

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EDUARDO CARVALHO NASCIMENTO DE OLIVEIRA

Estudo de caso de eficiência energética em indústria alimentícia

Uberlândia

2025

EDUARDO CARVALHO NASCIMENTO DE OLIVEIRA

Estudo de caso de eficiência energética em indústria alimentícia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eficiência Energética

Orientador: Prof. Dr. Augusto Wohlgemuth
Fleury Veloso da Silveira

Uberlândia

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48 2025	Oliveira, Eduardo Carvalho Nascimento de, 2000- Estudo de caso de eficiência energética em indústria alimentícia [recurso eletrônico] / Eduardo Carvalho Nascimento de Oliveira. - 2025. Orientador: Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. Inclui ilustrações. 1. Engenharia elétrica. I. Silveira, Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da, 1981-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título. CDU: 621.3
-------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

EDUARDO CARVALHO NASCIMENTO DE OLIVEIRA

Estudo de caso de eficiência energética em indústria alimentícia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eficiência Energética

Uberlândia, 08 de julho de 2025.

Banca Examinadora:

Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira – Doutor (UFU)

Luciano Coutinho Gomes – Doutor (UFU)

Carlos Eduardo Tavares – Doutor (UFU)

Dedico este trabalho aos meus pais, Marcos e Samantha, pelo apoio, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família pelo apoio e incentivo nesta jornada acadêmica. Aos meus pais, Marcos e Samantha, aos meus avós, Hilda, Ademir e Hermínia, aos meus tios, Milene, Júnior e Ebert, aos meus padrinhos, Marcilene e Bruno, e à minha companheira, Luiza;

Agradeço ao Prof. Dr. Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira, pelo apoio e orientação ao longo deste trabalho;

Agradeço aos colegas petianos pelo convívio no Programa de Educação Tutorial;

Agradeço aos colegas juniores pelo convívio na Empresa Júnior, CONSELT;

Agradeço aos colegas de estágio e trabalho pelo apoio e incentivo;

Agradeço aos colegas da Turma 95 pela união e companheirismo;

Agradeço aos colegas do Fliperama pela união e companheirismo;

Agradeço aos amigos Felipe César e Antonio Augusto pela união e companheirismo;

“Sem sacrificio não há vitória.”
(Optimus Prime, 2007)

RESUMO

A eficiência energética tem se consolidado como um dos pilares centrais para o desenvolvimento sustentável da indústria, em especial no setor alimentício, cuja demanda energética é significativa devido aos processos intensivos em frio, ventilação, compressão e movimentação de cargas. Nesse contexto, práticas que visam o uso racional da energia elétrica ganham protagonismo, tanto por seus benefícios ambientais quanto pelos impactos econômicos favoráveis que proporcionam. A adoção de medidas voltadas à eficiência não apenas reduz o desperdício energético, como também colabora diretamente com as metas corporativas relacionadas à sustentabilidade, competitividade e inovação. O presente trabalho se insere nesse cenário, propondo uma análise aplicada da operação de motores elétricos em sistemas de ventilação de uma planta frigorífica, com ênfase nos túneis de congelamento. A proposta visa identificar oportunidades de melhoria por meio de ajustes técnicos e operacionais em componentes já existentes, sem a necessidade imediata de grandes investimentos em novos equipamentos. A estratégia envolve o estudo do comportamento dos motores frente às demandas do sistema, avaliando sua conformidade com o dimensionamento, eficiência de operação e influência no processo térmico da planta. Para fundamentar a proposta, foi realizada uma investigação teórica sobre os principais conceitos ligados à eficiência energética, incluindo perdas elétricas em motores, curvas de rendimento, carga ideal de operação e impacto de alterações mecânicas no desempenho dos equipamentos. A metodologia adotada considerou medições em campo, análise de dados operacionais, simulações técnicas e projeções de consumo energético, utilizando ferramentas apropriadas para estimar os impactos potenciais das modificações propostas. Por fim, a iniciativa contribui para o fortalecimento de estratégias corporativas voltadas à otimização de recursos, redução de custos operacionais e mitigação de impactos ambientais. A análise apresentada neste trabalho busca oferecer subsídios técnicos para decisões mais conscientes e assertivas no uso da energia elétrica, promovendo uma abordagem moderna e alinhada aos desafios atuais da indústria. Ao enfatizar a relação entre engenharia aplicada, sustentabilidade e competitividade, o estudo reafirma a relevância da eficiência energética como ferramenta indispensável para o aprimoramento dos processos produtivos, demonstrando que intervenções bem planejadas podem gerar impactos significativos em diversos níveis da organização.

Palavras-chave: eficiência energética; indústria; motores; túneis de congelamento; ventilação.

ABSTRACT

Energy efficiency has been established as one of the central pillars for the sustainable development of industry, especially in the food sector, whose energy demand is significant due to intensive processes in cold, ventilation, compression and cargo handling. In this context, practices that aim at the rational use of electric energy gain prominence, both for their environmental benefits and for the favorable economic impacts they provide. The adoption of measures aimed at efficiency not only reduces energy waste, but also collaborates directly with corporate goals related to sustainability, competitiveness and innovation. The present work is part of this scenario, proposing an applied analysis of the operation of electric motors in ventilation systems of a refrigeration plant, with emphasis on freezing tunnels. The proposal aims to identify opportunities for improvement through technical and operational adjustments in existing components, without the need for immediate large investments in new equipment. The strategy involves the study of the behavior of the motors in front of the demands of the system, evaluating its conformity with the dimensioning, efficiency of operation and influence on the thermal process of the plant. To support the proposal, a theoretical investigation was carried out on the main concepts related to energy efficiency, including electrical losses in engines, yield curves, optimal operating load and impact of mechanical changes in equipment performance. The strategy involves the study of the behavior of the motors in front of the demands of the system, evaluating its conformity with the dimensioning, efficiency of operation and influence on the thermal process of the plant. To support the proposal, a theoretical investigation was carried out on the main concepts related to energy efficiency, including electrical losses in engines, yield curves, optimal operating load and impact of mechanical changes in equipment performance. The methodology adopted considered field measurements, operational data analysis, technical simulations and energy consumption projections, using appropriate tools to estimate the potential impacts of proposed modifications. Finally, the initiative contributes to the strengthening of corporate strategies aimed at optimizing resources, reducing operating costs and mitigating environmental impacts. The analysis presented in this work seeks to offer technical subsidies for more conscious and assertive decisions in the use of electric energy, promoting a modern approach and aligned with current challenges of the industry. By emphasizing the relationship between applied engineering, sustainability and competitiveness, the study reaffirms the relevance of energy efficiency as an indispensable tool for improving production processes, demonstrating that well-planned interventions can generate significant impacts at various levels of the organization.

Keywords: energy efficiency; industry; engines; freezing tunnels; ventilation.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Energética Mundial 2022.	18
Figura 2 – Matriz Energética Brasileira 2023.	19
Figura 3 – Matriz Elétrica Mundial 2022.	19
Figura 4 – Matriz Elétrica Brasileira 2023.	20
Figura 5 – Modelo de etiquetagem, PBE.	22
Figura 6 – Modelo de selo PROCEL.	23
Figura 7 – Modelo de selo CONPET.	24
Figura 8 – Curva de rendimento do motor WEG, 25cv.	26
Figura 9 – Soft-Starter.	27
Figura 10 – Ciclo teórico de refrigeração por compressor de vapor.	29
Figura 11 – Esquema do sistema de refrigeração com os equipamentos.	30
Figura 12 – TCA, sistema de ventilação.	33
Figura 13 – PDCA.	34
Figura 14 – Painel de ritmo.	35
Figura 15 – Fluxograma.	35
Figura 16 – Eficiência de ventilação.	36
Figura 17 – Temperatura média de congelamento.	37
Figura 18 – Temperatura média de congelamento do TCA 2 AVES.	37
Figura 19 – Peito Pacote 20kg.	38
Figura 20 – Datalogger de temperatura.	38
Figura 21 – Registro de temperatura do datalogger e do produto.	39
Figura 22 – Medição da velocidade.	39
Figura 23 – Placa do motor.	40
Figura 24 – Hélice de alumínio – 60kg.	40
Figura 25 – Software Smart32.	41
Figura 26 – Software WebEnergy.	42
Figura 27 – Consumo de energia no processo de ventilação do TCA.	42
Figura 28 – Consumo de energia da SLM que alimenta o TCA.	42
Figura 29 – Consumo de energia de toda a indústria.	43
Figura 30 – Curva de rendimento do motor.	44
Figura 31 – Hélices de polímero PAG – 14kg.	45
Figura 32 – Registro de temperatura do datalogger e do produto.	47
Figura 33 – Consumo de energia no processo de ventilação do TCA.	48
Figura 34 – Consumo de energia da SLM que alimenta o TCA.	48
Figura 35 – Consumo de energia de toda a indústria.	49
Figura 36 – Curva de rendimento do motor.	50
Figura 37 – Rampa de partida na soft-starter em 15 segundos.	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Análise da vazão de ar proporcionado pela hélice e carga do motor.....	39
Tabela 2 – Consumo Monitorado x Consumo Teórico.	45
Tabela 3 – Antes e depois do gráfico da figura 24.	47
Tabela 4 – Antes e depois da velocidade e corrente do motor.	47
Tabela 5 – Consumo Monitorado x Consumo Teórico.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEA - Agência Internacional de Energia

U4E - União pela Eficiência Energética

ACEEE - American Council for na Energy-Efficient Economy

PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem

MNE - Ministérios de Minas e Energia

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

CONPET - Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural

PEE - Programa de Eficiência Energética

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

ABNT - Associação Brasileira de Normas e Técnicas

NBR - Norma Brasileira

NR - Norma Regulamentadora

UFU - Universidade Federal de Uberlândia

MG - Minas Gerais

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

EPIs - Equipamentos de Proteção Individual

SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

NH₃ - amônia

TCA - Túnel de Congelamento Automático

PDCA - *Plan, Do, Check e Act*

RIISPOA - Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária dos Produtos de Origem Animal

