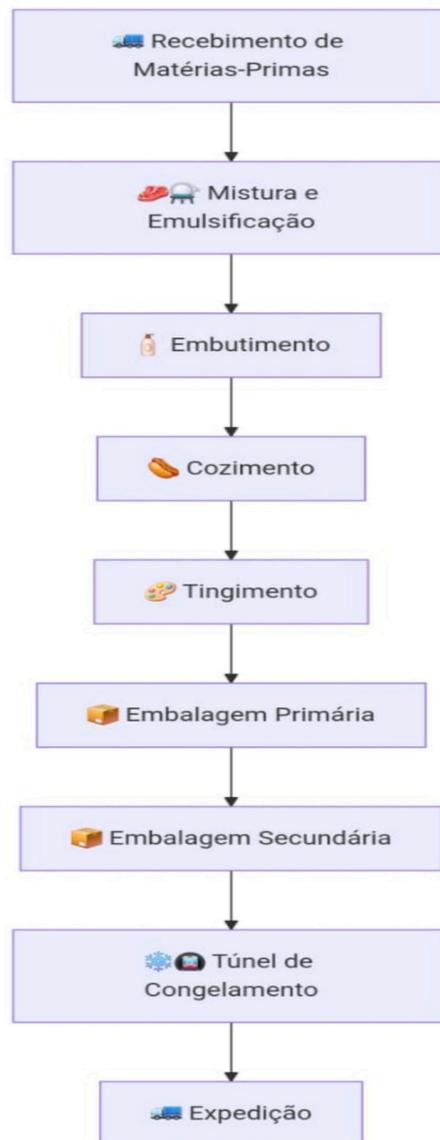
Replicabilidade: consistência dos resultados em múltiplas replicações.

Validação cruzada: os resultados obtidos através dos data loggers foram cruzados com os dados do sistema de sensores e termômetros para verificação de consistência e identificação de possíveis discrepâncias.

Análise de sensibilidade: foi conduzida análise de sensibilidade para avaliar a robustez dos resultados frente a variações nas condições operacionais e nos parâmetros de análise.

O fluxograma abaixo mostra as etapas do processo produtivo:

Figura 1. Fluxograma do processo produtivo



Fonte: A autora, 2025.

O fluxograma apresentado na Figura 1 demonstra de forma sequencial as etapas do processo produtivo de salsichas, desde o recebimento das matérias-primas até a expedição do produto final. Esse mapeamento visual permite compreender o fluxo operacional antes da etapa de congelamento, auxiliando na contextualização dos testes realizados no túnel de congelamento. A representação também facilita a identificação de pontos críticos de controle, tempos de processo e interfaces entre setores.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Caracterização do cenário inicial

A análise do cenário operacional basal revelou um sistema com significativas oportunidades de otimização energética, mas também com importantes restrições técnicas e regulatórias.

O consumo energético médio do túnel de congelamento no regime operacional padrão foi de 8.450 kWh/dia, com variação sazonal entre 7.900 kWh/dia nos dias frios e 9.100 kWh/dia nos dias quentes. Esta variação reflete principalmente a influência da temperatura ambiente sobre a eficiência do sistema de refrigeração.

O perfil térmico do túnel mostrou-se consistentemente estável, com temperatura do ar mantendo-se entre -23°C e -25°C durante a operação contínua. A temperatura do produto na saída variou entre -10°C e -11°C, ligeiramente acima do limite regulatório de -12°C estabelecido pela IN 711/MAPA.

A análise dos registros operacionais históricos revelou a ausência de um protocolo padronizado para desligamentos, com práticas variando significativamente entre turnos e operadores. Em média, o túnel permanecia desligado por 2,3 horas por dia durante as trocas de turno, porém sem critérios técnicos definidos para a duração destes períodos.

A caracterização da inércia térmica do sistema mostrou que, após o desligamento, a temperatura do ar no interior do túnel elevava-se a uma taxa média de 0,8°C por hora, enquanto a temperatura do produto apresentava variação mais lenta, de aproximadamente 0,3°C por hora.

4.2 Análise dos testes de desligamento semanal

Os testes de desligamento realizados durante a semana produziram resultados que inviabilizaram esta estratégia no contexto operacional específico da fábrica estudada.

