

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
JEAN KARLOS HENRIQUE RENTZ

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: COMPARAÇÃO ENTRE DOIS SISTEMAS DE
VENTILAÇÃO EM TÚNEIS DE CONGELAMENTO.**

CASCADEL
2023

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
JEAN KARLOS HENRIQUE RENTZ

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: COMPARAÇÃO ENTRE DOIS SISTEMAS DE
VENTILAÇÃO EM TÚNEIS DE CONGELAMENTO.**

Projeto de pesquisa apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade da Fundação Assis Gurgacz para elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso II.

Orientador: Prof. Eng Me. Denise Da Costa Canfild

CASCADEL

2023

DEDICATÓRIA

Este estudo dedico a toda a minha família, e aos amigos que me apoiaram nessa caminhada e serviram como incentivo diário, chegando nessa etapa tão sonhada de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo apoio espiritual que me concedeu nesse momento, só ele e eu sabemos o quanto foi difícil realizar essa pesquisa de TCC, quantos momentos eu pensei em desistir de tudo, mas a minha fé me sustentou. Deus agradeço por ser meu norte, por me ajudar a passar pelas adversidades.

Gostaria de estender meus sinceros agradecimentos a toda a minha família pelo apoio incondicional ao longo dessa jornada acadêmica, a compreensão foi fundamental para que eu chegasse até este momento, cada palavra de encorajamento e gesto de carinho fortaleceu minha determinação e me deu a certeza de que nunca estive sozinho nessa trajetória.

Aos meus professores, em especial a minha orientadora, professora engenheira mestre Denise da Costa Canfild, meu respeito e agradecimento profundo. Suas habilidades e conhecimento sua dedicação inspiraram meu crescimento intelectual e me moldaram como estudante e como pessoa, suas orientações e *feedbacks* valiosos foram essenciais para aprimorar este trabalho e para meu desenvolvimento contínuo.

Não posso deixar de expressar minha gratidão aos meus amigos, que estiveram sempre ao meu lado, compartilhando não apenas os momentos alegres, mas também me apoiando nas horas mais desafiadoras.

Vinde a mim, todos os que estai cansados e oprimidos, e eu vos aliviarei.

Mateus 11:28

LISTA DE ABREVIATÖES

US EPA	Agência de Produção Ambiental dos Estados Unidos
W	Watts
V	Volts
NBR	Norma Brasileira Registrada
kWh	Quilo Watts hora
FP	Fator de Potência
ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnicas
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
VAR	Volt Ampère Reativo
CO ₂	Dióxido de carbono
WEG	Werner, Eggon e Geraldo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de refrigeração por compressão	18
Figura 2 - Motor de indução trifásico	30
Figura 3 - Controle de chaveamento de inversor de frequência.....	32
Figura 4 - Sistema de controle de disparo.....	33
Figura 5 - Comportamento da onda de tensão do SCR	34
Figura 6 - Ligações do equipamento Soft-Starter.....	35
Figura 7 - Analisador de energia EMBRASUL.....	36
Figura 8 - Forma estrutural do túnel de congelamento.....	38
Figura 9 - Motor do Ventilador.....	39
Figura 10 - Grupo de soft-starter	40
Figura 11 - Coleta de dados túnel York.....	41
Figura 12 - Configuração dos horários tarifários	42
Figura 13 - Fatura de energia mercado livre	43
Figura 14 - Inversores de frequência.....	45
Figura 15 - Coleta de dados túnel Johnson.....	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Média do consumo diário túnel York.....	42
Gráfico 2 – Consumo túnel York do dia 13/09 a 15/09.....	43
Gráfico 3 - Consumo túnel York do dia 16/09 a 19/09.....	44
Gráfico 4 - Média do consumo diário túnel Johnson	46
Gráfico 5 - Média do consumo diário em kWh.....	46
Gráfico 6 - Fator de potência do "Sistema A"	47
Gráfico 7 - Fator de potência do "Sistema B"	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo em (kWh) Túnel de congelamento Johnson.....	50
Tabela 2 - Consumo em (kWh) Túnel Johnson em horário de ponta	51
Tabela 3 - Consumo fora ponta túnel Johnson.....	51
Tabela 4 - Consumo de Energia Elétrica de um Ventilador Túnel Johnson	52
Tabela 5 - Consumo em (kWh) Túnel de congelamento York.....	52
Tabela 6 - Consumo túnel York horário de ponta.....	52
Tabela 7 - Consumo túnel York fora ponta.....	53
Tabela 8 - Consumo de Energia Elétrica de um Ventilador Túnel York	53
Tabela 9 - Consumo de Energia Elétrica de um Ventilador Túnel York	53

RESUMO

Este estudo examina a eficiência energética em túneis de congelamento, explorando os princípios termodinâmicos, tecnologias inovadoras e práticas operacionais essenciais. Investiga-se a aplicação dos ciclos de refrigeração por compressão, destacando sua relevância na criação de sistemas de refrigeração altamente eficientes. Além disso, as tecnologias emergentes, como materiais de mudança de fase, que estão transformando a indústria, são mencionadas. A importância das práticas operacionais, incluindo a otimização da carga de sistema e energéticos regulares, também é enfatizada. A conscientização pública e a educação continuada são fundamentais, assim como o papel das políticas governamentais na promoção da eficiência energética. Este estudo conclui que a busca pela excelência na eficiência energética é uma jornada contínua e que as indústrias que utilizam túneis de congelamento devem liderar o caminho para um futuro mais sustentável. O investimento em inversores de frequência, avaliado em R\$ 9.000,00 por unidade, totaliza R\$ 178.000,00 para a atualização e substituição. O retorno do investimento é projetado em até 11 meses, com uma margem de erro de 2%. Esses resultados sugerem que a mudança para a utilização de inversores é uma escolha financeiramente vantajosa, considerando a rápida recuperação do investimento.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência energética, túneis de congelamento, princípios termodinâmicos, tecnologias emergentes, práticas operacionais, conscientização pública, políticas governamentais.

ABSTRACT

This study examines energy efficiency in freezing tunnels, exploring thermodynamic principles, innovative technologies, and essential operational practices. Investigates the application of evolutionary refrigeration cycles, highlighting their relevance in creating highly efficient refrigeration systems. Additionally, emerging technologies, such as materials change, are evolving the industry. The importance of operational practices, including optimization of the regular energy system load, is also emphasized. Public awareness and continuing education are fundamental, as is the role of government policies in promoting energy efficiency. This study concludes that the pursuit of excellence in energy efficiency is an ongoing journey and that industries using freezing tunnels must lead the way to a more sustainable future. The investment in frequency investments, valued at R\$9,000.00 per unit, totals R\$178,000.00 for updating and replacement. The return on investment is projected in up to 11 months, with a margin of error of 2%. These results suggest that changing the use of investments is a financially advantageous choice, considering a quick recovery of the investment.

KEYWORDS: Energy efficiency, freezing tunnels, thermodynamic principles, emerging technologies, operational practices, public awareness, government policies.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 REFRIGERAÇÃO NA INDÚSTRIA.....	16
2.2 LEI DA TERMODINÂMICA	17
2.3 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO	18
2.4 PRINCIPAIS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO UTILIZADOS EM TÚNEIS DE CONGELAMENTO.....	19
2.5 SEGURANÇA ENERGETICA.....	21
2.6 A LEI DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	22
2.7 REGULATORIOS DE INCENTIVOS A EFICIENCIA ENERGETICA	25
2.8 PERSPECTIVAS ENERGETICAS.....	25
2.9 FATOR DE POTÊNCIA.....	26
3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	Erro! Indicador não definido.
3.1 MOTORES ELÉTRICOS.....	30
3.2 INVERSORES DE FREQUÊNCIA	30
3.3 CONTROLE DE CHAVEAMENTO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA	32
3.4 SOFT-STARTER	32
4 MATERIAS E METODOS	36
4.1 LOCAL DO ESTUDO	36
4.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	36
4.3 METODOLOGIA	38
4.3.1 Túnel de retenção variável – TRV	38
4.3.2 Motores dos ventiladores	39
4.3.3 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS.....	40
5 RESULTADOS E DISCUSSOES	50
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

No cenário contemporâneo, onde a sustentabilidade e a eficiência energética são temas centrais, a busca por soluções que reduzam o consumo de energia e minimizem o impacto ambiental torna-se essencial. Nesse contexto, a eficiência energética em sistemas de ventilação desempenha um papel crucial, especialmente em ambientes como túneis de congelamento, onde o controle térmico é vital para a preservação de produtos sensíveis à temperatura.

Este estudo se concentra na análise comparativa da eficiência energética entre dois sistemas de ventilação em túneis de congelamento. A delimitação do tema se faz necessária para focar a pesquisa nos sistemas de ventilação específicos, permitindo uma análise detalhada e aprofundada das variáveis envolvidas.

A justificativa para esta pesquisa reside na urgência de encontrar soluções mais eficientes e sustentáveis para sistemas de ventilação em túneis de congelamento. O aumento na demanda por produtos congelados requer sistemas que não apenas preservem a qualidade dos produtos, mas também reduzam o consumo de energia. Compreender as diferenças de eficiência entre os sistemas de ventilação existentes pode levar a melhorias significativas na economia de energia e, por conseguinte, na redução das emissões de gases de efeito estufa.

Partindo do pressuposto de que diferentes sistemas de ventilação em túneis de congelamento apresentam variações significativas em termos de eficiência energética, a hipótese deste estudo é que um sistema específico demonstrará uma eficiência superior em relação ao consumo de energia quando comparado com outro sistema em condições similares de operação.

O objetivo geral deste estudo é analisar e comparar a eficiência energética entre dois sistemas de ventilação em túneis de congelamento, identificando qual deles consome menos energia para manter as condições de temperatura ideais para a conservação dos produtos.

Para alcançar os objetivos propostos, este estudo utilizará uma análise com a utilização de um analisador de energia, que realizara a análise periódica dos sistemas distintos

A análise comparativa será baseada em dados quantitativos e qualitativos obtidos a partir dos dados coletados, permitindo uma avaliação crítica e fundamentada dos sistemas em estudo.

Ao final deste estudo, espera-se fornecer *insights* importantes para a indústria de túneis de congelamento, orientando a escolha de sistemas de ventilação mais eficientes do ponto de vista energético e contribuindo para a promoção de práticas sustentáveis no setor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo busca fazer um levantamento de toda a fundamentação teórica, para desenvolver uma análise de dados, e implantação de futuros sistemas, envolvendo refrigeração de grande porte, eficientes com menores custos em indústrias.

2.1 REFRIGERAÇÃO NA INDÚSTRIA

De acordo com Silva (2010), a refrigeração é o processo de remoção de calor de um meio, reduzindo sua temperatura e mantendo essa condição por meios mecânicos ou naturais. Na indústria, a refrigeração é categorizada com base na faixa de temperatura de operação, geralmente variando até $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ nos processos de resfriamento de alimentos. As aplicações que exigem temperaturas abaixo deste limite estão relacionadas à indústria da criogenia, como na produção de gás natural liquefeito, oxigênio e nitrogênio líquido. Além disso, a refrigeração é classificada em aplicações para conservação de alimentos e climatização de ambientes.