MAPA - Ministério da Agricultura e Pecuária

SLM - Sala de Máquinas

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	19
ÍNDICE DE TABELAS	20
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	21
1 INTRODUÇÃO	14
2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	16
2.1 CONCEITOS.....	16
2.2 CONSERVAÇÃO	17
2.3 MATRIZ ELÉTRICA E MATRIZ ENERGÉTICA.....	17
2.4 PRINCÍPIOS DA EFICIÊNCIA.....	20
2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL	21
2.6 MOTORES ELÉTRICOS	24
2.7 REFRIGERAÇÃO	28
2.7.1 PROCESSOS TERMODINÂMICOS	28
2.7.2 AMÔNIA E SEGURANÇA.....	31
2.7.3 TÚNEIS DE CONGELAMENTO	32
3 ESTUDO DE CASO.....	34
3.1 METODOLOGIA	34
3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS.....	36
3.2.1 CONSUMO ANTES.....	41
3.2.2 CONSUMO MONITORADO	41
3.2.3 CONSUMO TEÓRICO	43
3.3 TESTES E SOLUÇÕES	45
3.3.1 CONSUMO DEPOIS	48
3.3.2 CONSUMO MONITORADO	48
3.3.3 CONSUMO TEÓRICO	49
4 ANÁLISE ECONÔMICA	51
4.1 ECONOMIA EM ENERGIA	51
4.2 ECONOMIA FINANCEIRA	53
5 RESULTADOS.....	54
5.1 OPORTUNIDADES FUTURAS.....	57
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

Eficiência energética significa produzir mais energia com a mesma quantidade de recursos naturais, ou reduzir o consumo, mantendo o desempenho suficiente para as atividades cotidianas [01]. Em outras palavras, pode-se dizer que é fazer mais com menos energia, onde é necessário utilizar a menor quantidade possível de energia para realizar uma tarefa ou obter um serviço, sem comprometer o desempenho ou a qualidade do resultado.

A eficiência de sistemas, edificações, processos e equipamentos é essencial, uma vez que representa reduções no consumo energético e, assim, de custos a longo prazo, menores investimentos em produção de energia e, resultando, também, em menores impactos ambientais [02]. Eficiência energética tem tudo a ver com sustentabilidade, pois trata-se da utilização dos recursos de forma consciente para atender a necessidades presentes, sem afetar o sustento das gerações futuras [01].

Existem diversas situações que podem ilustrar a eficiência energética na prática, seja no âmbito residencial:

- I. Fazer o uso da luz natural;
- II. Utilizar de lâmpadas de LED;
- III. Tomar banhos curtos;
- IV. Utilizar placas de energia solares.

Ou industrial:

- I. Realizar manutenções preventivas;
- II. Investir em máquinas eficientes;
- III. Aderir projetos com o foco em eficiência energética;
- IV. Aderir a geração distribuída de energia.

O setor industrial é o maior consumidor de energia no Brasil, representando por aproximadamente 40% do consumo total. Assim, a indústria utiliza grandes quantidades de eletricidade para alimentar seus processos produtivos, o que gera um impacto significativo, tanto nos custos operacionais quanto no meio ambiente [03].

Algumas indústrias como, por exemplo, a siderúrgica, a petroquímica, a de papel e celulose, a de cimento são bastantes intensivas em energia [03]. Por outro lado, empresas com diferentes processos também necessitam de seu uso com diferentes focos e objetivos. O ramo alimentício é outro modelo, utiliza-se ao longo de toda uma cadeia produtiva, sendo, a parte

frigorífica, um exemplar clássico, apresentando um elevado consumo de energia elétrica, principalmente devido à utilização de motores, ar comprimido e, sobretudo, refrigeração. Apenas o processo de refrigeração é responsável por cerca de 81% do consumo elétrico de um frigorífico [04].

Os frigoríficos são essenciais para garantir a oferta de proteína animal à sociedade. Dessa maneira, identificar e gerenciar os ofensores do consumo de energia dos frigoríficos é fundamental para melhorar a eficiência energética e reduzir os custos operacionais nos frigoríficos. Com isso, é de suma importância a execução de boas práticas, por exemplo:

- I. Adequar a temperatura de ambientes;
- II. Controlar automaticamente a temperatura, evitando desperdício;
- III. Realizar o isolamento térmico e proteção solar corretamente, evitando perdas térmicas;
- IV. Armazenar corretamente os produtos;
- V. Manter o sistema de ventilação em bom estado.

Desse modo, o foco deste trabalho será a análise da eficiência de um sistema de ventilação e estudo de caso com informações de um projeto executado em uma planta alimentícia na cidade de Uberlândia/MG. O objetivo é observar as oportunidades levantadas e, conseqüentemente, buscar uma redução no consumo de energia no processo fabril.

O processo será feito através de testes e hipóteses iniciais, buscando trocar algumas hélices dos ventiladores de um túnel de congelamento, melhorando o fluxo e a capacidade de ventilação do mesmo e, possibilitando, o desligamento de máquinas e operações. Após a validação dos testes realizados, será implementada a melhoria por completo, além de calcular o potencial de energia a ser economizado e, por sua vez, realizar a análise do montante financeiro a ser economizado pela empresa e, também, será demonstrado o tempo de retorno para o investimento feito.

Vale ressaltar que os estudos referentes à túneis de congelamento vêm sendo disseminados ao longo dos anos, buscando as mais variadas estratégias que têm como objetivo uma melhora e evolução para com o tema de eficiência energética. O estudo realizado na cidade de Pato Branco/PR melhorou o volume de abastecimento de produtos em caixas de papelão unidas por grampos a serem congeladas [34]. Em Erechim/RS, analisou-se a oportunidade de alteração do método de abastecimento de horizontal para vertical, além de uma seleção mais adequada para determinadas embalagens [35]. Em Alegrete/RS, foi feito um estudo detalhado

sobre a possibilidade de redução de energia através de uma ventilação variável em túneis de congelamento [36].

Ao fim, é esperado que, com o presente estudo, possa ser validado as oportunidades levantadas, com bons resultados na redução do consumo de energia e, principalmente, no âmbito financeiro. Além disso, próximos passos para estudos e ocasiões futuras na companhia.

2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Inicialmente, faz-se preciso uma introdução e abordagem teórica em alguns conceitos e fundamentos, relacionados com a energia e sua conservação. Dessa maneira, para o seguinte tópico, serão retratados os principais recursos energéticos no Brasil e no mundo, além de seus benefícios, bem como economia e sustentabilidade.

2.1 CONCEITOS

Apesar de ser utilizada em vários contextos diferentes, o uso científico da palavra ‘energia’ tem um significado bem definido e preciso: potencial inato para executar trabalho ou realizar uma ação. Qualquer coisa que esteja trabalhando, movendo outro objeto ou aquecendo-o, por exemplo, está gastando (transferindo) energia [05].

Desde os primórdios da humanidade, a busca por fontes de energia tem sido essencial para a sobrevivência e o desenvolvimento das sociedades. Inicialmente, os seres humanos utilizavam a energia contida nos alimentos para realizar suas atividades diárias. Com o tempo, passaram a dominar o fogo, utilizando-o para aquecimento e preparo de alimentos.

Na Antiguidade, civilizações começaram a aproveitar a energia hidráulica e eólica para irrigação e moagem de grãos. Durante a Idade Média, moinhos de vento e de água tornaram-se comuns na Europa, representando um avanço significativo na utilização de fontes renováveis de energia [06].

A Revolução Industrial, no século XVIII, marcou uma transformação profunda no uso da energia, com a introdução do carvão como principal fonte energética para alimentar máquinas a vapor. Posteriormente, no século XIX, a eletricidade começou a ser explorada, revolucionando os meios de produção e o cotidiano das pessoas [07].

No século XX, o petróleo e o gás natural tornaram-se as principais fontes de energia, impulsionando o crescimento econômico e tecnológico. Todavia, os impactos ambientais decorrentes do uso intensivo de combustíveis fósseis levaram a uma crescente preocupação com o meio ambiente.

Atualmente, no século XXI, há um movimento com foco na adoção de fontes renováveis, como solar e eólica, e na melhoria da eficiência energética, visando a redução das emissões de gases de efeito estufa, a mitigação das mudanças climáticas e, também, oportunidades, cujo objetivo é a redução de custos, buscando uma visão econômica e financeira.

2.2 CONSERVAÇÃO

A primeira Lei da Termodinâmica, é uma consequência direta do princípio de conservação da energia. De acordo com esse princípio, a energia total de um sistema sempre se mantém constante, já que ela não é perdida, mas sim, transformada [08].

Dessa forma, pode-se definir eficiência energética (η), uma grandeza que representa a razão entre a energia que foi útil para gerar trabalho e a energia total consumida em um sistema [09], assim como pode-se observar na equação 01.

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{total}}} = 1 - \frac{E_{\text{perdas}}}{E_{\text{total}}} \quad (01)$$

Quando são tomadas medidas para aumentar a eficiência energética de um sistema, o objetivo é tornar a parcela de energia útil cada vez mais próxima da energia total consumida [09]. Todavia, atingir os 100% não é possível, pois, a segunda Lei da Termodinâmica (entropia), é afirmado que, nem toda a energia disponível pode ser convertida em trabalho útil, devido a parte dela se dissipa na forma de calor. [10]

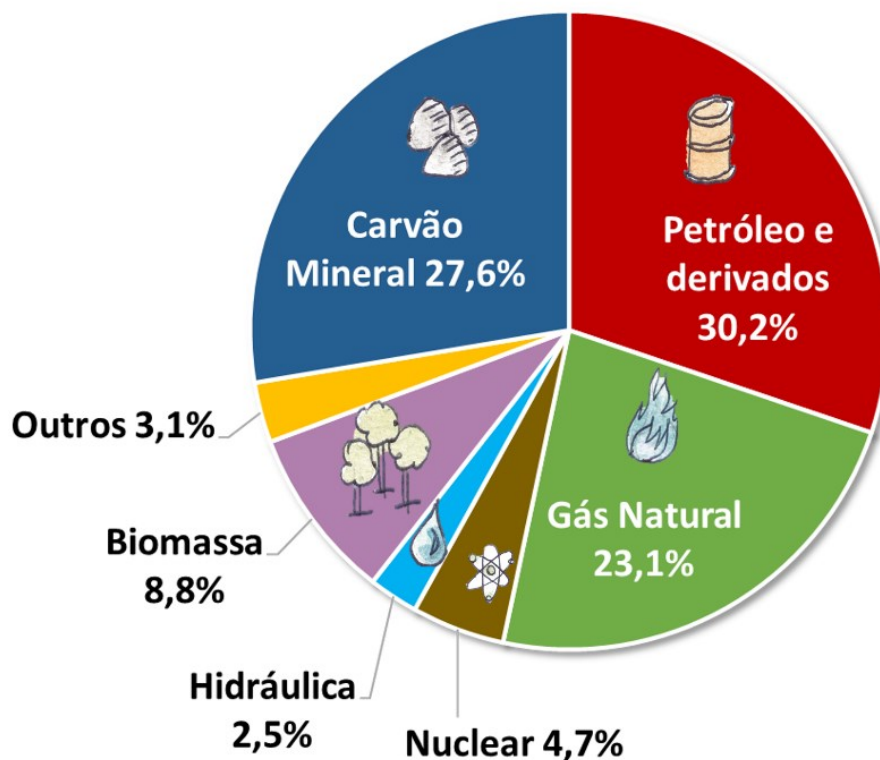
Sequencialmente, será demonstrado as matrizes energéticas e elétricas onde, amenizar as perdas e impactos energéticos também significa reduzir gastos e custos desnecessários de energia, sendo a principal motivação para com o tema presente.