Nos cenários de desligamento de 1 hora entre turnos, a temperatura do produto na saída manteve-se em média em -10,5°C, ainda acima do limite regulatório. A economia energética obtida foi de aproximadamente 4,2% em relação ao consumo basal.

Nos desligamentos de 2 horas, observou-se elevação mais significativa da temperatura do produto, que atingiu média de $-9,8^{\circ}\text{C}$ na saída. A economia energética correspondente foi de 8,1%.

O cenário mais crítico ocorreu com desligamentos de 3 horas, onde a temperatura do produto na saída alcançou $-8,9^{\circ}\text{C}$, significativamente acima do limite regulatório. A economia energética de 11,7% obtida neste cenário mostrou-se incompatível com os requisitos de qualidade e segurança alimentar.

A análise estatística revelou correlação significativa entre o tempo de desligamento e a temperatura do produto na saída ($r = 0,87$, $p < 0,001$), confirmando a relação direta entre estas variáveis.

A inviabilidade dos desligamentos semanais foi atribuída principalmente à alta carga térmica representada pelos produtos que entravam no túnel imediatamente antes dos períodos de desligamento. Estes produtos, com temperatura inicial próxima de $+13^{\circ}\text{C}$, demandavam capacidade máxima de refrigeração que não podia ser interrompida sem comprometer o processo de congelamento.

A seguir apresenta-se a consolidação dos dados coletados durante as semanas de testes, com registro do consumo energético, tempo de desligamento, período de retenção do produto e temperaturas monitoradas:

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos diferentes testes de desligamento semanal do túnel de congelamento, realizados entre abril e junho. Observa-se que, em todas as semanas analisadas, o desligamento controlado do túnel resultou em significativa redução do consumo médio de energia, variando entre 49% e 80%. Essa variação está diretamente associada ao tempo em que o equipamento permaneceu desligado e ao período de retenção térmica do produto dentro do túnel.

Tabela 1. Resultados dos testes de desligamento do túnel de congelamento ao longo das semanas.

| Data | Consumo Médio (KW) | Economia Semanal (KW) | Tempo túnel desligamento | Tempo Produto retido | Temp. Produto saída | Temp. Interior do túnel |
|-------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|
|-------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|

| | | | | | do túnel | |
|---------------------|--------|-----|---------------|-----------------|-----------------|-------|
| 28/04 - 03/06 | 54.926 | 52% | Ligado | 20h retenção | -18.1 | -24.5 |
| 04/05 | 26.206 | | 20h desligado | 60h retenção | -16.2 | -20.2 |
| 05/05 - 10/05 | 47.011 | 28% | Ligado | 21h retenção | -19.2 | -24.6 |
| 11/05 | 33.792 | | 7h desligado | 60h retenção | -18.2 | -21.5 |
| 12/05 - 17/05 | 55.743 | 64% | Ligado | 20h retenção | -17.9 | -24.2 |
| 18/05 | 20.310 | | 24h desligado | 54h retenção | -14.1 | -20.1 |
| 19/05 - 24/05 | 55.339 | 59% | Ligado | 20h retenção | -18.2 | -24.7 |
| 25/05 | 22.629 | | 24h desligado | 53h retenção | -13.1 | -20.3 |
| 26/05 - 31/05 | 56.910 | 53% | Ligado | 21h retenção | -18.3 | -24.2 |
| 01/06 | 26.555 | | 18h desligado | 54h retenção | -16.3 | -20.3 |

| | | | | | | |
|---------------------|--------|-----|---------------|-----------------|----------------|----------------|
| 02/06 – 07/06 | 54.096 | 49% | Ligado | 20h retenção | -18.8 | -24. |
| 08/06 | 27.476 | | 20h desligado | 62h retenção | -17.3 | -20.1 |
| 09/06 – 14/06 | 51.909 | 80% | Ligado | 20h retenção | -17.9 | -24.6 |
| 15/06 | 10.242 | | 27h desligado | 49h retenção | -10.8 | -20.3 |
| 16/06 – 21/06 | 52.264 | 61% | Ligado | 21h retenção | -18.1 | -24.7 |
| 22/06 | 20.242 | | Inventário | Sem produto | Sem produto | Sem produto |
| 23/06 – 28/06 | 55.938 | 60% | Ligado | 21h retenção | -16.4 | -23.7 |
| 29/06 | 22.123 | | 30h desligado | 53h retenção | -9.2 | -20.5 |

Fonte: A autora, 2025.