O armazenamento de alimentos congelados tem como objetivo preservar suas características. De acordo com a ASHRAE (2002) citada por Barbin et al. (2009), os processos de resfriamento e congelamento dos alimentos reduzem reações químicas e biológicas desencadeadas por micro-organismos e enzimas. A cristalização da água livre nos alimentos também reduz a atividade de água, retardando assim o processo de deterioração do alimento. O congelamento, ao transformar a água em gelo, impossibilita a regeneração e o crescimento de bactérias, diminuindo as reações químicas e desacelerando a deterioração. No entanto, para conter as reações enzimáticas, é necessário ferver o alimento ou adicionar produtos químicos. O congelamento permite a conservação dos alimentos por vários meses, desde que seja mantida uma temperatura constante de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou inferior. No sistema de refrigeração por ar forçado, temperaturas baixas são utilizadas como elemento de resfriamento, baseando-se no princípio da convecção. Nesse sistema, o ar é forçado por ventiladores e exaustores que conduzem o fluxo entre os produtos no ambiente de congelamento. Isso reduz significativamente o tempo de resfriamento em comparação com sistemas que não utilizam ar forçado,

como o processo em uma geladeira. Esse método é aplicado em sistemas que utilizam equipamentos de funcionamento contínuo ou em batelada.

Após o resfriamento, o produto é transferido para o centro de estocagem, dimensionado levando em consideração a carga máxima suportada. O dimensionamento leva em conta a carga térmica mais alta e as condições climáticas mais severas para garantir que o processo atenda à demanda, mesmo em situações desfavoráveis. Existem dois tipos de sistemas aplicados ao congelamento por ar forçado: insuflação e exaustão, ambos inseridos diretamente ou indiretamente. A insuflação direta é a aplicação mais comum na linha industrial. No entanto, este sistema é sensível a alterações na quantidade e distribuição de produtos durante o processo, afetando significativamente o fluxo de ar forçado contínuo. A taxa de transferência de calor varia devido à disposição dos produtos nos compartimentos, influenciada pela diferença de temperatura, área de superfície de contato com o meio de resfriamento, velocidade do ar de resfriamento e orientação da montagem e empilhamento dos produtos (Baird et al., 1988; Fraser, 1998; Laguerre et al., 2006, citados por Barbin et al., 2009).

2.2 LEI DA TERMODINÂMICA

De acordo com as contribuições de Çengel e Boles (2013), a primeira lei da termodinâmica estabelece o princípio fundamental da conservação de energia, descrevendo que a energia pode assumir diversas formas, como energia térmica, mecânica, química, entre outras, sendo transformada durante os processos. Neste estudo, concentramo-nos nas transformações envolvendo energia térmica (através do calor) e energia mecânica (através do trabalho).

Especificamente, a energia térmica é definida como a forma de transferência de energia que ocorre entre sistemas com diferentes temperaturas, fluindo do sistema de alta temperatura para o sistema de baixa temperatura (Wilén et al., 2012). Por outro lado, a energia mecânica é aquela que pode ser totalmente convertida em trabalho mecânico por um dispositivo mecânico ideal (Çengel & Boles, 2013).

A primeira lei da termodinâmica estabelece que a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada. No entanto, a segunda lei da termodinâmica enfatiza que a energia possui qualidades e quantidades, e que os processos reais resultam na diminuição da qualidade da energia. Assim, os processos devem

obedecer tanto à primeira quanto à segunda lei da termodinâmica, sendo esta última crucial na determinação dos limites teóricos para o desempenho dos sistemas de engenharia, como máquinas térmicas e refrigeradores (Çengel & Boles, 2013).

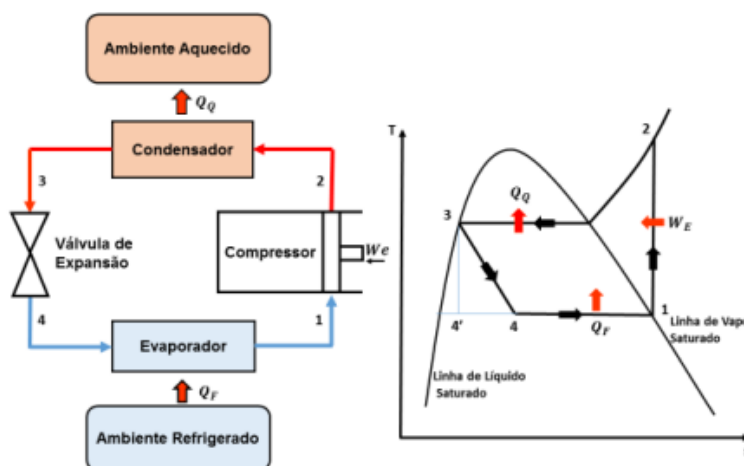
Os dispositivos responsáveis pela produção de refrigeração são conhecidos como refrigeradores, e os ciclos nos quais operam são denominados ciclos de refrigeração. Um dos ciclos mais comuns é o ciclo de refrigeração por compressão de vapor. Embora o ciclo de Carnot contenha todos os componentes necessários para um processo de refrigeração, ele não é aplicado na prática devido a desafios operacionais relacionados aos fluidos e aos equipamentos. Em contrapartida, o ciclo de compressão de vapor é mais aplicável na prática, representando a operação real de sistemas de refrigeração (Moran & Shapiro, 2009).

2.3 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO

A diferença fundamental entre o ciclo de refrigeração por compressão de vapor e o ciclo de Carnot reside no fato de que o calor trocado entre o fluido refrigerante e as fontes quente e fria ocorre na forma de calor latente, ou seja, calor associado aos processos de condensação e vaporização (Costa, 2013).

Para Çengel e Boles (2013), o ciclo de refrigeração ideal por compressão de vapor envolve a vaporização e condensação cíclicas do fluido refrigerante por meio de quatro processos, conforme ilustrado na Figura 1, onde as setas vermelhas indicam o lado de alta pressão e as setas azuis representam o lado de baixa pressão.

Figura 1 - Ciclo de refrigeração por compressão



Fonte: Çengel e Boles (2013)

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor é composto pelos seguintes processos:

- Processo 1-2: Nesta etapa, o fluido é basicamente comprimido no compressor. Ele entra como vapor saturado e sai como vapor superaquecido, devido ao aumento da temperatura que o eleva muito acima da temperatura da vizinhança.
- Processo 2-3: O fluido, agora vapor superaquecido, entra no condensador e libera calor para o ambiente circundante, transformando-se em líquido saturado a uma pressão constante.
- Processo 3-4: O fluido, em estado líquido saturado, é estrangulado até a pressão do evaporador, seja por meio de uma válvula de expansão ou um tubo capilar. Durante esse processo, há um aumento no volume específico e a temperatura do fluido diminui abaixo da temperatura do espaço a ser refrigerado.
- Processo 4-1: Nesta fase, ocorre a absorção de calor à pressão constante no evaporador. O fluido sai como vapor saturado e é reintroduzido no compressor, fechando assim o ciclo de refrigeração.

Além do ciclo de compressão de vapor, existem outras tecnologias emergentes que estão sendo exploradas para melhorar a eficiência energética nos sistemas de refrigeração. Uma delas é a tecnologia de ciclo de absorção, que utiliza a absorção de um fluido refrigerante em um absorvedor para fornecer refrigeração. Esse método é particularmente útil em aplicações onde o calor residual ou a energia térmica de baixa qualidade está disponível, como em processos industriais ou usinas de cogeração. Ao aproveitar essa energia residual, o ciclo de absorção pode aumentar significativamente a eficiência do sistema de refrigeração.

2.4 PRINCIPAIS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO UTILIZADOS EM TÚNEIS DE CONGELAMENTO

Os túneis de congelamento são amplamente utilizados na indústria alimentícia para o armazenamento de alimentos congelados. Para garantir a qualidade dos produtos, é fundamental manter a temperatura adequada no interior desses túneis.

Nesse sentido, a escolha do sistema de ventilação mais adequado é um fator crucial.

Um dos sistemas mais utilizados é o sistema de ventilação por ar forçado. Este sistema consiste em utilizar ventiladores para forçar a circulação do ar frio pelo

interior do túnel, garantindo que todo o produto seja resfriado de forma uniforme. Um estudo realizado por Zhang et al. (2018) analisou a distribuição da temperatura em um túnel de congelamento equipado com um sistema de ventilação por ar forçado. Os resultados mostraram que o sistema foi capaz de manter uma temperatura uniforme em toda a área do túnel.

Outro sistema de ventilação comumente utilizado é o sistema de ventilação por gravidade. Este sistema consiste em fazer com que o ar frio circule naturalmente pelo túnel, sem a necessidade de ventiladores. Um estudo realizado por Zhang et al. (2021) comparou a eficiência do sistema de ventilação por gravidade com o sistema de ventilação por ar forçado. Os resultados mostraram que o sistema de ventilação por gravidade apresentou um desempenho inferior em relação à manutenção da temperatura uniforme no túnel.

Além disso, há também o sistema de ventilação híbrido, que combina os sistemas de ventilação por ar forçado e por gravidade. Este sistema tem sido utilizado para melhorar a eficiência energética dos túneis de congelamento. Um estudo realizado por Olatunbosun et al. (2018) avaliou a eficiência energética de um túnel de congelamento equipado com um sistema de ventilação híbrido. Os resultados mostraram que o sistema híbrido foi capaz de reduzir significativamente o consumo de energia em relação aos sistemas de ventilação convencionais.

Existem diferentes tipos de sistemas de ventilação que podem ser utilizados em túneis de congelamento. Um deles é o sistema de ventilação forçada, que é comumente utilizado em túneis de congelamento para garantir uma distribuição uniforme do ar frio. De acordo com Bortolin et al. (2021), esse sistema consiste em um conjunto de ventiladores que são instalados no teto do túnel e que são responsáveis por circular o ar frio pelo interior do ambiente.

Outro sistema de ventilação comumente utilizado em túneis de congelamento é o sistema de ventilação natural. Segundo D'Amico et al. (2018), esse sistema é baseado na circulação natural do ar frio no interior do túnel, sem a utilização de ventiladores. Esse tipo de sistema é mais adequado para túneis de congelamento menores e que possuem uma baixa demanda de produção.

Além desses sistemas, também existem outras tecnologias que podem ser utilizadas em túneis de congelamento, como o sistema de ventilação com ar quente, que é capaz de reduzir o acúmulo de gelo nas paredes do túnel. Segundo Leão et

al. (2020), esse sistema consiste na injeção de ar quente no interior do túnel, que é responsável por derreter o gelo acumulado nas paredes.

A escolha do sistema de ventilação mais adequado para um túnel de congelamento depende de uma série de fatores, como a demanda de produção, o tamanho do ambiente, entre outros. Por isso, é importante realizar um estudo detalhado das características do ambiente antes de escolher qual sistema utilizar.

Um estudo realizado por Queirós et *al.* (2020) avaliou o desempenho energético de sistemas de ventilação em túneis de congelamento e concluiu que o sistema de ventilação com trocador de calor de placas é mais eficiente em termos de consumo de energia, se comparado com o sistema de ventilação com trocador de calor de tubos. Já um estudo realizado por Costa et *al.* (2021) avaliou o desempenho de um sistema de ventilação misto em um túnel de congelamento de alimentos e verificou que a combinação de ventiladores axiais e centrífugos pode ser uma solução viável em termos de eficiência energética e qualidade do ar interno.