2.3 MATRIZ ELÉTRICA E MATRIZ ENERGÉTICA

A matriz elétrica refere-se exclusivamente às fontes utilizadas para a geração de energia elétrica em um país ou região. Ela não engloba outras formas de energia utilizadas em setores como transporte ou indústria. Por outro lado, a matriz energética é mais ampla, abrangendo todas as fontes de energia utilizadas em um país, incluindo aquelas destinadas à geração de eletricidade, transporte, aquecimento, processos industriais, entre outros.

O mundo apresenta uma matriz energética composta, principalmente, por fontes não renováveis, como o carvão, petróleo e gás natural [11]. Segundo a IEA (Agência Internacional de Energia), a matriz energética mundial pode ser vista em figura 01.

Figura 1 – Matriz Energética Mundial 2022.



Fonte: Matriz Energética e Elétrica – EPE [11]

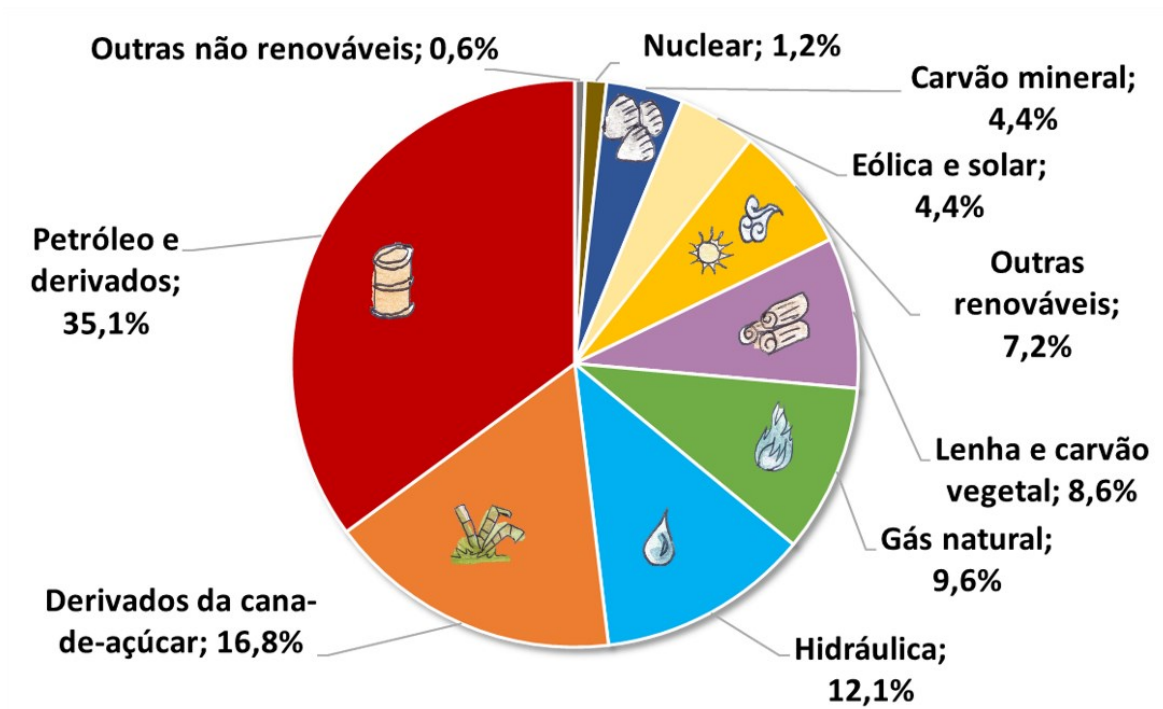
Fontes renováveis como solar, eólica e geotérmica, por exemplo, juntas correspondem a apenas 3,1% da matriz energética mundial, assinaladas como “Outros” no gráfico, da figura 01 [11].

Por outro lado, a matriz energética brasileira é diferente da mundial, devido a utilização de mais fontes renováveis que no resto do mundo. Desse modo, a parte renovável totaliza quase metade da matriz nacional [11]. A matriz energética brasileira pode ser vista em figura 02.

Como citado no início do capítulo, a matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis para a geração de energia. O mundo apresenta uma matriz elétrica composta, principalmente, por combustíveis fósseis [11]. A matriz elétrica mundial pode ser vista em figura 03.

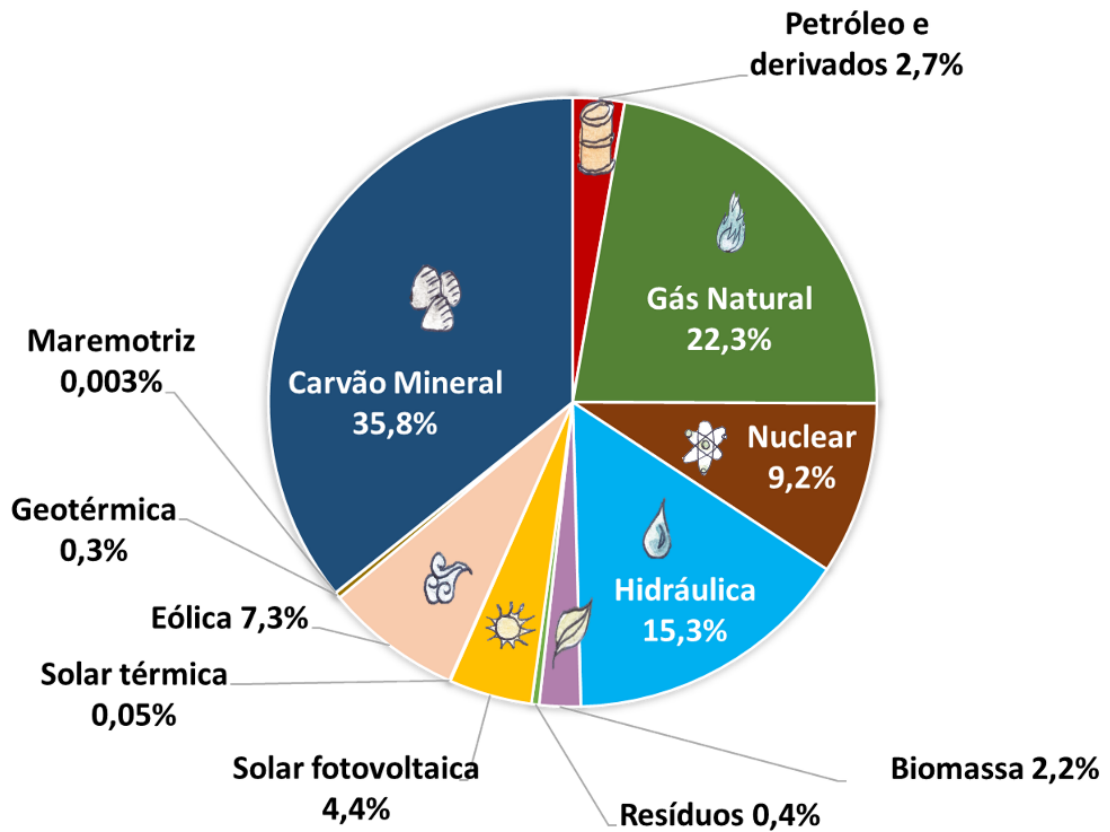
Por outro lado, a matriz elétrica brasileira é ainda mais renovável que a energética, pois grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas [11]. A matriz elétrica brasileira pode ser vista em figura 04.

Figura 2 – Matriz Energética Brasileira 2023.



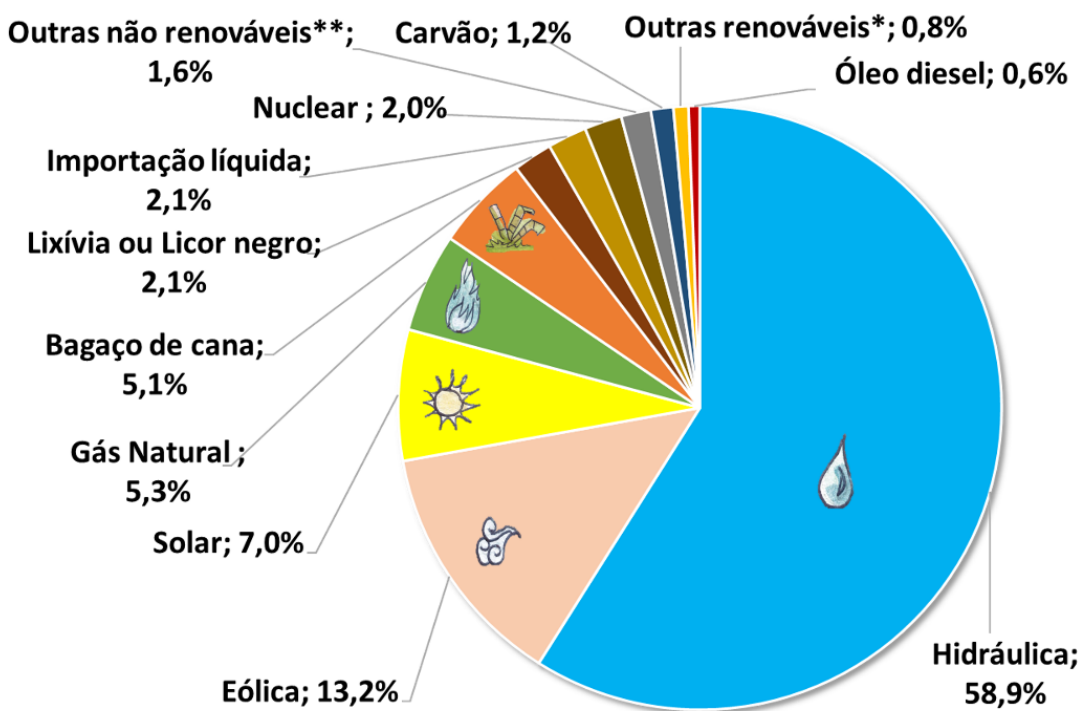
Fonte: Matriz Energética e Elétrica – EPE [11]

Figura 3 – Matriz Elétrica Mundial 2022.