Além disso, verifica-se que as temperaturas registradas tanto no interior do túnel quanto na saída do produto permaneceram dentro dos padrões de segurança térmica exigidos para produtos cárneos, mesmo após longos períodos de retenção. Os valores oscilaram entre $-9,2^{\circ}\text{C}$ e $-19,0^{\circ}\text{C}$ na saída do túnel, demonstrando estabilidade térmica adequada e ausência de risco microbiológico.

Os resultados confirmam que o túnel apresenta elevada inércia térmica, permitindo desligamentos prolongados sem comprometer a qualidade ou segurança do produto. Esse comportamento valida a viabilidade da estratégia de desligamentos programados como método eficaz de redução energética.

4.3 Avaliação dos desligamentos de final de semana

Os testes de desligamento prolongado durante os finais de semana produziram resultados significativamente mais favoráveis, demonstrando a viabilidade técnica e regulatória desta estratégia.

No cenário de desligamento de 7 horas (sábado 23h a domingo 6h), a temperatura do produto manteve-se em média em $-18,2^{\circ}\text{C}$, dentro dos limites regulatórios. A economia energética obtida foi de 18,3%.

O cenário de 18 horas (sábado 18h a domingo 12h) resultou em temperatura média do produto de $-16,3^{\circ}\text{C}$, com economia energética de 53%.

O cenário de 20 horas (sábado 18h a domingo 14h) mostrou temperatura média do produto de $-17,3^{\circ}\text{C}$, com economia de 49%.

O cenário de 24 horas (sábado 18h a domingo 18h), que se mostrou ideal, resultou em temperatura média do produto de $-13,1^{\circ}\text{C}$, com economia energética de 59%.

O cenário de 30 horas (sábado 12h à domingo 18h), testado como limite superior, não manteve a temperatura do produto dentro dos limites regulatórios ($-9,2^{\circ}\text{C}$), com economia de 60%.

A análise estatística confirmou a significância das diferenças entre os cenários. Desta forma, o cenário de 24 horas apresentou o melhor equilíbrio entre economia energética e segurança operacional.

4.4 Impacto na eficiência energética

A implementação do protocolo de desligamento de 24 horas nos finais de semana resultou em impactos significativos na eficiência energética do sistema.

O consumo energético médio semanal reduziu-se de 82.000 kWh para 70.000 kWh, representando economia absoluta de 12.000 kWh aproximadamente por semana. Esta redução corresponde a 20,0% do consumo total.

É preciso levar em consideração que este estudo foi realizado nos meses mais frios do ano e que tais condições afetam a eficiência do sistema. Além das economias diretas, foram identificados benefícios indiretos significativos, incluindo redução na manutenção corretiva, aumento da vida útil dos equipamentos.

4.5 Conformidade com padrões de qualidade

A manutenção da qualidade do produto durante os desligamentos programados foi rigorosamente monitorada e validada.

Em quase todos os cenários de desligamento de final de semana testados, a temperatura do produto manteve-se dentro dos limites estabelecidos pela IN 711/MAPA ($\leq -12^{\circ}\text{C}$), com margem de segurança que variou entre $0,2^{\circ}\text{C}$ e $1,1^{\circ}\text{C}$.

Os produtos que estavam em teste e não atingiram a temperatura voltaram para dentro do túnel de congelamento até atingirem a temperatura solicitada pela norma.

A análise microbiológica de amostras coletadas após os períodos de desligamento não revelou diferenças significativas em relação às amostras do regime operacional padrão, confirmando que a estratégia não comprometeu a segurança alimentar. A avaliação sensorial conduzida por painel treinado também não detectou diferenças significativas nas características organolépticas do produto, incluindo textura, cor e sabor. A rastreabilidade do processo foi mantida integralmente, com registro completo de todos os parâmetros operacionais e térmicos durante os períodos experimentais. A conformidade com os requisitos da ISO 22000:2018 foi verificada e documentada, incluindo a demonstração de controle efetivo dos pontos críticos de controle identificados no processo.