Outro estudo realizado por Rodríguez et *al.* (2019) analisou o impacto do uso de sistemas de ventilação em túneis de congelamento sobre o consumo de energia e emissões de CO₂. Os resultados mostraram que o uso de sistemas de ventilação eficientes pode reduzir significativamente o consumo de energia e as emissões de CO₂, além de melhorar a qualidade do ar interno. Já um estudo de Carvalho et *al.* (2019) avaliou a eficiência energética de um sistema de ventilação em um túnel de congelamento e concluiu que o uso de equipamentos mais eficientes e a adoção de medidas de controle de fluxo de ar podem contribuir para a redução do consumo de energia e dos custos operacionais.

Portanto, é possível afirmar que a escolha do sistema de ventilação adequado pode ser um fator crucial para a eficiência energética em túneis de congelamento, reduzindo o consumo de energia e os custos operacionais.

2.5 SEGURANÇA ENERGETICA

A segurança energética é a capacidade de um país ou região de suprir suas necessidades energéticas de forma confiável e sustentável, garantindo o acesso à energia a preços acessíveis e minimizando os riscos de interrupção do fornecimento. A segurança energética é um fator crítico para o desenvolvimento econômico e

social, bem como para a estabilidade política e a segurança nacional. (Altoé, et al, 2011).

De acordo com Queirós et al. (2020) para garantir a segurança energética, é necessário diversificar as fontes de energia e reduzir a dependência de fontes únicas ou de regiões específicas. Também é importante investir em infraestrutura energética, como redes de transmissão e armazenamento de energia, e em tecnologias que permitam a geração e distribuição de energia de forma mais eficiente e sustentável.

A segurança energética também está relacionada à eficiência energética e à conservação de energia. Isso inclui a adoção de tecnologias mais eficientes, como sistemas de iluminação LED e equipamentos de alta eficiência energética, bem como a promoção do uso consciente de energia por meio de campanhas educativas e incentivos financeiros. A segurança energética deve levar em consideração as mudanças climáticas e os desafios ambientais, buscando soluções que minimizem o impacto ambiental e promovam a transição para uma matriz energética mais sustentável e renovável. Tolmasquim (2012)

2.6 A LEI DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A lei n.º 10.295, de 17 de outubro de 2001, no seu artigo 2º, destaca que o estabelecimento dos níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimo de eficiência energética, dos equipamentos e máquinas, será realizado com base em valores técnica e economicamente viáveis. Para o atendimento desta condição é necessário reunir um conjunto de informações relacionadas ao mercado do equipamento em análise, tarefa que às vezes se revela de enorme dificuldade em face da competição existente em alguns setores entre os diversos fabricantes. Como exemplo destes dados de mercado, para um dado equipamento, pode-se citar o volume anual de vendas (mercado interno e externo); o volume anual de produção (incluindo também as possíveis importações); rede de distribuição (estratégias de transporte, vendas para pequenos e grandes varejistas, vendas por internet, margens de lucro, etc); custos associados à produção, distribuição e vendas; informações relacionadas a marcas, patentes; estágio tecnológico atual e possibilidades de avanço incluindo os custos econômicos correspondentes.(HADDAD,2019)

Naturalmente nem todas as informações serão possíveis de serem obtidas. É importante também desenvolver análises que possam avaliar as consequências no mercado (aumento/redução nas vendas, aceitação dos consumidores por extrato socioeconômico etc.) quando da entrada em vigor de determinados níveis máximos de consumo específico de energia. Mesmo porque, associado a este e outros programas que dependem da participação do consumidor final, para o seu êxito também continua valendo a lei de mercado relativo à oferta e procura. A implementação da Lei de Eficiência Energética deve promover transformações no mercado, com a entrada no médio e longo prazo de produtos com inovações tecnológicas decorrentes dos equipamentos mais eficientes energeticamente. O estabelecimento dos níveis máximos de consumo específico de energia e o Programa de Metas são os fatores que possibilitarão, na prática, motivar o desenvolvimento e implementação destes avanços tecnológicos. Mas, questões como barreiras técnicas, custo de desenvolvimento e produção, rede de distribuição, operação e manutenção, são alguns fatores que podem dificultar a implementação das tecnologias mais eficientes. (HADDAD,2019)

Queirós et al. (2020), a aplicação da lei pode trazer benefícios para outras áreas e setores da sociedade. Um exemplo é o estímulo ao aperfeiçoamento tecnológico para reduzir o consumo de energia em máquinas de lavar roupa, que pode resultar em menor consumo de água. Além disso, o desenvolvimento de lâmpadas fluorescentes compactas pode trazer resultados positivos para a eficiência luminosa e evitar distorções na rede de distribuição de energia, como as harmônicas de corrente elétrica. Estas inovações tecnológicas também podem trazer benefícios para o meio ambiente, como o desenvolvimento de refrigeradores eficientes livres de CFC. Programa semelhante a este se iniciou na China em 1989, com o apoio da Agência Norte Americana de Meio Ambiente (EPA), visando desenvolver um refrigerador que consumisse 45% menos energia e que fosse livre de CFC.

Os recursos financeiros para os investimentos necessários podem vir das próprias empresas privadas, motivadas pela competição em busca de fatias maiores dos mercados interno e externo, ou fazer parte de uma política governamental de estímulo e incentivo ao desenvolvimento tecnológico nacional. (Altoé, et al, 2011).

Além dos aspectos técnicos anteriormente mencionados, tem-se também uma motivação econômica para se atingir os objetivos almejados com a implementação da Lei de Eficiência Energética. Esta questão de ordem econômica está relacionada,

em última análise, as economias de energia decorrentes do emprego de equipamentos mais eficientes e ao custo desta energia. Neste aspecto, em particular, o Brasil presenciou nos últimos meses, o custo da energia atingir valores elevados em função do racionamento energético. Além desta questão particular, mas não menos importante, deve-se analisar para cada nível máximo de consumo específico de energia estabelecido, de determinado equipamento, as reduções na energia gerada e distribuída, com os respectivos custos associados. (Altoé, et al, 2011).

A Lei de Eficiência Energética pode ter seus resultados potencializados na medida que houver uma articulação com outras ações governamentais, como na área econômica (através de linhas de financiamento ou incentivos) ou na área tecnológica apoio à pesquisa, implantação de laboratórios. A comercialização de equipamentos que atendam os níveis máximos de consumo específico de energia pode-se converter em um entrave comercial a entrada de produtos ineficientes energeticamente. Se por um lado esta atitude revela-se correta e adequada pode também ser interpretada pelos outros países como uma barreira comercial aos seus produtos. É necessário obter informações dos organismos internacionais, como a Organização Mundial do Comércio, sobre as interpretações e decisões legais relativas a esta situação. Recomenda-se também uma avaliação sobre as medidas colocadas em prática em outros países com programas semelhantes a este e suas consequências envolvendo o comércio com outros países.

Análise equivalente pode ser realizada quando se trata do comércio interno: as reações dos fabricantes e das respectivas associações de classe, as barreiras encontradas e a forma como foram superadas e as políticas públicas adotadas para colaborar na implantação de programas semelhantes. Estas políticas públicas podem envolver aspectos comerciais, industriais e de desenvolvimento tecnológico, como incentivar as compras de equipamentos eficientes por parte das empresas públicas.

A maioria da população rural brasileira, sem acesso à energia elétrica, sonha em comprar, prioritariamente, uma geladeira, uma televisão e um ferro elétrico. O resultado consta da pesquisa concluída em maio pelo programa Luz no Campo, coordenado pela Eletrobrás, junto a comunidades rurais de 20 estados das regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul do País, mais o Distrito Federal. De acordo com Haddad (2019), os técnicos destacam a importância não apenas do programa de acesso à energia elétrica, mas também de programas regionais

intensos que incentivem o crédito e forneçam informações sobre atividades produtivas. O objetivo do trabalho realizado foi avaliar a evolução econômica e social das propriedades rurais e de seus residentes a partir da disponibilidade de energia elétrica.

2.7 REGULATORIOS DE INCENTIVOS A EFICIENCIA ENERGETICA

Em 1981, o poder público tomou a primeira iniciativa para incentivar o uso de medidas de eficiência energética em nível nacional, por meio da criação do Programa Conserve. O objetivo deste programa era promover a conservação de energia na indústria, desenvolver produtos eficientes e substituir energéticos importados por fontes nacionais. No ano seguinte, em 1982, foi lançado o Programa de Mobilização Energética (PME), o qual consistiu em um conjunto de ações voltadas para incentivar o uso de medidas de conservação de energia e, em especial, substituir derivados de petróleo por fontes renováveis de energia (Altoé, et al, 2011).

Outro importante marco regulatório na área de energias renováveis e de eficiência energética foi a Resolução Aneel n.482/2012. Essa resolução instituiu um sistema de compensação de energia elétrica no Brasil, no qual unidades consumidoras com micro ou mini geração distribuída (potência instalada de até 1 MW), a partir de fonte hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, podem compensar seu consumo de energia. Ao final do mês, realiza-se o balanço de energia elétrica, com base na energia injetada na rede e na energia consumida. Caso a produção de energia seja maior que o consumo, são gerados créditos que podem ser utilizados em até 36 meses (Aneel,2012).

Complementarmente à criação de programas e leis, o lançamento de planos nacionais foi importante medida para apoiar o planejamento e execução de medidas de conservação de energia. Entre os planos mais relevantes estão o Plano Nacional de Energia 2030 (MME, 2007) e o Plano Nacional de Eficiência energética (Altoé, et al,2011)

2.8 PERSPECTIVAS ENERGETICAS

A identificação do Brasil como potência energética e ambiental mundial nos dias de hoje não é um exagero. O país, de fato, é rico em alternativas de produção

das mais variadas fontes. A oferta de matéria-prima e a capacidade de produção em larga escala são exemplos para diversos países. (TOLMASQUIM,2012)

Conforme Tolmasquim (2012), não é exagero identificar o Brasil como uma potência energética e ambiental mundial atualmente. O país possui uma grande variedade de alternativas para produção de energia, sendo rico em matéria-prima e capaz de produzir em larga escala, o que serve de exemplo para muitos outros países.

Descrito por Tolmasquim (2012), o estudo Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2020) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indica um aumento na participação das fontes renováveis na matriz energética do Brasil. Em 2020, essa participação foi de 46,3%, em comparação aos 44,8% registrados de 2010.

Com esses dados confirma-se que o Brasil possui uma potência para se tornar a matriz energética mais limpa do mundo com seus avanços energéticos.

2.9 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência é uma razão de potências de um circuito, dada de acordo com a Equação 1. Quanto mais perto do valor um, melhor é esse parâmetro, pois significa que a energia ativa que gera trabalho está sendo consumida de maneira eficiente. Caso esse valor tenda a zero, indica que a maior parte da energia consumida é reativa. Isto deve ser compensado, pois gera perturbações no sistema elétrico (COPEL®, 2012)

$$FP = \cos(\theta)$$

Equação 1

Sendo o (θ) o ângulo de defasagem entre a potência ativa (kW) e a potência aparente (kVA) no sistema.