Fonte: Matriz Energética e Elétrica – EPE [11]

Figura 4 – Matriz Elétrica Brasileira 2023.



Fonte: Matriz Energética e Elétrica – EPE [11]

2.4 PRINCÍPIOS DA EFICIÊNCIA

Nota-se que a eficiência energética é um tema bem recorrente e necessário nos dias atuais, sendo crucial na redução do consumo de energia e, também, na promoção da sustentabilidade, tanto em residências quanto, especialmente, no setor industrial.

Diante dos pontos supracitados, no capítulo 1, no âmbito residencial, a eficiência energética contribui para a redução de custos e o uso consciente dos recursos. Práticas como a substituição de lâmpadas antigas por LED, o uso de eletrodomésticos com selo de eficiência energética e o isolamento térmico adequado são medidas eficazes. Além disso, sistemas de automação residencial permitem o controle inteligente do consumo energético, ajustando iluminação e climatização conforme a necessidade [12].

Já no setor industrial, a eficiência energética é fundamental para aumentar a competitividade e reduzir impactos ambientais. Estudos indicam que o potencial de conservação de energia elétrica na indústria brasileira equivale à capacidade de uma usina hidrelétrica de 6.500 MW [13]. Medidas como a modernização de equipamentos, otimização de processos e gestão eficiente do consumo energético são estratégias eficazes. A adoção de

práticas eficientes resulta em benefícios econômicos, ambientais e sociais, promovendo inovação tecnológica e fortalecendo a posição das indústrias no mercado global [14].

A implementação da eficiência na indústria pode variar desde pequenas mudanças e ajustes minuciosos até grandes projetos voltados para a modernização industrial. Práticas como a adoção de sistemas de gestão de energia, permitindo o monitoramento e otimização do consumo de forma contínua, o uso de equipamentos mais eficientes, podendo apresentar alguns padrões mínimos de eficiência para motores, compressores, fornos entre outros equipamentos industriais, o aproveitamento de resíduos térmicos e cogeração, em sistemas que fazem o uso do calor residual em determinados processos produtivos aumentando sua eficiência e, dessa forma, reduzindo a dependência de energia externa e, até mesmo, em redes de aprendizagem e capacitação, sendo necessário o compartilhamento de boas práticas entre empresas e treinamentos para gestores sobre eficiência energética [14].

Diante disso, diversos países implementaram programas para promover a eficiência energética como nos Estados Unidos, o programa ‘Energy Start’ incentiva a adoção de produtos e práticas eficientes, resultando em significativas economias de energia e custos [15]. Em Portugal, o país dispõe de um programa chamado de Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia, o qual visa promover a eficiência e monitorar o consumo [15].

Na União Europeia, a U4E (União pela Eficiência Energética) apoia países em desenvolvimento na transição para equipamentos e dispositivos eficientes no uso de energia [16]. De acordo com a ACEEE (American Council for an Energy-Efficient Economy), países como França, Reino Unido e Alemanha lideram em eficiência energética, enquanto o Brasil ocupa a 15ª posição entre as 16 maiores economias [17].

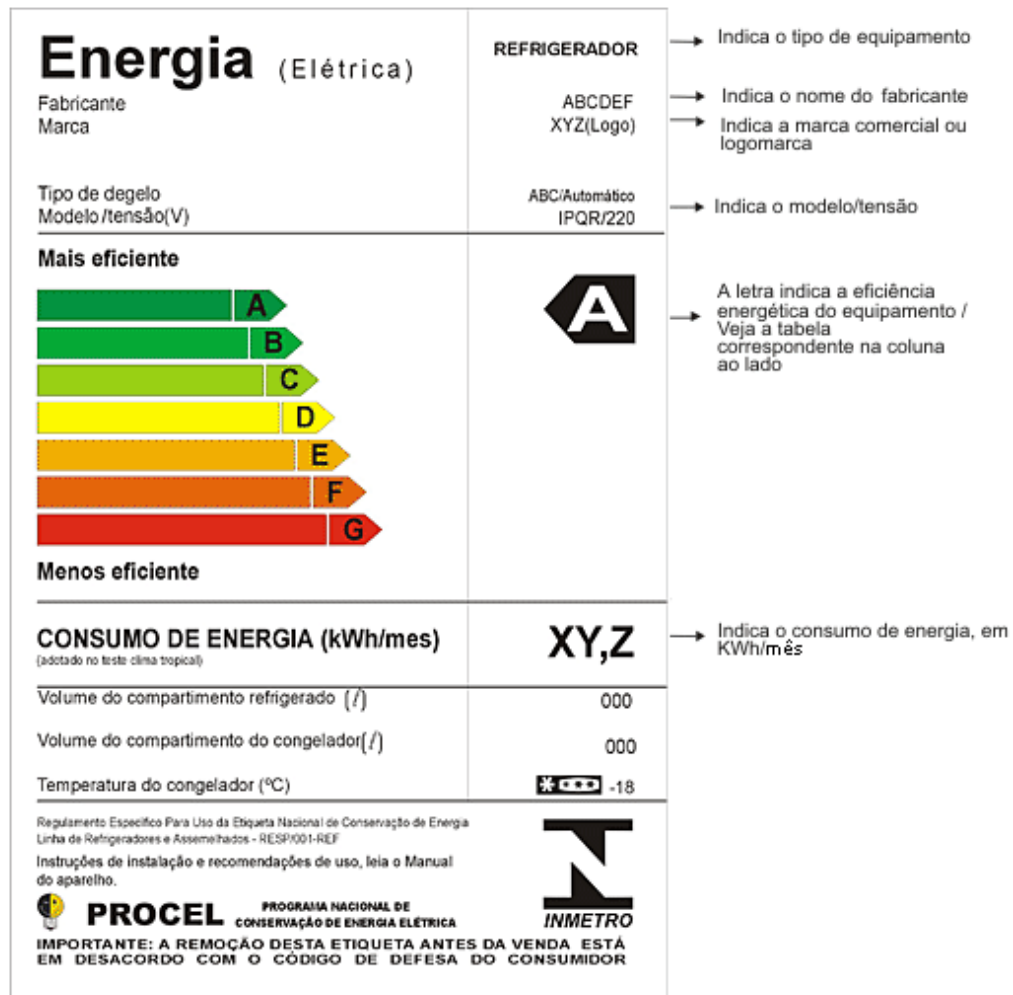
2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL

No Brasil, a preocupação com a eficiência energética surgiu com mais vigor após a crise do petróleo, nos anos 1970, em um parque consumidor com potencial para a redução de perdas e desperdícios [02].

Diante da crise, a primeira iniciativa governamental nessa área ocorreu em 1981, com a criação do Programa Conserve pelo MNE (Ministério de Minas e Energia), que tinha como objetivo incentivar a eficiência energética no setor industrial. Em 84, diante da crescente preocupação com o fornecimento de energia elétrica, o governo federal lançou o PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem), coordenado pelo Inmetro. Esse programa foi desenvolvido para fornecer aos consumidores informações sobre o desempenho energético de

equipamentos e, a partir de 2009, também de edificações, influenciando suas escolhas de compra e estimulando a melhoria do consumo energético [02]. O modelo de etiquetagem pode ser visto na figura 05.

Figura 5 – Modelo de etiquetagem, PBE.



Fonte: Inmetro – PBE [18]

No ano seguinte, em 85, foi implantado o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), sob a gestão da Eletrobras. O PROCEL desenvolveu subprogramas voltados para a disseminação de soluções eficientes em iluminação, aparelhos elétricos e eletrodomésticos, além de promover auditorias energéticas, capacitações e ações educativas em diferentes níveis. Como parte desse esforço conjunto entre o Inmetro e o PROCEL, foi criado o Selo PROCEL, que destaca os produtos com melhor desempenho energético [02]. O modelo de selo PROCEL pode ser visto na figura 06.

Figura 6 – Modelo de selo PROCEL



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE [18]

Em 91, foi instituído o CONPET (Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural), sob a responsabilidade da Petrobras. O programa desenvolveu iniciativas voltadas à promoção da eficiência energética, especialmente nos setores industrial e de transporte comercial. Além disso, por meio do Selo CONPET, passou a avaliar e destacar o desempenho energético de automóveis, fogões e aquecedores a gás [02]. O modelo de selo CONPET pode ser visto na figura 07.

No início dos anos 2000, duas leis importantes foram promulgadas com foco na eficiência energética. A primeira, a Lei nº 9.991/2000, deu origem ao PEE (Programa de Eficiência Energética) das distribuidoras de energia elétrica, determinando que uma parte da receita operacional líquida dessas empresas seja destinada a projetos voltados à melhoria do uso da energia, sob supervisão da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Já a segunda, a Lei nº 10.295/2001, conhecida como Lei da Eficiência Energética, criou o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética. Esse comitê passou a ser responsável por estabelecer requisitos mínimos de eficiência para equipamentos e por promover a adoção de padrões de eficiência em edificações no território nacional [02].

Figura 7 – Modelo de selo CONPET.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE [18]

Essas medidas foram impulsionadas diretamente pelos efeitos da crise energética vivida em 2001, que evidenciou a fragilidade do sistema elétrico nacional diante da dependência da matriz hidrelétrica e da ausência de políticas consistentes de uso racional da energia. A necessidade urgente de reduzir o consumo levou o governo a adotar medidas emergenciais de racionamento, além de incentivar mudanças no comportamento dos consumidores e promover investimentos em tecnologias mais eficientes. Como legado dessa crise, consolidou-se no país uma nova abordagem quanto ao uso da energia, fortalecendo a cultura da eficiência energética e estimulando a implementação de programas estruturados e regulamentações técnicas que orientam até hoje a atuação de agentes públicos e privados no setor elétrico.