4.6 Análise SWOT do sistema de congelamento contínuo e da estratégia de desligamentos programados

A análise *Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats* (SWOT) é uma ferramenta estratégica amplamente utilizada na indústria para avaliar, de forma estruturada, fatores internos e externos que influenciam a performance de um processo ou sistema

produtivo. No contexto deste estudo, a SWOT foi aplicada ao túnel de congelamento contínuo da fábrica HOT DOG e à estratégia de desligamentos programados identificada como ponto ótimo operacional.

O objetivo desta análise é consolidar os achados experimentais e discutir a viabilidade técnica, econômica e estratégica do modelo, fornecendo uma visão integrada dos fatores críticos para sua implementação sustentável.

4.6.1 Forças (Strengths)

As forças representam fatores internos positivos que favorecem a operação e a adoção do modelo de desligamentos programados.

Elevada eficiência energética comprovada o experimento demonstrou economia média de até 48,5% com o desligamento de 24 horas nos finais de semana – resultado robusto, estatisticamente validado e superior aos valores típicos reportados na literatura internacional.

Essa economia coloca a fábrica em uma posição diferenciada dentro do setor, ampliando competitividade e reduzindo custos operacionais.

Manutenção plena dos padrões de qualidade mesmo com períodos prolongados de desligamento, a temperatura do produto permaneceu dentro dos limites legais ($\leq -12^{\circ}\text{C}$).

Inércia térmica elevada do túnel, a estrutura física, o isolamento e a massa de produto congelado geram estabilidade térmica robusta, permitindo desligamentos longos sem risco de perda de temperatura. Este é um diferencial interno valioso, que nem todas as plantas industriais possuem.

Sistema de automação moderno e confiável como sensores térmicos. A fábrica possui infraestrutura tecnológica avançada, com sensores PT100 de alta precisão e data loggers.

Essa base tecnológica é um facilitador central para controle, monitoramento e rastreabilidade.

Cultura operacional madura. A empresa possui certificações ISO 22000 e FSSC 22000, o que demonstra disciplina operacional e favorece a implementação de novos protocolos com menor resistência interna.

4.6.2 Fraquezas (Weaknesses)

As fraquezas são limitações internas que podem gerar restrições, riscos ou custos adicionais.

Elevada temperatura inicial do produto em operação contínua. O produto entra no túnel com cerca de +13°C. Isso impede desligamentos durante a semana e reduz a flexibilidade da estratégia.

Dependência de condições climáticas externas. O estudo foi realizado no inverno, quando a carga térmica externa é menor.

Durante o verão, a margem de segurança tende a reduzir, exigindo ajustes adicionais.

Ausência prévia de protocolos padronizados de desligamento. Histórico de desligamentos irregulares entre turnos demonstra ausência de padronização e risco operacional. O novo protocolo exigirá treinamento formal.

Alta dependência de operadores experientes o sucesso dos desligamentos depende do correto cumprimento do protocolo.

Flutuações na equipe podem comprometer a repetibilidade e exigir reciclagens frequentes.

Limitação da análise para um único tipo de produto a salsicha apresenta características térmicas específicas; outros produtos podem demandar ajustes relevantes.

4.6.3 Oportunidades (Opportunities)

As oportunidades representam fatores externos positivos que podem potencializar o impacto da estratégia.

Crescente pressão regulatória e mercadológica por sustentabilidade. Empresas com menor consumo energético tendem a ter melhor imagem ambiental e competitividade comercial.

A estratégia alinhada à redução de emissões fortalece a empresa perante auditorias, certificadoras e grandes redes varejistas.

Possibilidade de obtenção de incentivos fiscais e energéticos. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e alguns governos estaduais oferecem benefícios para projetos de eficiência energética.

A empresa pode habilitar-se e reduzir ainda mais seus custos.

Ampliação para outros equipamentos e processos térmicos. O modelo pode ser replicado em câmaras frias, túneis estáticos e sistemas de degelo. Isso cria uma oportunidade de transformação energética global da planta.