Outra área de pesquisa promissora é o desenvolvimento de materiais de mudança de fase (PCM, na sigla em inglês) para armazenamento térmico. PCMs são substâncias que podem armazenar e liberar grandes quantidades de energia térmica durante a transição de fase, como de sólido para líquido. Esses materiais são incorporados em sistemas de refrigeração para melhorar a eficiência energética, permitindo o armazenamento de energia durante os períodos de baixa demanda e

liberando-a quando a demanda é alta. Isso ajuda a suavizar as flutuações na carga do sistema e otimiza o funcionamento dos compressores. (ROSA, 2003)

Além das tecnologias de refrigeração, é essencial considerar também os aspectos relacionados ao isolamento térmico nos túneis de congelamento. Um isolamento térmico eficiente é crucial para minimizar as perdas de calor para o ambiente externo. Materiais isolantes avançados, como espumas de poliuretano de alta densidade e painéis de isolamento a vácuo, estão sendo cada vez mais utilizados para melhorar a eficiência energética em instalações de refrigeração industrial. A aplicação adequada desses materiais contribui não apenas para a redução do consumo de energia, mas também para a manutenção de condições de temperatura estáveis dentro dos túneis de congelamento. (FRANCISCO, 2006)

As práticas operacionais desempenham um papel crucial na eficiência energética dos túneis de congelamento. Estratégias como a otimização da carga do sistema, a implementação de programas de manutenção preventiva e a realização de auditorias energéticas regulares são essenciais para identificar áreas de melhoria e implementar medidas corretivas eficazes. A conscientização e o treinamento dos operadores também são fundamentais para garantir o funcionamento adequado dos sistemas de refrigeração, evitando operações ineficientes que podem levar a um aumento no consumo de energia. As políticas governamentais desempenham um papel significativo na promoção da eficiência energética nos setores industriais. Incentivos fiscais, subsídios para a aquisição de tecnologias eficientes e regulamentações rigorosas podem motivar as empresas a investirem em práticas e equipamentos mais sustentáveis. A conscientização pública sobre a importância da eficiência energética também pode pressionar as empresas a adotarem medidas mais sustentáveis, respondendo assim às demandas dos consumidores por produtos e serviços *eco-friendly*. Neste extenso estudo sobre eficiência energética em túneis de congelamento, foi explorado profundamente diversas facetas, desde os princípios termodinâmicos fundamentais até as tecnologias emergentes e práticas operacionais essenciais. À medida que se mergulhou nesse vasto oceano de conhecimento, várias conclusões se tornam evidentes. (PELISSON, 2009)

A eficiência energética não é apenas uma opção; é uma necessidade imperativa na indústria de túneis de congelamento. Compreendeu-se que a redução do consumo de energia não só impulsiona a economia das empresas a curto prazo, mas também é uma estratégia vital para enfrentar os desafios energéticos globais e

as mudanças climáticas. A busca incessante por sistemas mais eficientes tornou-se uma prioridade, não apenas por razões econômicas, mas também por um compromisso moral com o meio ambiente.

Ao aplicar os princípios termodinâmicos, especialmente os ciclos de refrigeração por compressão de vapor e absorção, conseguimos visualizar como a teoria se traduz em prática. A compreensão das nuances desses ciclos é crucial para projetar sistemas de refrigeração altamente eficientes, aproveitando ao máximo as leis da termodinâmica para otimizar o desempenho (AMARAL, 2013).

Exploramos tecnologias promissoras, como o uso de materiais de mudança de fase, sistemas de controle baseados em inteligência artificial e fontes de energia renovável, que estão transformando os túneis de congelamento em modelos de eficiência energética. Estas inovações representam um futuro em que a refrigeração industrial não é apenas sinônimo de preservação, mas também de sustentabilidade. Não se pode subestimar o papel fundamental das práticas operacionais na eficiência energética. Desde a otimização da carga do sistema até a conscientização e treinamento dos operadores, cada ação conta. A manutenção preventiva, as auditorias energéticas regulares e a adaptação às condições variáveis são a espinha dorsal para garantir que os sistemas operem no seu auge de eficiência. (PELLISSON, 2009)

A conscientização pública e a educação continuada são vitais. É imperativo que os profissionais do setor estejam cientes das últimas tecnologias e melhores práticas. Além disso, conscientizar a sociedade sobre a importância da eficiência energética pode criar uma pressão positiva sobre as empresas para adotarem práticas mais sustentáveis. As regulamentações desempenham um papel significativo em impulsionar a eficiência energética. Incentivos financeiros, subsídios e regulamentações rigorosas podem criar um ambiente propício para a adoção generalizada de tecnologias eficientes. O papel do governo como catalisador da mudança não pode ser subestimado. (AMARAL, 2013).

Nas considerações finais deste estudo aprofundado sobre eficiência energética em túneis de congelamento, fica claro que a jornada rumo à sustentabilidade não é apenas uma opção, mas uma necessidade vital. A convergência de princípios termodinâmicos sólidos, tecnologias inovadoras, práticas operacionais eficazes, conscientização pública e políticas governamentais

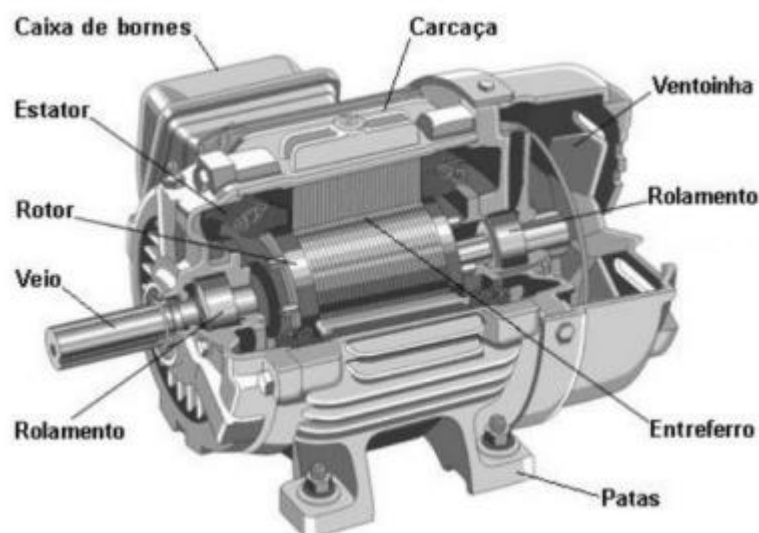
orientadas para o futuro é essencial para transformar a eficiência energética de uma aspiração em uma realidade tangível e duradoura.

Segundo GUEDES (2014), túneis de congelamento tem o potencial de se tornar um líder exemplar na adoção de práticas sustentáveis, mostrando ao mundo que é possível equilibrar a necessidade de preservar alimentos com a responsabilidade de proteger nosso planeta. Com um compromisso coletivo com a excelência, pode se criar um futuro em que a refrigeração industrial não apenas preserva produtos, mas também preserva o meio ambiente para as gerações futuras. Cada passo em direção à eficiência energética é um passo em direção a um mundo mais verde, mais saudável e mais sustentável para todos.

2.10 MOTORES ELÉTRICOS

O motor de indução foi patenteado em 1888 por Nikola Tesla, sendo conceituado como um equipamento de fácil construção e ao mesmo tempo robusto. Como sua construção é simples, a sua comercialização se torna mais barata quando comparado com outros tipos de motores. Cerca de 90% dos motores aplicados na indústria são motores de Indução. (FRANCISCO, 2006, p.12). A Figura 2 mostra um motor de indução trifásico.

Figura 2 - Motor de indução trifásico



Fonte: (Guia de motores elétricos, WEG, 2012).

2.11 INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Descrito por Moro (2014) em muitos equipamentos industriais, é necessário que se obtenha variação de velocidade nos mecanismos que controlam as ações das máquinas e dispositivos. O uso de sistemas mecânicos de variação ou transformação de movimento causa um aumento na manutenção dos sistemas, intervenções de manutenção corretiva e preventiva nesses dispositivos na maioria das vezes demandam tempo de máquina parada e custos elevados de peças e mão-de-obra, assim a necessidade de se criar dispositivos que alterem a velocidade diretamente nos pontos motrizes dos equipamentos foi abordada de forma

sistemática nas últimas décadas e empresas especializadas em tecnologia têm tido enorme evolução no desenvolvimento de tecnologias para esses fins. O fator elétrico diz respeito à frequência elétrica da rede aplicada no motor. Os valores da frequência na rede pública seguem padrões internacionais e no Brasil a frequência normatizada é de 60Hz, em 92 outros países as frequências podem ser de 60Hz ou 50Hz, no Paraguai, por exemplo, a frequência é normatizada em 50Hz. Essa ligação entre a quantidade de polos de um motor elétrico e a frequência aplicada no mesmo define quantas rotações o motor poderá atingir. Um fator está ligado ao outro, portanto se alterarmos a quantidade de polos de um motor ou a sua frequência elétrica pode se obter variação de sua rotação. Para definirmos essa ligação entre a quantidade de polos de um motor e a frequência elétrica, utilizamos uma expressão matemática na qual visualizamos essa dependência e como um fator altera o outro de acordo com a Equação 2.

$$N = \frac{f \times 120}{P}$$

Equação 2

Onde:

N = Rotações por minuto [rpm]

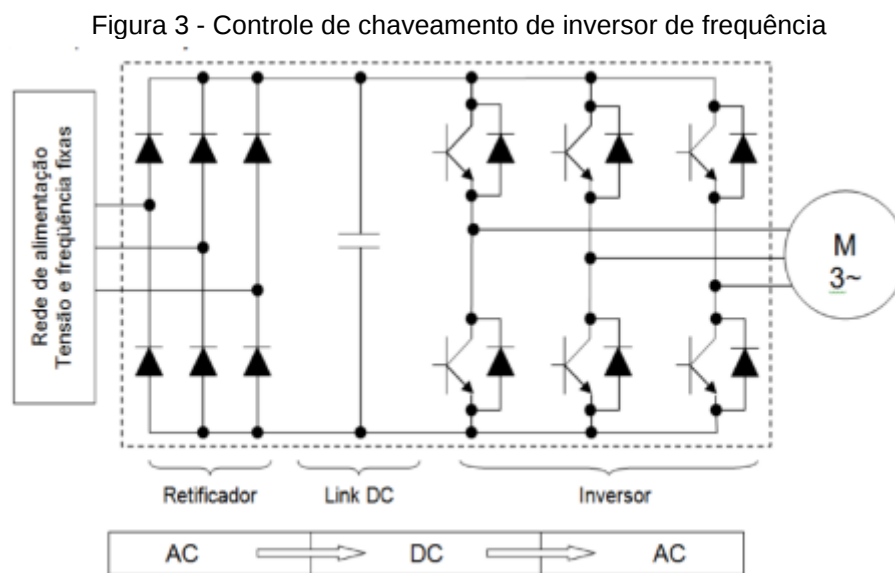
F = Frequência da rede elétrica [Hz]

P=Número de pares de polos do motor

O termo frequência define em quantas vezes por segundo a corrente elétrica troca de polaridade. Ao se referir que um sinal elétrico CA tem uma frequência de 10Hz, entende-se que a corrente elétrica se alterna entre positivo e negativo em 10 ciclos por segundo, isso é o que define a denotação CA “Corrente Alternada”, a unidade Hertz é assim definida em homenagem ao físico alemão Heinrich Rudolf Hertz, que estudou o comportamento desses sinais elétricos e contribuiu no campo da ciência com importantes descobertas sobre o magnetismo.