2.6 MOTORES ELÉTRICOS

É comum pensar que apenas a substituição por motores de alto rendimento garante um processo mais eficiente. No entanto, para alcançar o máximo de eficiência, é fundamental que esses motores sejam operados de forma estratégica e adequada ao sistema [09].

Além da operação adequada, é importante compreender as principais perdas que ocorrem em motores elétricos, pois elas impactam diretamente o rendimento do equipamento. As perdas podem ser classificadas em dois grandes grupos: perdas fixas e perdas variáveis [28].

As perdas fixas independem da carga acionada e incluem as perdas no ferro (ou perdas magnéticas), que ocorrem no núcleo do motor devido à histerese e às correntes de Foucault, e as perdas mecânicas, como atrito nos rolamentos e perdas por ventilação. Já as perdas variáveis estão relacionadas à corrente elétrica e aumentam com a carga aplicada, sendo representadas principalmente pelas perdas ôhmicas nos enrolamentos (efeito Joule) [28].

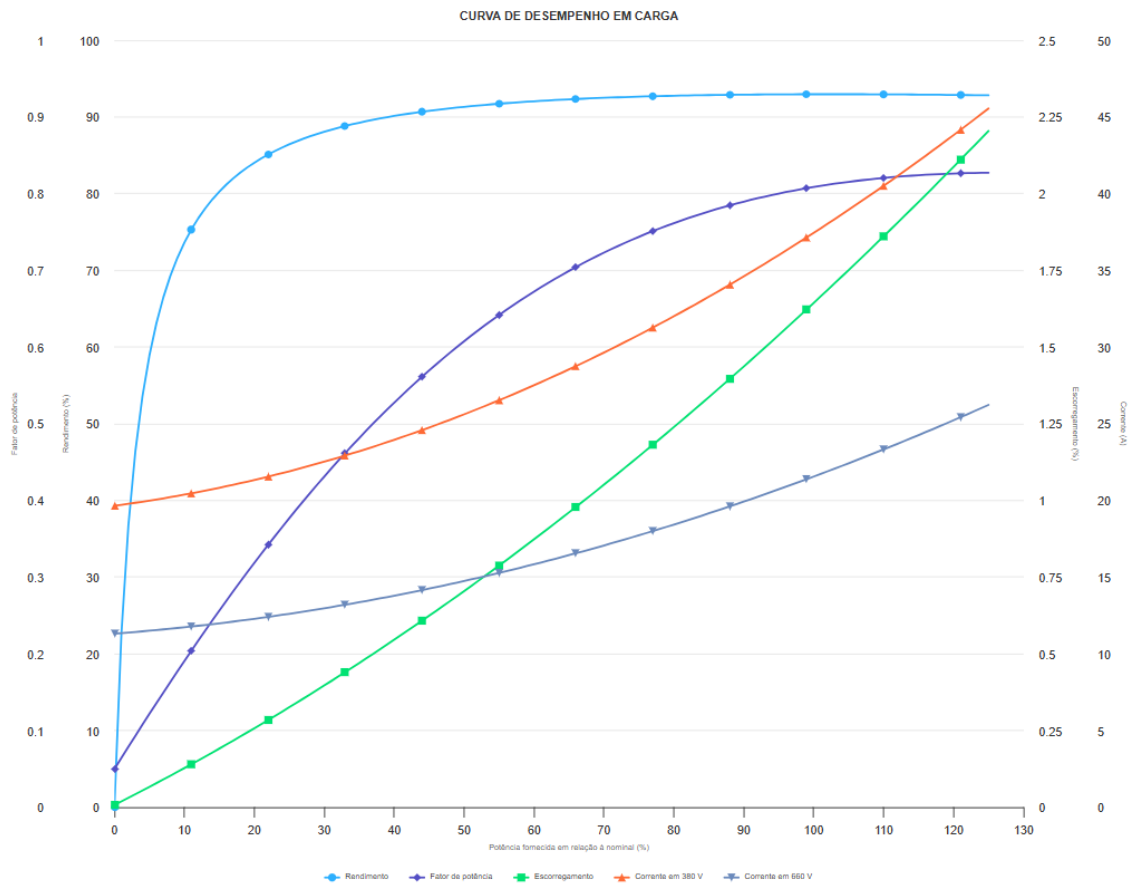
O rendimento do motor elétrico é definido como a relação entre a potência mecânica entregue no eixo e a potência elétrica consumida [28]. No entanto, mesmo motores de alto rendimento terão seu desempenho comprometido se operarem fora de sua faixa ideal de carga. Por isso, é essencial que o motor esteja corretamente dimensionado para a aplicação, evitando subcarga ou sobrecarga, que resultam em perdas desnecessárias e menor vida útil do equipamento.

A escolha do tipo de motor e sua aplicação correta são essenciais para garantir eficiência em cada operação. Em ambientes industriais, onde as condições de operação variam amplamente, é fundamental selecionar o motor que melhor atenda à carga específica e ao regime de trabalho.

Em suma, um bom dimensionamento de motores elétricos é fundamental para ter eficiência nos processos em uma indústria, quando isso é feito de forma estratégica, é possível reduzir significativamente as perdas e melhorar o desempenho do sistema, resultando em uma operação mais econômica e sustentável. Na figura 08 pode-se observar uma curva de rendimento de um motor WEG de 25cv, 220/380/440V, 4 polos, que, por sua vez, relaciona a corrente de operação do motor com seu fator de carga (%), fator de potência, rendimento e escorregamento, facilitando os estudos e cálculos de eficiência energética.

O acionamento de motores elétricos desempenha um papel essencial em sistemas industriais, especialmente em aplicações que exigem controle preciso, como nos túneis de congelamento. No sistema do estudo de caso apresentado, a partida dos ventiladores é realizada por meio de uma soft starter (SSW07), um dispositivo que controla a tensão de alimentação durante a partida do motor, reduzindo o pico de corrente e o impacto mecânico sobre os equipamentos acoplados. Essa solução oferece um ganho importante na durabilidade dos componentes e na proteção contra variações abruptas de energia.

Figura 8 – Curva de rendimento do motor WEG, 25cv.



Fonte: Motor W22 – WEG [29]

A soft-starter SSW07 é um dispositivo eletrônico utilizado para partidas suaves de motores de indução trifásicos, realizando o controle da tensão aplicada ao motor durante os processos de aceleração e desaceleração. Seu design compacto favorece a economia de espaço nos painéis elétricos, tornando-a uma solução prática para instalações industriais. Além disso, oferece diversas proteções integradas ao motor e pode ser personalizada conforme a aplicação, por meio de módulos e acessórios opcionais de fácil instalação [31]. O modelo da soft-starter pode ser visto na figura 9.

Contudo, a soft starter atua apenas na fase de partida e parada do motor, não permitindo variações de velocidade em tempo real durante a operação contínua. Nesse contexto, a substituição por um inversor de frequência surge como uma alternativa mais completa. O inversor permite controlar a frequência e a tensão da alimentação do motor, viabilizando ajustes dinâmicos de rotação conforme a necessidade do processo. Em sistemas de ventilação, isso permite adequar o fluxo de ar ao ciclo de produção, reduzindo o consumo energético e promovendo uma operação mais eficiente.

Figura 9 – Soft-Starter.



Fonte: Soft-Starter SSW07 – WEG [31]

Além disso, o inversor de frequência oferece recursos avançados de proteção e monitoramento, como detecção de sobrecarga, falhas à terra e comunicação com sistemas supervisórios via protocolos industriais. A flexibilidade de programação e a possibilidade de controlar múltiplas variáveis tornam o inversor uma solução robusta para aplicações que demandam desempenho, segurança e economia simultaneamente. Em túneis de congelamento, a capacidade de ajustar a velocidade dos ventiladores conforme o tipo de produto e o ciclo térmico desejado representa uma vantagem estratégica.

Do ponto de vista econômico, a adoção de inversores pode resultar em significativa redução nos custos operacionais, especialmente em sistemas que operam por longos períodos ou com carga variável. A diminuição no consumo de energia elétrica, combinada com a redução de paradas não programadas e manutenção corretiva, contribui para o retorno do investimento em prazo reduzido.

Por fim, a modernização do sistema de acionamento com inversores também poderia agregar valor ao processo industrial, ao permitir maior controle, integração com sistemas inteligentes e melhoria no desempenho térmico do túnel de congelamento. Essa evolução

tecnológica está alinhada com os princípios da automação industrial, da eficiência energética e da engenharia sustentável, pilares essenciais para a competitividade e inovação no setor elétrico.

2.7 REFRIGERAÇÃO

Como visto anteriormente, na INTRODUÇÃO, a indústria alimentícia e, particularmente, a parte frigorífica, apresenta um elevado consumo de energia elétrica, especialmente, devido à utilização de motores, ar comprimido e, sobretudo, a refrigeração. Diante disso, o processo de refrigeração é responsável por cerca de 81% do consumo elétrico de um frigorífico [04].

A refrigeração industrial tem como objetivo o controle da temperatura de algum produto, substância, ambiente ou meio [20]. Os componentes básicos são os compressores, trocadores de calor, ventiladores, bombas, tubos, dutos e equipamentos de proteção e controle. Devido as características próprias, é requerido tanto uma mão de obra mais especializada quanto maiores investimentos em projetos.

O funcionamento da refrigeração industrial baseia-se, em grande parte, na operação de sistemas de compressão de vapor, que são os mais amplamente utilizados nos processos industriais. Nesse tipo de sistema, o fluido refrigerante é inicialmente comprimido por um compressor, elevando sua pressão e temperatura. Em seguida, ele passa por um condensador, onde libera calor para o meio externo (normalmente o ar ou a água), condensando-se em líquido. Esse líquido é então expandido por uma válvula de expansão, reduzindo sua pressão e temperatura, antes de circular por um evaporador, onde absorve calor do meio refrigerado. Esse ciclo contínuo permite o resfriamento eficiente de produtos ou ambientes, sendo fundamental para indústrias que exigem controle térmico rigoroso, como a alimentícia e a farmacêutica [21].