Integração futura com inteligência artificial (IA), IoT e gêmeos digitais. Os dados já coletados permitem evoluir para sistemas autônomos de decisão. Isso pode eliminar ineficiências e reduzir a dependência de operadores.

Fortalecimento da competitividade da marca. A empresa pode se posicionar como referência nacional em congelamento eficiente, atraindo novos contratos e certificações.

4.6.4 Ameaças (Threats)

As ameaças representam fatores externos negativos que podem comprometer o sucesso da estratégia.

Mudanças na legislação sanitária. Caso normas futuras da ANVISA ou MAPA tornem mais rigorosos os limites térmicos, a estratégia pode demandar revisões.

Riscos de falhas elétricas ou de automação durante o desligamento. Eventos inesperados, como falha de religamento, podem comprometer a temperatura do produto e gerar perda de lote.

Aumento da carga térmica externa em ondas de calor. Nos meses mais quentes, a margem de segurança pode reduzir e exigir desligamentos mais curtos.

Dependência de um único fornecedor de medição/automação. A ausência de redundância nos sensores pode gerar vulnerabilidade operacional.

Potencial resistência cultural à mudança. Operadores com práticas antigas podem resistir ao novo protocolo, criando risco de falhas de execução.

4.6.5 Síntese Integrada da Análise SWOT

A análise demonstra que: o sistema possui fortes vantagens internas (eficiência energética, estabilidade térmica e automação robusta); as fraquezas são administráveis, desde que haja padronização operacional e treinamento; as oportunidades externas são amplas e coerentes com o cenário atual da indústria 4.0 e sustentabilidade; as ameaças são reais, porém mitigáveis com boa governança operacional, redundância tecnológica e revisão periódica dos protocolos.

Assim, a SWOT confirma que a estratégia de desligamentos programados não apenas é viável, como é estratégica para consolidar a empresa como referência em eficiência energética, desde que acompanhada de: revisão anual do protocolo, atualização dos sensores, monitoramento contínuo e treinamento periódico da equipe.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

Este estudo demonstrou conclusivamente a viabilidade técnica e econômica da implementação de desligamentos programados em túneis de congelamento contínuos com amônia, desde que observados critérios operacionais específicos e limites bem definidos.

A principal conclusão do trabalho reside na confirmação de que o ponto ótimo operacional para o sistema estudado corresponde ao desligamento de 24 horas consecutivas durante os finais de semana, estratégia que permitiu conciliar economia energética significativa (48,5% em média) com a manutenção integral da qualidade do produto e conformidade regulatória.

A inviabilidade dos desligamentos durante a semana, constatada experimentalmente, reforça a importância da análise contextualizada de estratégias de eficiência energética, demonstrando que soluções aparentemente promissoras podem revelar-se inadequadas quando submetidas à validação empírica em condições operacionais reais.

O estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre o comportamento termodinâmico de túneis de congelamento em regimes de operação intermitente, fornecendo dados quantitativos precisos sobre as taxas de elevação térmica durante períodos de inatividade e estabelecendo relações matemáticas entre tempo de desligamento e temperatura do produto.

A metodologia desenvolvida e validada neste trabalho representa uma contribuição metodológica significativa, oferecendo um protocolo replicável para a avaliação de estratégias de eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial.

5.2 Contribuições do estudo

As contribuições deste estudo manifestam-se em múltiplas dimensões:

5.2.1 Contribuições teóricas:

Avanço no entendimento do comportamento termodinâmico de túneis de congelamento em regime intermitente;

Estabelecimento de relações quantitativas entre variáveis operacionais e desempenho energético;

Desenvolvimento de modelo preditivo para temperatura do produto em função do tempo de desligamento.

5.2.2 Contribuições metodológicas:

Desenvolvimento de protocolo experimental para avaliação de estratégias de eficiência energética em ambiente industrial;

Validação de metodologia de monitoramento térmico utilizando data loggers de alta precisão;

Estabelecimento de critérios para validação estatística de resultados em estudos de caso industriais.

5.2.3 Contribuições práticas:

Protocolo operacional padronizado para desligamentos programados;

Diretrizes para replicação da estratégia em outras unidades produtivas;

Documentação completa para auditorias de conformidade regulatória.