2.12 CONTROLE DE CHAVEAMENTO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Segundo GUEDES (2014), controle de chaveamento mostra um diagrama esquemático do circuito de um inversor de frequência, sendo uma ponte retificadora na entrada da alimentação, trifásica. A tensão contínua ligada aos terminais de saída pelos os tiristores, que funcionam no corte ou na saturação como uma chave estática. Os transistores trabalham como botão liga ou desliga, de forma que a onda de tensão de saída do conversor de frequência é sempre quadrada, para ter uma tensão de saída mais próxima da senoidal, os transistores é que modula a largura de pulso através de uma técnica chamada PWN, conforme Figura 3.



Controle de chaveamento de inversor de frequência.

Fonte: Moro (2014)

2.13 SOFT-STARTER

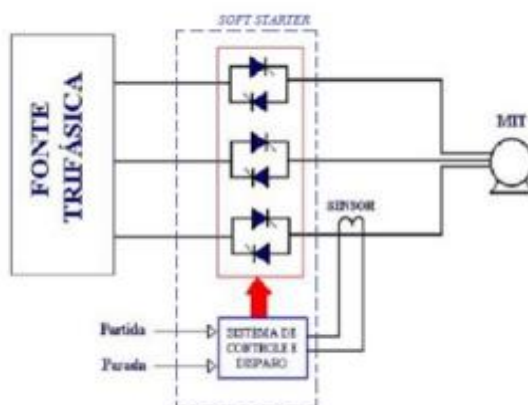
Segundo Lima (2017), A chave estática *Soft-Starter*, no entanto, contribui para que, durante o acionamento, seja delimitada a corrente de pico no motor, tornando-se um método de acionamento e parada suave, evitando trancos, estendendo a vida útil desse motor. Sem comprometer, portanto, a rede de alimentação

Quando em partida direta, os motores de indução trifásicos apresentam elevado nível de corrente indesejável, podendo comprometer, diretamente, a vida útil e o desempenho do motor. No acionamento em Y- Δ , a corrente de partida é reduzida. Porém na sua comutação para Δ , o motor precisa atingir "90% de sua velocidade de

regime para que, durante a comutação, a corrente de pico não atinja valores elevados, próximos, portanto, da corrente de partida com acionamento direto."(SOUZA, 2009). Ou seja, sem a velocidade adequada, a corrente de partida, mesmo na comutação para Δ , também tem afetada a sua vida útil e seu desempenho. O equipamento elétrico Soft-Starter é uma chave de partida eletrônica para motores de indução trifásicos de corrente alternada, destinada ao controle da potência (ROSA, 2003). O equipamento elétrico caracteriza-se por apresentar um conjunto de tiristores e um dispositivo de controle,

A forma representativa dos componentes que compreendem o equipamento Soft-Starter são: tiristores, componentes de 4 camadas semicondutoras p-n-pn, com três conjuntos condutores o ânodo, cátodo e o *gate* (porta de controle da corrente), e um sistema de controle de disparo (ROSA, 2003) e (PELISSON, conforme Figura 4).

Figura 4 - Sistema de controle de disparo



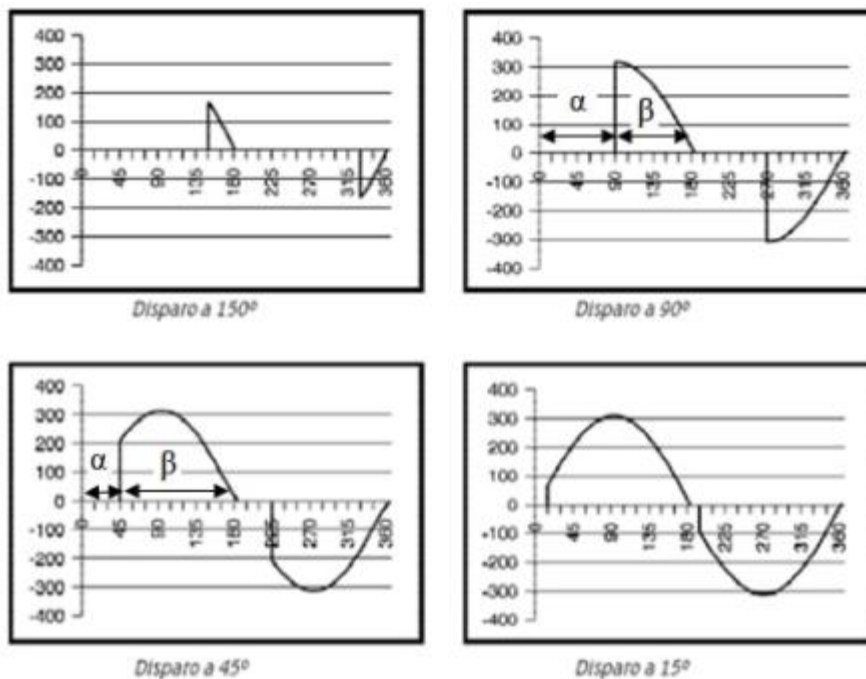
Fonte: (ROSA, 2003)

Conforme se observa na Figura 4 os componentes estáticos - tiristores - controlam a intensidade da corrente e tensão que sai da fonte trifásica e chega ao motor – MIT. Seu acionamento tem relação com o controle do ângulo de disparo. Esse controle é feito de forma harmônica, por meio de um sistema, de modo que, à medida que se altera o ângulo de disparo, a corrente e a tensão variam (ROSA, 2003).

O comportamento da onda de tensão do SCR, relacionando-a aos ângulos de disparos. Ou seja, para um ângulo de 150° , a intensidade da corrente e tensão aplicada no motor é pequena; para um ângulo de disparo a 15° , a intensidade de corrente e tensão aplicada ao motor é grande. A Figura 5 mostra o comportamento

da onda de tensão do SCR. Contudo, a relação do ângulo de disparo, com a intensidade da corrente e tensão, é inversamente proporcional. (AMARAL, 2013).

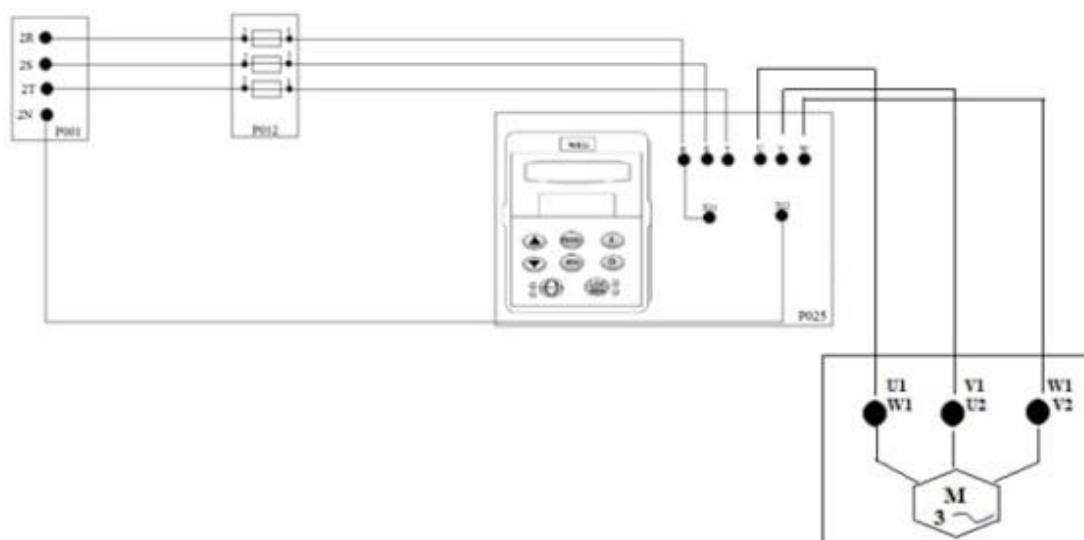
Figura 5 - Comportamento da onda de tensão do SCR



Fonte: (AMARAL, 2013)

De acordo com Amaral (2013) o comportamento da onda do *Soft-Starter* que tem o propósito de suavizar a curva, controlando a quantidade de potência entregue à carga, através do ângulo de disparo. Ou seja, quando se tem uma quantidade de potência entregue ao motor, acontece que o equipamento elétrico *Soft-Starter* controla essa potência para que não ocorra pico de corrente. Então a potência entregue ao motor é realizada de forma gradativa, garantindo o acionamento do motor de forma suave, e, permitindo que a velocidade do motor aumente, gradativamente. A Figura 6 mostra o diagrama de ligação de uma *Soft-Starter*.

Figura 6 - Ligações do equipamento Soft-Starter



Ligações do equipamento Soft-Starter
Fonte: Lima (2017)

3 METODOLOGIA

3.1 LOCAL DO ESTUDO

Cooperativa Agroindustrial Localizada em uma vasta área de 280 mil hectares nas regiões Oeste e Sudoeste do Paraná, a cooperativa tem se destacado na produção de diversas culturas, incluindo feijão, arroz, milho, café, soja, milho e trigo. No decorrer dos anos, ela diversificou suas operações para incluir diferentes focos de produção.

Em 1982, a cooperativa foi pioneira ao introduzir um sistema integrado relacionado a uma das principais áreas de produção. Esse movimento estratégico abriu caminho para o desenvolvimento de outras áreas, contribuindo para a elevação da qualidade da produção.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Para realizar os registros de consumo de energia foi utilizado o analisador de energia EMBRASUL RE7080. A Figura 7, mostra o analisador de energia.

Figura 7 - Analisador de energia EMBRASUL



FONTE:(Autor,2023)

O Analisador de energia RE7080 é um dos mais completos analisadores da linha, sendo uma das melhores opções do mercado nacional em termos de análise de energia. Totalmente integrado ao PRODIST módulo 8, é indicado para medições desde o ponto de acoplamento com a concessionária, até qualquer necessidade de análise interna da estrutura, capturando todos os fenômenos de *power quality* e registrando todas as grandezas elétricas do sistema medido. E com o Grau de proteção IP 65, é ideal para uso exposto às intempéries do tempo.

3.3 METODOLOGIA

Para realizar a análise comparativa, foram selecionados dois túneis de congelamento operados em situações similares e dias iguais semanais, cada um utilizando um método de ventilação específico. O primeiro, utiliza o sistema de ventilação com *soft starter*, o outro utiliza o sistema de ventilação com Inversores de frequência.