2.7.1 PROCESSOS TERMODINÂMICOS

É válido mencionar que o aprofundamento sobre a operação de sistemas de compressor de vapor se deve ao fato de que, no estudo de caso a ser realizado, utiliza-se o mesmo circuito para a refrigeração industrial, destinada a um túnel de congelamento para produtos em uma indústria alimentícia.

Ademais, uma explicação mais teórica é apresentada através do ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor. O ciclo teórico pode ser visto na figura 10 e o esquema básico com os componentes principais de um sistema pode ser visto na figura 11. Os processos termodinâmicos que compõe o ciclo teórico, em seus respectivos equipamentos, são:

I. Processo [1] → [2]

Ocorre no compressor. É um processo adiabático reversível e, portanto, isentrópico. O fluido refrigerante entra no compressor à pressão do evaporador, P_0 , e com título, $x = 1$. O fluido é então comprimido até atingir a pressão de condensação e, neste estado está superaquecido com temperatura T_2 , que é maior que a temperatura de condensação T_0 [20].

II. Processo [2] → [3]

Ocorre no condensador. É um processo de rejeição de calor do fluido para o meio de resfriamento a pressão constante. Neste processo, o fluido é resfriado da temperatura T_2 até a temperatura de condensação T_c e em seguida condensado até se tornar líquido saturado na temperatura T_3 , que é igual à temperatura T_c [20].

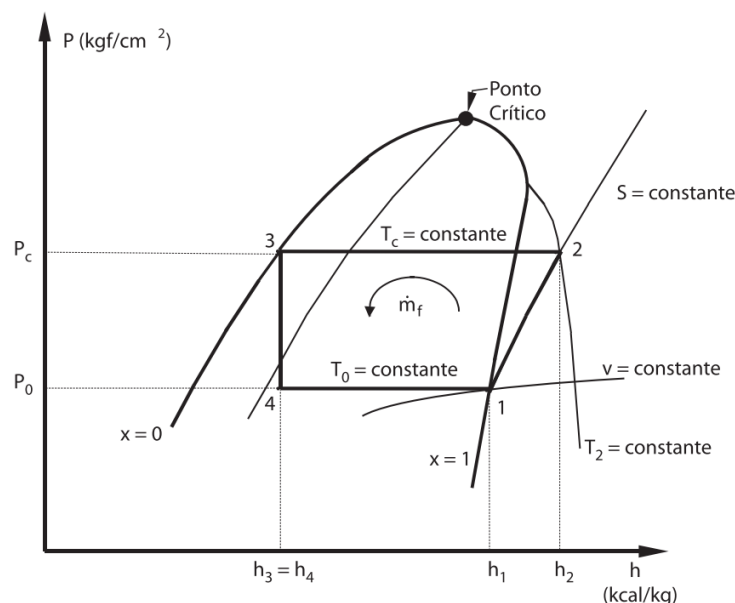
III. Processo [3] → [4]

Ocorre no dispositivo de expansão. É um processo que é uma expansão irreversível a entalpia constante, processo isoentálpico, desde a pressão P_c e líquido saturado ($x = 0$), até a pressão de vaporização, P_0 [20].

IV. Processo [4] → [1]

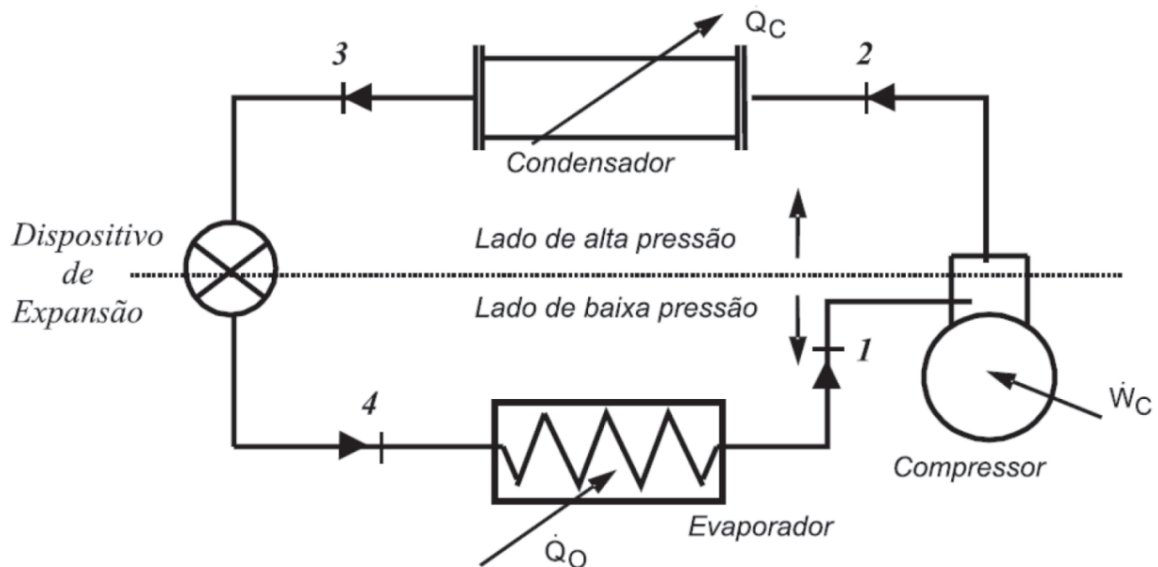
Ocorre no evaporador. É um processo de transferência de calor a pressão constante P_0 , consequentemente a temperatura constante, T_0 , desde vapor úmido no estado 4 até atingir o estado de vapor saturado ($x = 1$) [20].

Figura 10 – Ciclo teórico de refrigeração por compressor de vapor.



Diante do entendimento do processo termodinâmico com o ciclo teórico, é preciso ser interpretado com o fluido refrigerante amônia (NH_3), devido ao mesmo ser utilizado no estudo de caso aprofundado, em um túnel de congelamento. A escolha desse fluido se dá por sua larga utilização na indústria de alimentos, sendo bastante comum em sistemas de congelamento que exigem confiabilidade e bons resultados.

Figura 11 – Esquema do sistema de refrigeração com os equipamentos.



Fonte: Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações – UNIFEI [20]

Um túnel de congelamento, que opera com refrigeração por amônia, utiliza um sistema de refrigeração baseado nesse fluido para remover o calor dos alimentos, acelerando o processo de congelamento. No funcionamento do sistema, a amônia percorre um ciclo composto pelas etapas de compressão, condensação, expansão e evaporação, realizando a transferência de calor do interior do túnel para o ambiente externo por meio de um condensador, dessa forma, tem-se:

- I. O vapor de amônia de baixa pressão, proveniente do evaporador, é comprimido por um compressor, aumentando sua pressão e temperatura. O gás de amônia sob alta pressão e temperatura passa por um condensador, onde é resfriado e condensado em amônia líquida, liberando calor para o ambiente (ou para um sistema de resfriamento de água).
- II. A amônia líquida, sob alta pressão, é expandida através de uma válvula de expansão, reduzindo sua pressão e temperatura.

- III. A amônia líquida de baixa pressão passa para o evaporador, localizado dentro do túnel de congelamento, onde absorve calor do ar e dos produtos, evaporando para o estado gasoso.
- IV. Ciclo repetitivo. O vapor de amônia de baixa pressão, que absorveu o calor, é então aspirado novamente pelo compressor, e o ciclo se repete para manter a temperatura do túnel baixa.

2.7.2 AMÔNIA E SEGURANÇA

O túnel de congelamento refrigerado por (amônia) é uma tecnologia amplamente utilizada na indústria frigorífica, especialmente no setor de carnes, por sua eficiência energética, baixo custo operacional e alta capacidade de congelamento.

Todavia, é válido ressaltar os riscos e cuidados ao trabalhar com a amônia, dando importância à segurança. É um gás tóxico, inflamável em altas concentrações no ar (entre 15% e 28%), corrosivo e de odor forte. Embora seja ecologicamente correta (sem impacto sobre a camada de ozônio ou aquecimento global), exige instalações seguras e manuseio adequado para evitar riscos à saúde humana e ao meio ambiente [22].

Alguns requisitos de segurança devem ser seguidos e o projeto deve conter uma ventilação natural e forçada, sensores de vazamento, isolamento de componentes críticos, válvula de segurança e redundância, sempre em conformidade com a ABNR NBR 16069.

Inspeções e manutenções periódicas são fundamentais e devem ser realizadas conforme o porte da instalação, verificando a estanqueidade de conexões, o estado das válvulas, sensores e pressostatos, a integridade das tubulações e condensadores, testes nas válvulas de alívio e alarmes, conforme as NR-13 e NR-12 aplicadas à refrigeração industrial.

O sistema de detecção e alarme é obrigatório, sendo necessário através de sensores fixos e/ou portáteis, os alarmes visuais e sonoros devem ser acionados automaticamente ao detectar concentração acima de 25ppm, a ventilação mecânica de exaustão deve ser automaticamente ativada e, também, é recomendável um backup de energia para manter os sistemas críticos [23].

É recomendável algumas medidas preventivas e emergências, como a instalação de chuveiros de emergência e lava-olhos, sinalização de áreas de risco, EPIs (Equipamentos de Proteção Individual) e um plano de evacuação e emergência com treinamentos periódicos para os funcionários.

Devido a utilização do fluido refrigerante NH_3 no estudo de caso a ser aprofundado, tem-se a importância do entendimento da parte de segurança e, além disso, sendo em um túnel de congelamento, o objeto de estudo.

2.7.3 TÚNEIS DE CONGELAMENTO

Os túneis de congelamento são equipamentos utilizados para congelar rapidamente alimentos ou outros itens perecíveis, mantendo sua qualidade, textura e valor nutricional. Esses sistemas são amplamente empregados na indústria alimentícia, especialmente em frigoríficos, onde é fundamental diminuir rapidamente a temperatura dos produtos para preservar sua qualidade [24].