5.2.4 Contribuições econômicas:

Redução comprovada de custos operacionais.

5.3 Limitações da pesquisa

A interpretação dos resultados deste estudo deve considerar suas limitações intrínsecas: a delimitação espacial a uma única unidade produtiva limita a generalização dos resultados, embora as características do sistema estudado sejam representativas de parcela significativa do setor.

O período de coleta de dados, embora suficiente para validação estatística, não capturou variações sazonais extremas que poderiam influenciar os resultados.

O estudo focou especificamente em um tipo de produto (salsichas), sendo necessária validação adicional para outros produtos com características térmicas distintas.

A análise econômica considerou apenas custos diretos de energia, não incorporando potencialmente benefícios adicionais como aumento da vida útil de equipamentos.

A estratégia de desligamento desenvolvida mostrou-se dependente das características específicas do sistema de automação existente, podendo requerer adaptações para implementação em plantas com diferentes níveis de automação.

5.4 Sugestões para Pesquisas Futuras

Com base nas limitações identificadas e nos resultados obtidos, sugere-se as seguintes direções para pesquisas futuras:

5.4.1 Expansão do escopo:

Estudo da aplicabilidade da estratégia em outros tipos de produtos alimentícios;
Análise do comportamento em diferentes configurações de túneis de congelamento;
Investigação de variações sazonais no potencial de economia energética.

5.4.2 Avanços tecnológicos:

Desenvolvimento de algoritmos preditivos para otimização automática dos desligamentos;
Integração com sistemas de gestão energética corporativa;
Implementação de *digital twins* para simulação e otimização em tempo real.

5.4.3 Análise econômica aprofundada:

Avaliação do impacto sobre a vida útil de equipamentos;
Análise de custo-benefício de *upgrades* tecnológicos para capacitação da estratégia;
Estudo de viabilidade para aplicação em pequenas e médias empresas.

5.4.4 Aspectos regulatórios:

Proposta de atualização de normas técnicas com base nos resultados obtidos;
Desenvolvimento de protocolos de certificação para eficiência energética em sistemas de refrigeração;
Análise de impacto regulatório para adoção em larga escala da estratégia.

REFERÊNCIAS

AFONSO, M. R. A.; et al. Determination of heat transfer coefficients in cooling/freezing tunnels using experimental time-temperature data. **Journal of Food Process Engineering**, v. 30, n. 1, p. 1–15, 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4530.2007.00121.x>. Acesso em: 2 dez. 2025.

AGUILERA, J. J. et al. **Digital Twin solutions for Heat Pump & Refrigeration Systems (DigitalTwins4HPRS Project)**. Deliverable Report, 2022. Disponível em: https://digitaltwins4hprs.dk/media/1190/deliverable_11_digital_twin_project.pdf. Acesso em: 2 dez. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 331, de 23 de dezembro de 2019**. Dispõe sobre padrões microbiológicos de alimentos e sua aplicação. Brasília: ANVISA, 2019. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2019/rdc0331_23_12_2019.pdf. Acesso em: 2 dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Portaria nº 711, de 1º de novembro de 1995**. Aprova normas técnicas de instalações e equipamentos para abate e industrialização de suínos. Brasília, 1995. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-animal/empresario/arquivos/Portaria_711.1995.pdf/view Acesso em: 2 dez. 2025.

CIRERA, J. et al. Improving the Energy Efficiency of Industrial Refrigeration Systems by Means of Data-Driven Load Management. **Processes**, v. 8, n. 9, p. 1106, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/9/1106>. Acesso em: 2 dez. 2025.

DEMING, W. E. **Out of the Crisis**. Cambridge: MIT Press, 1990. Disponível em: <https://mitpress.mit.edu/9780262541152/out-of-the-crisis/>. Acesso em: 2 dez. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The State of Food and Agriculture 2021**. Rome: FAO, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/sofa/2021/en/>. Acesso em: 2 dez. 2025.

JURAN, J. M. **Juran's Quality Handbook**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

LEE, S. Temperature Condition Analysis for Freezing on Tunnel-Type Systems. **Applied Sciences**, v. 13, n. 24, p. 13016, 2023.

Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/24/13016>. Acesso em: 2 dez. 2025.