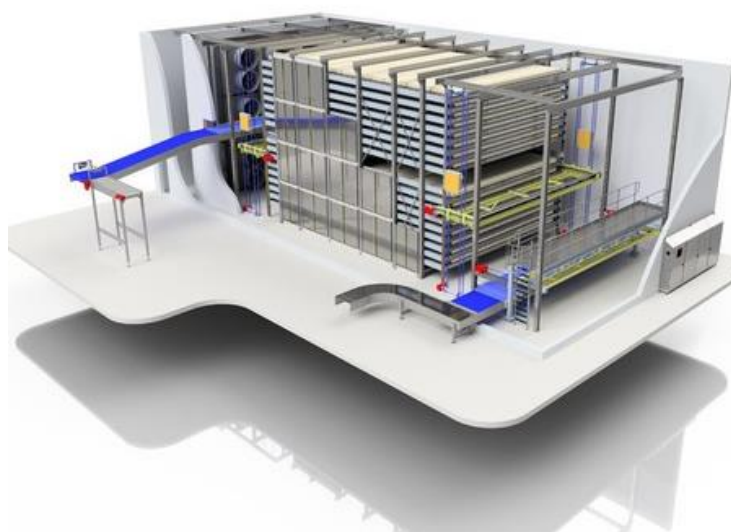
O estudo foi conduzido ao longo de um período de 190 horas, monitorando os túneis durante as 24 horas diárias os quais foram monitorados e registrados os dados de consumo de energia, e outros parâmetros relevantes.

Coletando dados para análise do túnel York, onde se utiliza o sistema de ventilação com *soft starter*.

3.3.1 Túnel de retenção variável – TRV

Esse equipamento congela produtos embalados in natura para importação e exportação. Ele é composto por um sistema de transportadores e alimentadores de entrada, com dosagem de caixas na entrada e saída. A Figura 8 mostra como é a estrutura de um túnel de congelamento.

Figura 8 - Forma estrutural do túnel de congelamento



Fonte: áreas-de-atuação/frigorifico (2023)

3.3.2 Motores dos ventiladores

Nos dois túneis de congelamento estão instalados 21 motores WEG de 11kW – 1175rpm, com a corrente nominal de 25,4A conectados a uma fonte de 380Vac

Porém um utiliza o sistema de ventilação com *soft starter*, enquanto o outro utiliza o sistema de ventilação com Inversores de frequência. A Figura 9 mostra um motor do ventilador do túnel.

Figura 9 - Motor do Ventilador



Ventilador Fonte: (Autor,2023)

A escolha e o dimensionamento adequados dos ventiladores, juntamente com um projeto bem executado do túnel de congelamento, são fundamentais para garantir um processo de congelamento eficiente e econômico em termos de energia. Isso é particularmente vital em setores onde a qualidade e a integridade dos produtos congelados são prioridades.

3.3.3 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

Para realizar a análise comparativa, foram selecionados dois túneis de congelamento operados em mesmas situações e dias iguais semanais, cada um utilizando um método de ventilação específico. O primeiro sistema utiliza o sistema de ventilação com *soft starter*, o outro utiliza o sistema de ventilação com Inversores de frequência.

O estudo foi de 20 dias conduzidos, monitorando os tuneis, durante as 24 horas diárias, os quais foram monitorados e registrados os dados de consumo de energia, e outros parâmetros relevantes.

Coletando dados para análise do túnel York, onde se utiliza o sistema de ventilação com *soft starter*.

A Figura 10 mostrar o grupo de soft-starter modelo: *Compact starter mcd202*.

Figura 10 - Grupo de *Soft-Starter*



Grupo de *Soft-Starter* Fonte: (Autor,2023)

A coleta de dados do túnel York, iniciou no dia 13/09/2023, instalando o analisador, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Coleta de dados túnel York



Fonte: (Autor,2023)

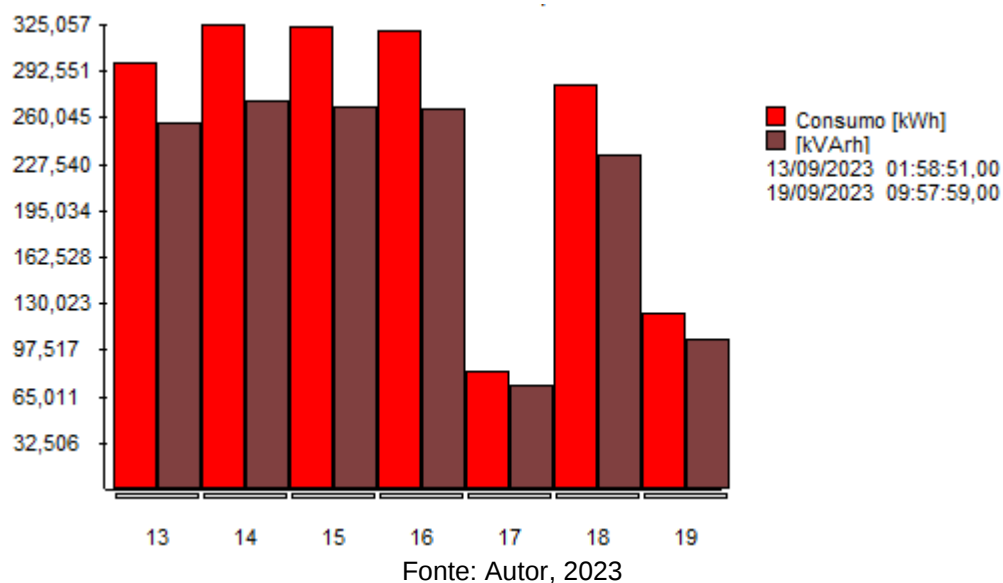
Para se ter uma análise e uma demonstração gráfica do consumo diário, realizou-se a média diária do consumo em kWh e kVAh, conforme Equação 3.

$$Media = \frac{X1+X2+X3+X4}{n}$$

Equação 3

O Gráfico 1 mostra a média do Consumo em kWh do túnel de Congelamento York, esse túnel utiliza a partida com *soft-starter* para seus ventiladores, nos dias 13/09 a 19/09.

Gráfico 1 - Média do consumo diário túnel York



Configuração dos horários de ponta e fora de ponta, para análise foram as seguintes. Conforme

Figura 12.

Figura 12 - Configuração dos horários tarifários

Fora de ponta

INICIO 1 00 : 00 **INICIO 2** 21 : 00

☒ Ativo ☒ Ativo

Ponta

INICIO 1 18 : 00 **INICIO 2** 21 : 00

☒ Ativo ☐ Ativo

Faixa	Início	Final
FORA	00:00	18:00
FORA	21:00	24:00
PONTA	18:00	21:00

Fonte: (Autor,2023)

Consumo diário por horário, dentro e fora de ponta, conforme horários configurados. Na cooperativa é utilizada a comercialização de energia pelo mercado livre, pela comercializadora COMERC, possuindo uma demanda contratada de

17000 kW para horários de ponta, e uma demanda contratada de 20000 kW para horários fora de ponta. Conforme a Figura 13.

Figura 13 - Fatura de energia mercado livre

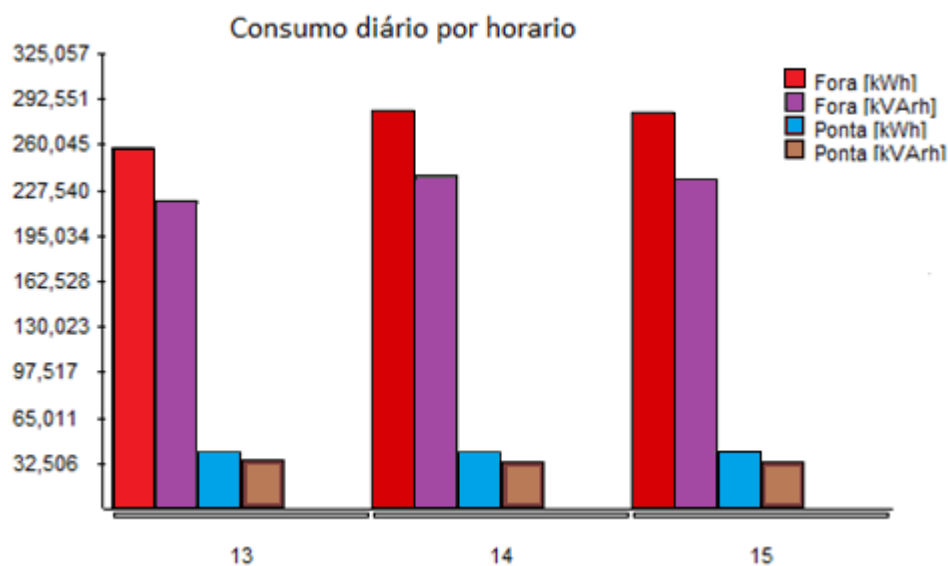
DADOS DA UNIDADE					
■ Classe de Tensão: A2	■ Submercado: S	■ Demanda Contratada Ponta: 17.000 kW			
■ Estrutura Tarifária: Azul	■ Distribuidora: COPEL	■ Demanda Contratada Fora Ponta: 20.000 kW			
BALANÇO ENERGÉTICO					
CONSUMO 12.393,536 MWh	CONSUMO CG 12.765,342 MWh	PROINFA 259,137 MWh	NECESSIDADE 12.506,205 MWh		
CUSTOS MERCADO LIVRE					
COMPOSIÇÃO DE CUSTOS					
ENERGIA (45,7%) R\$ 2.218.166,55	DISTRIBUIÇÃO (38,8%) R\$ 1.879.864,10	ENCARGOS (6,5%) R\$ 314.559,64			
DISTRIBUIDORA				CONTÁBIL	
DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	TARIFA	VALOR	VENDEDOR	MONTANTE
DEMANDA PONTA -	20.294 kW	R\$ 18,68 /kW	R\$ 379.099,39	CURTO PRAZO	
DEMANDA FORA PONTA -	22.243 kW	R\$ 9,75 /kW	R\$ 216.871,20	LONGO PRAZO	
ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA - PONTA	3.294 kW	R\$ 37,36 /kW	R\$ 123.078,78	ENGIE 3	11.622,224
ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA - FORA PONTA	2.243 kW	R\$ 19,50 /kW	R\$ 43.742,40	SUB-TOTAL	12.506,205
TUSD ENERGIA	12.393,536 MWh	R\$ 81,70 /MWh	R\$ 1.012.551,89		
INCIDÊNCIA PIS/COFINS (5,5600 %)			R\$ 104.520,44		
SUB-TOTAL			R\$ 1.879.864,10		
ICMS:			R\$ 0,00		
PIS+COFINS DEVEC:			R\$ 0,00		

Fonte: (Autor,2023)

Conforme fatura os valores em reais, é aplicado uma diferença para horários de ponta e fora de ponta tarifaria, sendo um valor do kWh de R\$0,475 para horários de ponta, e de R\$0,334 kWh para horários fora de ponta.

Dados de consumo diário dos ventiladores dentro e fora de ponta. Dos dias 13/09 a 15/09. Conforme Gráfico 2.