Algumas características do túnel de congelamento:

- I. Resfriamento rápido e uniforme: O túnel de congelamento é eficiente em resfriar os alimentos de forma rápida e homogênea, assegurando que todo o produto atinja a temperatura desejada de maneira consistente. Esse processo previne a formação de cristais de gelo grandes, o que contribui para a preservação da textura e do sabor dos alimentos [25].
- II. Controle preciso da temperatura: Os túneis de congelamento são equipados com sistemas de controle de temperatura de alta precisão, garantindo que os alimentos sejam congelados na temperatura ideal para manter sua qualidade e segurança [25].
- III. Alta capacidade de produção: Esses equipamentos são projetados para funcionar de maneira contínua, com grande capacidade de produção. Isso permite que grandes quantidades de alimentos sejam congeladas rapidamente, tornando-os ideais para a indústria alimentícia [25].
- IV. Redução do tempo de armazenamento: O congelamento rápido proporcionado pelo túnel de congelamento contribui para a extensão da vida útil dos alimentos, permitindo seu armazenamento por períodos mais longos sem perder qualidade [25].

Alguns benefícios do túnel de congelamento:

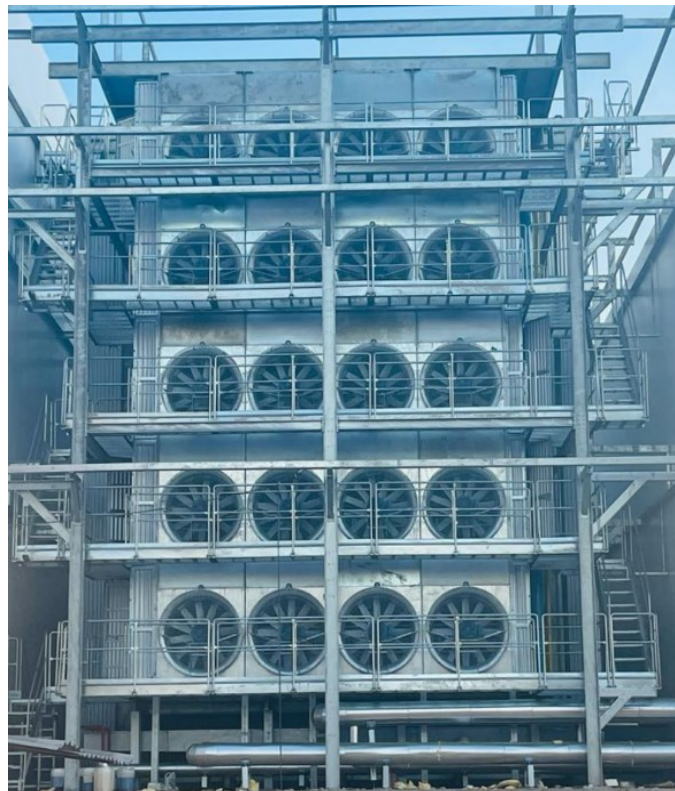
- I. Preservação da qualidade dos alimentos: Ao realizar o congelamento rápido, o túnel de congelamento mantém a qualidade, o sabor e a textura dos alimentos [25].

- II. Segurança alimentar: O congelamento rápido impede o crescimento de microrganismos, como bactérias e fungos, que podem causar infecção e contaminação dos alimentos [25].
- III. Aumento da eficiência operacional: Com sua capacidade de congelar grandes volumes de alimentos em um curto espaço de tempo, o túnel de congelamento aumenta a eficiência operacional das empresas. Isso resulta em maior produtividade, menor desperdício de alimentos e redução de custos [25].

Atualmente existem dois principais tipos de túneis de congelamento, sendo o túnel de congelamento contínuo, com esteiras transportadoras que levam os produtos por um caminho refrigerado, ficando alocados em bandejas e, também, o túnel de congelamento estático, em que os produtos ficam estáticos durante todo o ciclo. O túnel de congelamento tem uma estrutura física bastante característica, com caixas, níveis e bandejas, em arranjos organizados para empilhamento e circulação de ar.

Devido a utilização do TCA (Túnel de Congelamento Automático) no estudo de caso a ser aprofundado, tem-se a importância do entendimento de seu funcionamento, características e benefícios. O TCA pode ser visto na figura 12.

Figura 12 – TCA, sistema de ventilação.



3 ESTUDO DE CASO

Nesta seção será apresentado o estudo de caso, com as informações coletadas em uma indústria alimentícia na cidade de Uberlândia/MG. Em seguida, nas próximas seções, serão apresentadas as metodologias utilizadas, a análise de oportunidades, bem como o levantamento de dados, testes e soluções realizadas. Posteriormente, uma análise econômica será apresentada e os resultados do estudo feito.

O estudo será realizado através da metodologia PDCA (*Plan* (planejar), *Do* (executar), *Check* (chechar/controlar) e *Act* (agir)), trocando as hélices dos ventiladores de um túnel de congelamento, melhorando, assim, o fluxo e a capacidade de ventilação do mesmo. Após, será calculado o potencial de energia a ser economizado e, por sua vez, realizar a análise do montante financeiro a ser economizado pela empresa, demonstrando o tempo de retorno para o investimento feito.

3.1 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no estudo de caso é um ciclo de gestão muito utilizado para melhoria contínua e produtos, chamada de PDCA. O ciclo do PDCA pode ser visto na figura 13.

Figura 13 – PDCA.



Fonte: PDCA – Businessmap [26].

Sobre o PDCA:

- I. Plan (planejar): É o ponto do ciclo que envolve mais etapas, pois será planejado todo o trabalho e estudo realizado, sendo os seguintes estágios: o conhecimento do processo, identificar o problema e meta, observar e priorizar causas, identificar e priorizar soluções e, também, elaborar o plano de ação.
- II. Do (executar): É o ponto do ciclo que pode exigir o maior tempo, pois será a parte de execução das ações descritas no plano de ação, ou seja, implantar as soluções propostas.

III. Check (checar/comparação): É o ponto do ciclo de checagem e comparação com o que foi planejado.

IV. Act (agir): É o ponto do ciclo de padronização e conclusão do trabalho realizado.

Dessa maneira, com a metodologia anteriormente mencionada e explicada, torna-se possível realizar a construção do painel de ritmo do trabalho. O painel de ritmo pode ser visto na figura 14.

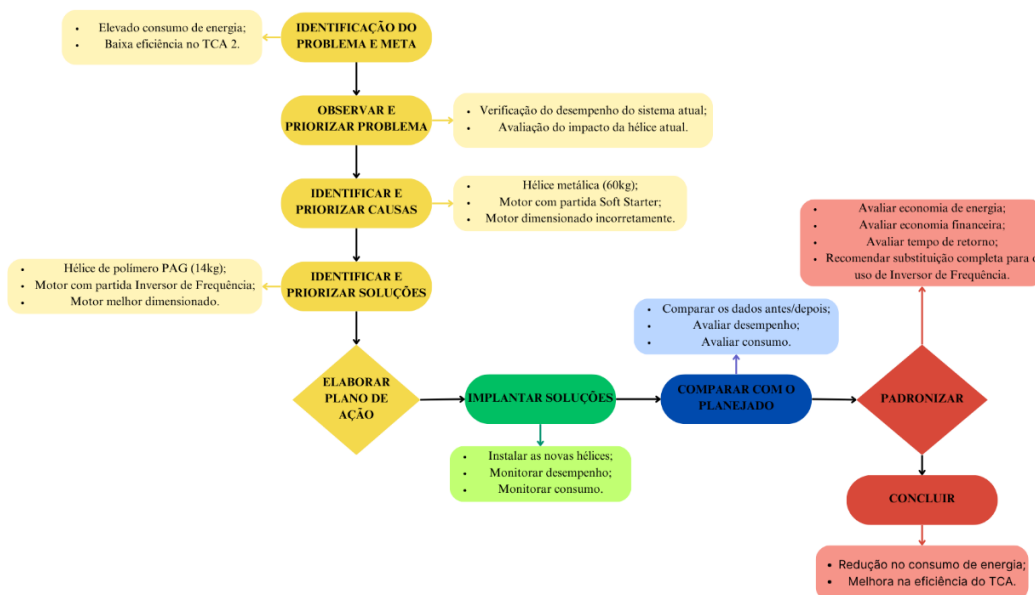
Figura 14 – Painel de ritmo.

Ciclo	Etapa	Cronograma das etapas do PDCA												
		Data	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
P	Conhecimento do Processo	01/06/2023												
	Identificar problema e Meta	30/06/2023												
	Observar e priorizar problema	15/07/2023												
	Identificar e priorizar causas	05/08/2024												
	Identificar e priorizar soluções	15/12/2024												
	Elaborar plano de ação	20/01/2024												
D	Implantar soluções	25/07/2024												
C	Comparar com o planejado	10/12/2024												
A	Padronizar	20/12/2024												
	Concluir	20/12/2024												

Fonte: Autor.

Por fim, para melhor entendimento do trabalho e desenvolvimento a seguir, torna-se possível realizar a construção do fluxograma a ser seguido com algumas prévias. O fluxograma pode ser visto na figura 15.

Figura 15 – Fluxograma.

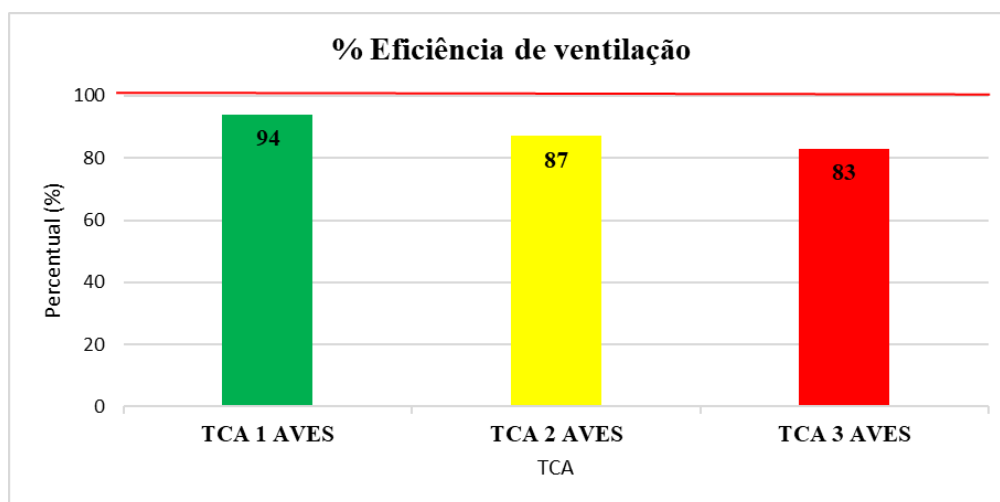


Fonte: Autor.