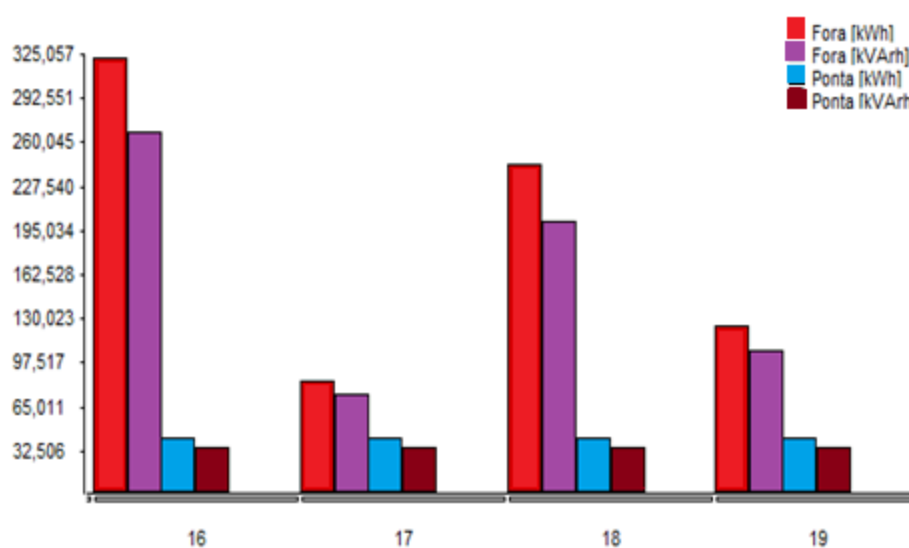
Gráfico 2 – Consumo túnel York do dia 13/09 a 15/09



Fonte: (Autor,2023)

Dados de consumo diário dos ventiladores dentro e fora de ponta. Dos dias 13/09 a 15/09. Conforme Gráfico 3.

Gráfico 3 - Consumo túnel York do dia 16/09 a 19/09



Fonte: (Autor,2023)

A cadeia de inversores de frequência, está localizada na sala de controle do túnel de congelamento, possuindo uma quantidade de 21 inversores, tal forma que cada inversor, seja responsável por cada ventilador. Como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Inversores de frequência



Fonte: (Autor,2023)

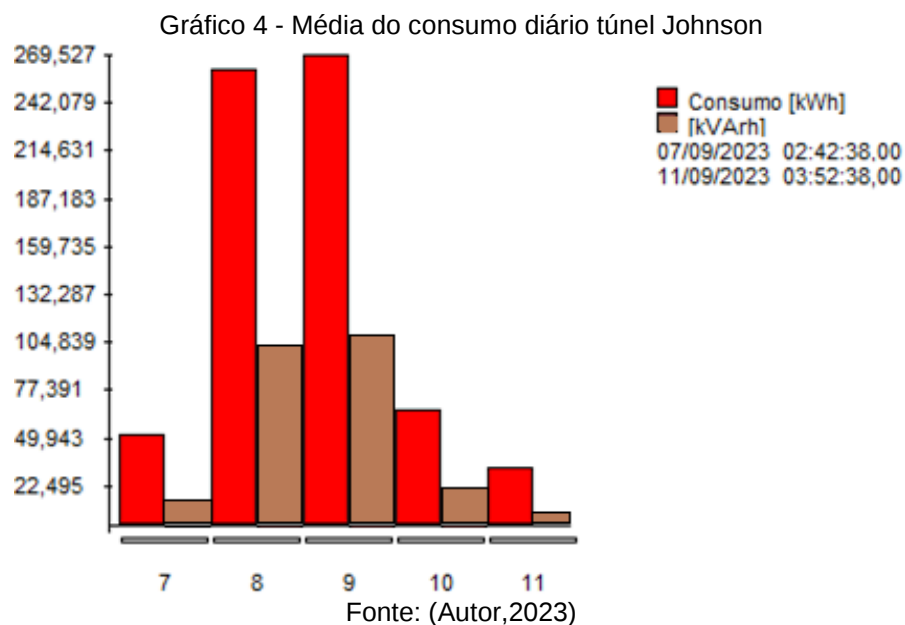
A coleta de dados do túnel Johnson, iniciou no dia 13/09, instalando o analisador. Conforme Figura 15.

Figura 15 - Coleta de dados túnel Johnson

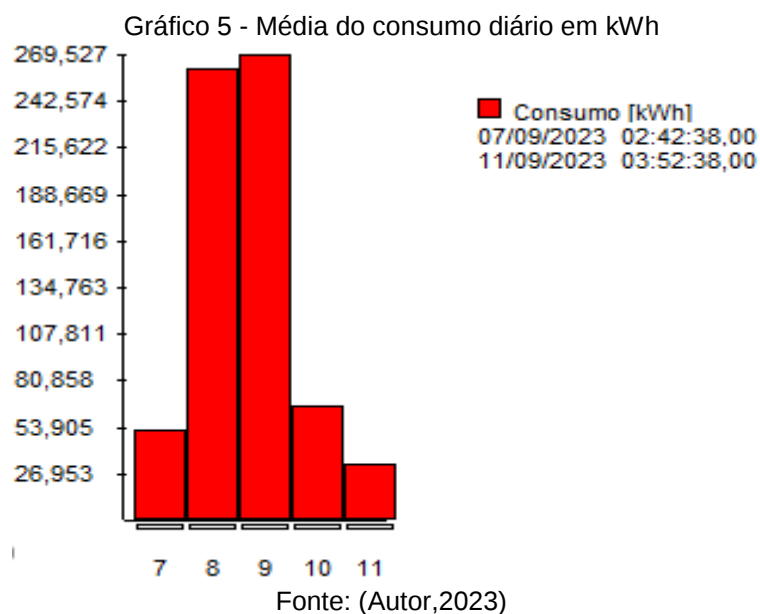


Fonte: (Autor,2023)

A média do Consumo em kWh do túnel de Congelamento Johnson, esse túnel utiliza a medida de inversores para partida dos ventiladores, nos dias 13/09 a 19/09. Conforme Gráfico 4.

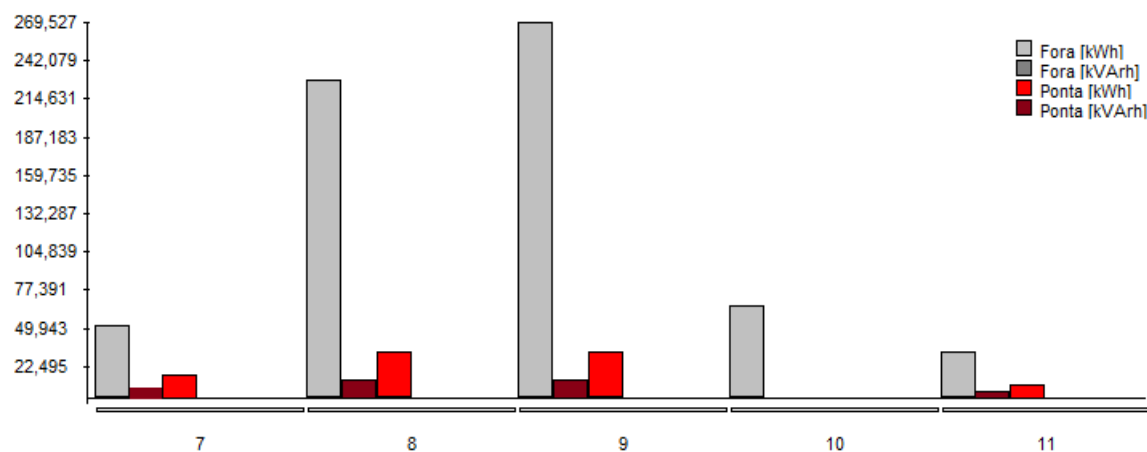


Consumo diário em kWh Túnel de congelamento Johnson dos dias 07/09 a 11/09. Conforme Gráfico 5.



Leva-se em consideração, os horários de ponta e fora de ponta tarifaria, sendo aplicado valores diferentes para uso do kWh. Conforme gráfico 6.

Gráfico 6 – Consumo diário para horários fora de ponta e horários na ponta tarifaria túnel Johnson



Fonte: (Autor,2023)

O sistema de *Soft- Starter*, Conforme gráfico 7.

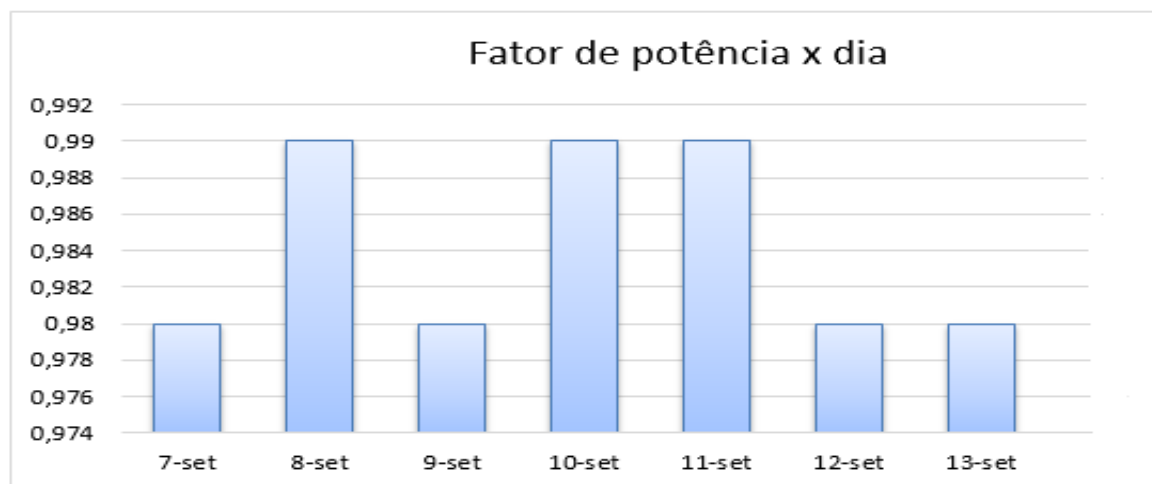
Gráfico 7 - Fator de potência do Sistema A



Fonte: (Autor,2023)

Analisa-se o fator de potência do túnel Johnson, onde está aplicado o sistema de inversores de frequência. Conforme gráfico 8.

Gráfico 8 - Fator de potência do Sistema B



Fonte: (Autor,2023)

Analizando os gráficos dos fatores de potência, entre o sistema que compõe de inversores e o sistema que utiliza *Soft-Starter*, o fator de potência do túnel Johnson, se destaca positivamente em relação ao túnel York, utilizando os inversores de frequência, tem-se um bom fator de potência, trazendo diversos benefícios, incluindo maior eficiência energética, menor desperdício de energia, melhoria na qualidade da energia, redução de custos financeiros. A relação entre o fator de potência e o VAR está diretamente relacionado com um (FP inferior a 0,9) que está associado a um alto consumo de VAR. Em sistemas com fatores de potência baixos, é comum haver uma quantidade substancial de energia reativa, isso ocorre no “sistema A”, onde o reativo está muito elevado, causando um elevado aumento dos custos de energia, sobrecarga de componentes elétricos e redes de distribuição.

Analizando os dados de consumo de energia do sistema A e o sistema B, pode-se afirmar que o sistema B é mais econômico, em relação ao sistema A, além disso, foram realizadas análises de custo-benefício para comparar o investimento inicial, custos operacionais e benefícios ambientais de ambos os sistemas.

A relação entre o fator de potência e o VAR está diretamente relacionado com um (FP inferior a 0,9) que está associado a um alto consumo de VAR. Em sistemas com fatores de potência baixos, é comum haver uma quantidade substancial de energia reativa, isso ocorre com as *Soft-Starter*, onde o reativo está muito elevado, causando um elevado aumento dos custos de energia, sobrecarga de componentes elétricos e redes de distribuição.

4 RESULTADOS E DISCUSSOES

Um valor de R\$ 9000,00 por inversores, o painel elétrico de controle, contém 21 inversores de frequência, modelo Allen Brandley Power Flex 525M é de R\$168.000,00 e R\$10.000,00 de mão de obra.

Para saber o consumo de energia elétrica do túnel Johnson, Aplica-se:

$$\text{Consumo} = \frac{\text{Potencia do equipamento em Watt}}{1000} \times (\text{Tempo de utilização hrs})$$

Conforme a Tabela 1 pode-se analisar, o consumo em kWh no período analisado.

Tabela 1 - Consumo em (kWh) Túnel de congelamento Johnson

Dia semanais	Consumo (kWh)
Quinta-feira 07/09	52,050
Sexta-feira 08/09	261,31
Sábado 09/09	269,62
Domingo 10/09	66,27
Segunda-feira 11/09	32,63
Total	681,88

Fonte: (Autor,2023)

Para calcular a média, de consumo diário do túnel Johnson em kWh foi utilizado a seguinte formula:

$$\text{Média} = \frac{X1 + X2 + X3 + X4}{n}$$

$$\text{Média} = \frac{681,88}{5} = 136,376 \text{ kWh/dia}$$

Calcula-se o consumo mensal:

$$\text{Consumo mensal kWh} = 136,376 \text{ kWh} \times 30 \text{ dias}$$

$$\text{Consumo mensal} = 4091,28 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo mensal} = 4091,28 \text{ kWh} \times 21 \text{ ventiladores}$$

$$\mathbf{85.916,88 \text{ kWh/mês}}$$

Consumo em kWh Túnel de congelamento Johnson, em Horário de ponta conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Consumo em (kWh) Túnel Johnson em horário de ponta

Dia semanais	Consumo (kWh)
Quinta-feira 07/09	6,3
Sexta-feira 08/09	33,55
Sábado 09/09	33,69
Domingo 10/09	0
Segunda-feira 11/09	4,07
Total	43,92

Fonte: (Autor,2023)

A Tabela 3 mostra o consumo de energia fora de ponta.

Tabela 3 - Consumo fora ponta túnel Johnson

Descrição	Valor
Horas de Uso diário	21h 0m
Dias	30d
Total Consumido	3349,08 kWh
Valor kWh informado	R\$ 0,33
Média de valor gasto por dia	R\$ 37,29 por dia
Média de kWh gasto por dia	111,64kWh por dia
Valor a pagar	R\$ 1.118,59

Fonte: (Autor,2023)

A Tabela 4 mostra o consumo de energia elétrica dos ventiladores do túnel Johnson.

Tabela 4 - Consumo de Energia Elétrica de um Ventilador Túnel Johnson

Descrição	Valor
Horas de Uso diário	3h 0m
Dias	30d
Total Consumido	32,94 kWh
Valor kWh informado	R\$ 0,45
Média de valor gasto por dia	R\$ 0,49 por dia
Média de kWh gasto por dia	1,10kWh por dia
Valor a pagar	R\$ 14,72

Fonte: (Autor,2023)

Consumo do túnel de Congelamento York em kWh. Conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Consumo em (kWh) Túnel de congelamento York

Dia	Consumo (kWh)
Quinta-feira 14/09	325,05
Sexta-feira 15/09	324,06
Sábado 16/09	320,82
Domingo 17/09	82,56
Segunda-feira 18/09	282,42
Total	1334,91

Fonte: (Autor,2023)

Consumo do ventilador na ponta tarifaria do túnel York. Conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Consumo túnel York horário de ponta

Dia	Consumo (kWh)
Quinta-feira 14/09	40,67
Sexta-feira 15/09	40,40
Sábado 16/09	40,16
Domingo 17/09	40,21
Segunda-feira 18/09	40,14
Total	201,58

Fonte: (Autor,2023)

Consumo do ventilador fora de ponta tarifaria do túnel York. Conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Consumo túnel York fora ponta

Dia	Consumo (kWh)
Quinta-feira 14/09	284,38
Sexta-feira 15/09	283,65
Sábado 16/09	280,66
Domingo 17/09	42,35
Segunda-feira 18/09	242,28
Total	1.133,32

Fonte: (Autor,2023)

Em horário fora de ponta tem-se o seguinte consumo. Conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Consumo de Energia Elétrica de um Ventilador Túnel York

Descrição	Valor
Horas de Uso diário	21h 0m
Dias	30d
Total Consumido	5949,72 kWh
Valor kWh informado	R\$ 0,34
Média de valor gasto por dia	R\$ 67,43 por dia
Média de kWh gasto por dia	198,32kWh por dia
Valor a pagar	R\$ 2.022,90

Fonte: (Autor,2023)

Tabela 9 - Consumo de Energia Elétrica de um Ventilador Túnel York para horário de ponta

Descrição	Valor
Horas de Uso diário	3h 0m
Dias	30d
Total Consumido	151,11 kWh
Valor kWh informado	R\$ 0,45
Média de valor gasto por dia	R\$ 2,27 por dia
Média de kWh gasto por dia	5,04kWh por dia
Valor a pagar	R\$ 68,03

Fonte: (Autor,2023)

Para calcular a média, de consumo diário do túnel York em kWh foi utilizado a seguinte formula:

$$Média = \frac{X1 + X2 + X3 + X4}{n}$$

$$Média = \frac{1334,91}{5} = 266,98 \text{ kWh/dia}$$

$$\text{Consumo diario kWh} = 266,98 \text{ kWh} \times 30 \text{ dias}$$

$$\text{Consumo mensal} = 8009,46 \text{ kWh}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo mensal} &= 8009,46 \text{ kWh} \times 21 \text{ ventiladores} \\ &= \mathbf{168.198,66 \text{ kWh/mês}} \end{aligned}$$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eficiência energética em túneis de congelamento representa uma área de pesquisa e prática em constante evolução. No decorrer deste estudo, onde as tecnologias e inovações que podem ser empregadas para otimizar o consumo de energia nesses ambientes críticos. Em meio a uma crescente conscientização sobre as mudanças e a necessidade urgente de adotar práticas sustentáveis, a eficiência energética emergiu como uma prioridade crucial para a empresa com alto consumo energético.

Esta análise revelou que a eficiência energética não é apenas uma questão ambiental, mas também tem implicações econômicas significativas. Reduziu o consumo de energia nos túneis de congelamento, diminui os custos operacionais a curto prazo, assim também aumenta a competitividade da empresa. Com a economia global se movendo em direção a uma mentalidade de escalonamento de produção e diminuição de gastos, assim atraindo consumidores preocupados com a sustentabilidade e a eficiência energética, com menores custos de seus produtos.

Túneis de congelamento são conhecidos por seu alto consumo de energia. Reduzir esse consumo não apenas resulta em economia financeira, mas também contribui para uma considerável redução nas emissões de gases de efeito estufa. Em um mundo onde as mudanças climáticas estão se acelerando, essa redução é mais valiosa do que nunca. Cada quilowatt-hora economizado não é apenas dinheiro no bolso da empresa, mas também um passo em direção a um planeta mais saudável e sustentável.

Uma descoberta significativa durante este estudo foi a importância da conscientização a racionalização da energia, existem desafios para a implementação da eficiência energética em túneis de congelamento.

Para túneis de congelamento, é essencial olhar para além das soluções técnicas. A colaboração entre governo, indústria e organizações de pesquisa é fundamental. Além disso, a pesquisa contínua e o desenvolvimento de tecnologias acessíveis devem ser uma prioridade. O compartilhamento de melhores práticas e casos de sucesso também deve ser incentivado para que as empresas possam aprender umas com as outras.

Finalmente, após a análise dos dados levantados em campo, e com base nos cálculos obtidos, entende-se que a utilização dos inversores, é mais econômico que

o sistema que utiliza as *soft-starter*, onde se utiliza as *soft-starter* para partida dos ventiladores, consumindo uma diferença de 82.281,78 kWh/ mês, os ventiladores do túnel Johnson não trabalham na sua capacidade total ao contrário do túnel York, onde os mesmo trabalham na sua capacidade máxima, considerando a energia contratada do mercado livre tratando os dados de consumo dentro e fora de ponta tarifaria, tem se um gasto mensal de consumo para o túnel Johnson de **R\$ 23.799,51** e para o túnel York **R\$ 43.909,53** uma economia mensal de **R\$ 20.110,02**, considerando o valor do inversores seja de **R\$ 9.000** a unidade, aplica-se um valor médio para um possível atualização e substituição dos inversores de **R\$ 178.000.00** obtendo o retorno do investimento em até 11 meses, possuindo uma margem de erro de 2%.

O trabalho não encerra o assunto em si mesmo, pelo contrário, entende-se que o este assunto é muito rico e passível, pois trata de aspectos que dizem respeito a eficiência energética, racionalização operacional e impacto financeiro, um modelo de negócio considerado.

REFERÊNCIAS

BARBIN, Douglas Fernandes; NEVES FILHO, Lincoln Camargo; SILVEIRA JUNIOR, Vivaldo. **Processo de Congelamento em Túnel Portátil com Convecção Forçada por Exaustão e Insuflação para Paletes**. Scielo, São Paulo, n. 03, jul. 2009.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2013. 1018 p.

D'AMICO, M. E. et al. **The role of natural ventilation in the energy efficiency of a frozen food warehouse**. Energy and Buildings, v. 158, p. 518-528, 2018.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos Elétricos**. 5.ed. São Paulo-SP: Érica, 2014.

GU, B. et al. **Effects of green building certification on energy efficiency and environmental sustainability: A case study in China**. Journal of Cleaner Production, v. 272, p. 1-12, 2020.

KIM, J. et al. **Optimization of energy-efficient air distribution in a frozen food storage tunnel using computational fluid dynamics**. Energy, v. 200, 2020.

LAI, S. K. et al. **Measuring energy efficiency in China: A meta-frontier non-radial approach**. Applied Energy, v. 251, p. 1-10, 2019.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 8.ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2013.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009.

NASCIMENTO, G. **Comandos Elétricos Teoria e Atividades**. São Paulo-SP: Érica, 2011.

SILVA, Gesué Graciliano da. **Introdução à Tecnologia da Refrigeração e da Climatização**. 2. ed. São José: Artliber, 2004.

TORO, Vincent del. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1990.

VIANA, A. N., BORTONI, E. D., NOGUEIRA, F. J., HADDAD, J., NOGUEIRA, L. A., VENTURINI, O. J., & YAMACHITA, R. **Eficiência energética: fundamentos e aplicações. Campinas (SP): elektro; universidade federal de Itajubá; excen; fupai, 2002.**

WEG Automação. **Guia de Aplicação de Inversores de Frequência. WEG.** Disponível em: www.weg.com.br. 3ª Edição, 2005.