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

Para o levantamento de dados e realizar uma análise de oportunidades, foram coletados dois dados importantes e decisivos: a eficiência de ventilação e a temperatura média de congelamento. Ademais, para critério de validação e realização das soluções propostas, a temperatura média de congelamento torna-se prioridade. Além disso, é importante ressaltar que, para uma proposta inicial, foram levantados dados de três TCAs. Para a análise da eficiência de ventilação, foi realizado um simples comparativo: verificado a velocidade de ventilação de projeto do TCA e, por sua vez, comparado com a velocidade de ventilação atual. A eficiência de ventilação pode ser vista na figura 16.

Figura 16 – Eficiência de ventilação.



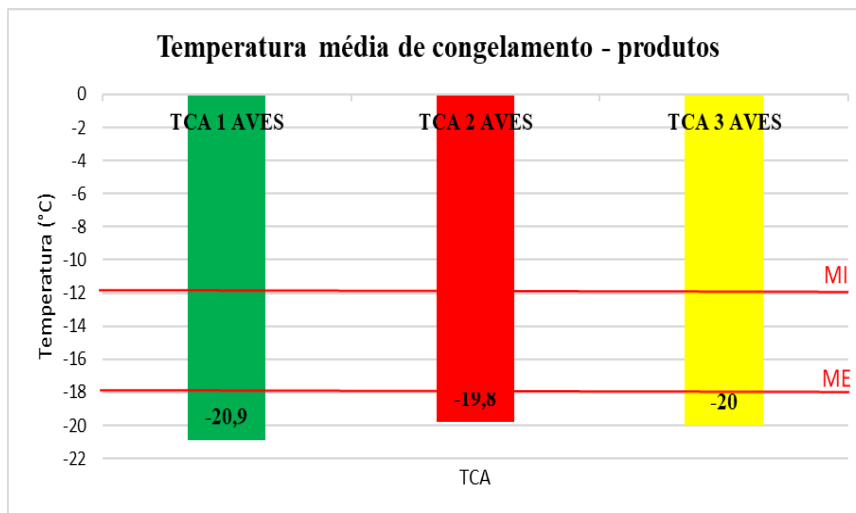
Fonte: Autor.

Para a análise da temperatura média de congelamento, foram realizadas coletas das temperaturas de saída dos produtos dos TCAs, onde produtos destinados ao MI (Mercado Interno) têm referência de -12°C , no mercado nacional, e os produtos destinados ao ME (Mercador Externo) têm referência de -18°C , para exportação, de acordo com o decreto 9.013/2017 do RIISPOA (Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária dos Produtos de Origem Animal) pelo MAPA (Ministério da Agricultura e Pecuária). Foram considerados os produtos MI no estudo. A temperatura média de congelamento pode ser vista na figura 17.

Diante dos fatos e dados coletados, verificou-se a necessidade de priorização para as tratativas e oportunidades levantadas para com o TCA 2 devido a temperatura média dos produtos estar próxima ao limite e, também, a baixa eficiência de ventilação. Consequentemente, nota-se uma falha na otimização do processo e, por sua vez, uma

oportunidade, o que pode resultar em uma possível economia tempo e energia, culminando em uma redução de custos.

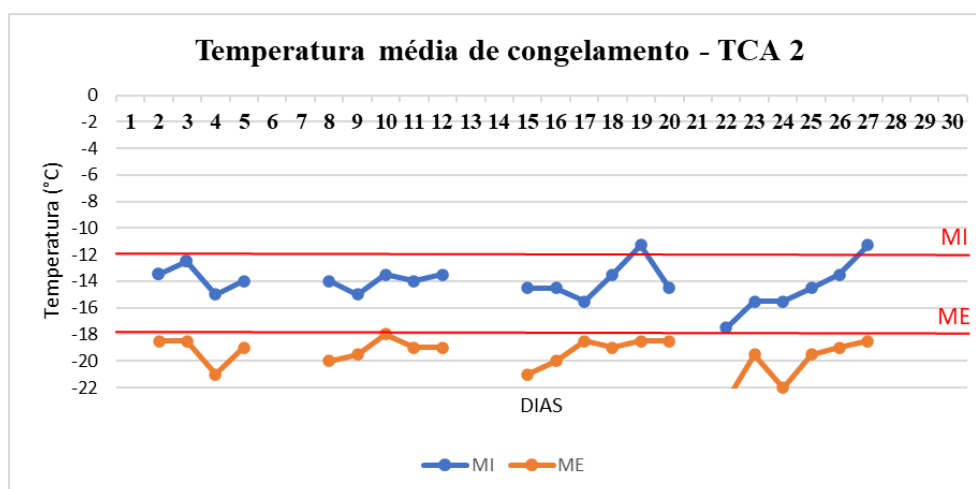
Figura 17 – Temperatura média de congelamento.



Fonte: Autor.

Após a definição do TCA estudado, entrou-se em uma análise mais detalhada, ao longo de um mês (30 dias), onde foi verificado que a temperatura média dos produtos do TCA 2 AVES está muito próxima ao limite estipulado e, em alguns casos mais alto que o padrão. A temperatura média de congelamento do TCA 2 AVES pode ser vista na figura 18.

Figura 18 – Temperatura média de congelamento do TCA 2 AVES.



Fonte: Autor.

Diante dos pontos supracitados, foi feita uma análise de temperatura para o produto com maior dificuldade de congelamento no TCA, Peito Pacote 20kg. Além disso, foi acompanhado de um datalogger de temperatura, ambos no nível 10 do túnel. O Peito Pacote 20kg pode ser visto na figura 19 e o datalogger de temperatura pode ser visto na figura 20.

Figura 19 – Peito Pacote 20kg.



Fonte: Autor.

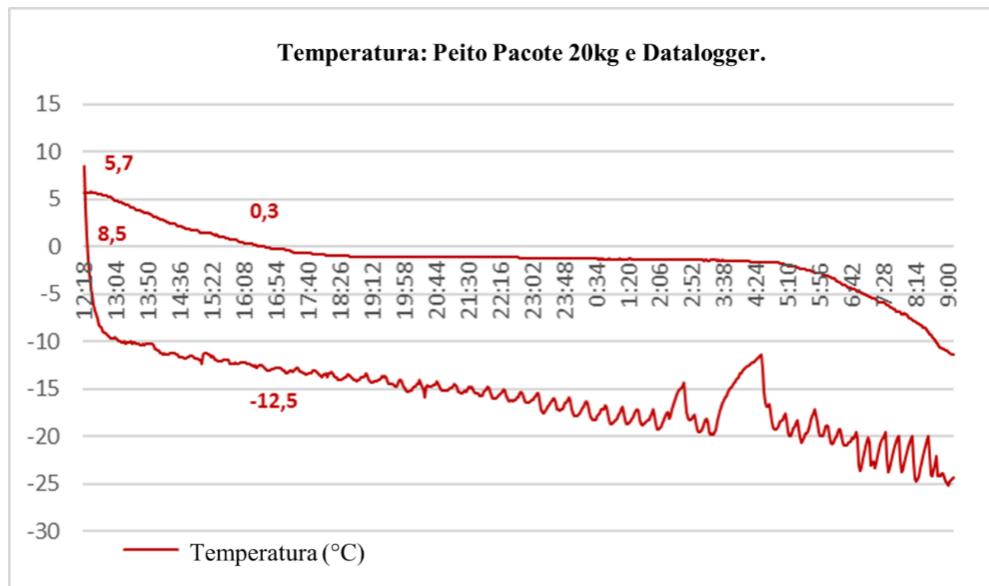
Figura 20 – Datalogger de temperatura.



Fonte: Datalogger temperatura – Tecnoferramentas [27].

Para a análise feita, o túnel de congelamento estava trabalhando em uma temperatura de regime de $-34,4^{\circ}\text{C}$. Durante o teste, o produto teve uma saída de temperatura em $-11,4^{\circ}\text{C}$ e o datalogger registrou uma temperatura de $-25,2^{\circ}\text{C}$, uma diferença de $13,8^{\circ}\text{C}$ entre os dois. É importante ressaltar que o tempo de retenção dentro do túnel ficou próximo de 20 horas. O registro de temperatura do datalogger e do produto pode ser visto na figura 21.

Figura 21 – Registro de temperatura do datalogger e do produto.



Fonte: Autor.

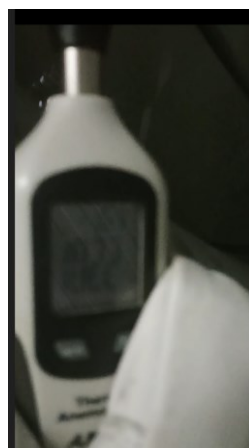
Ademais, também foi realizado a análise da vazão de ar proporcionado pelas hélices dos ventiladores originais do túnel em relação aos dados de projeto (informado na figura 16) e relacionado com a capacidade de carga do motor do ventilador. A análise pode ser vista na tabela 01 e a medição de vazão de ar, medição da corrente do motor e a placa podem ser vistas nas figuras 22, 23, respectivamente (foram feitos três ensaios e considerado o valor médio).

Tabela 1 – Análise da vazão de ar proporcionado pela hélice e carga do motor.

Parâmetro	Velocidade de projeto	Velocidade atual	Corrente de placa do motor	Corrente atual
Unidade	m/s	m/s	A	A
Medição	13,44	11,4	34,9	28,22
Relação (atual/projeto)	85%		81%	

Fonte: Autor.

Figura 22 – Medição da velocidade.



Fonte: Autor.

Figura 23 – Placa do motor.



Fonte: Autor.

A hélice original do TCA é feita de alumínio e pesa 60kg. Em caso de manutenção/substituição, é necessário a presença de três operadores para retirar e transportar cada hélice, podendo proporcionar um risco de acidente devido ao peso. A figura da hélice original do TCA, de alumínio, pode ser vista na figura 24.

Figura 24 – Hélice de alumínio – 60kg.



Fonte: Autor.

Diante dos dados levantados, foi constatado uma baixa vazão de ar das hélices, sendo diferente da vazão de projeto, em uma relação de 15% a menor. Além disso, também foi confirmado que o motor apresentou uma carga menor que a informação de placa, em uma relação de 19% a menor. Outro fator importante é que, além do peso da hélice, não é possível realizar o ajuste de ângulo das pás, o qual é de 15°.

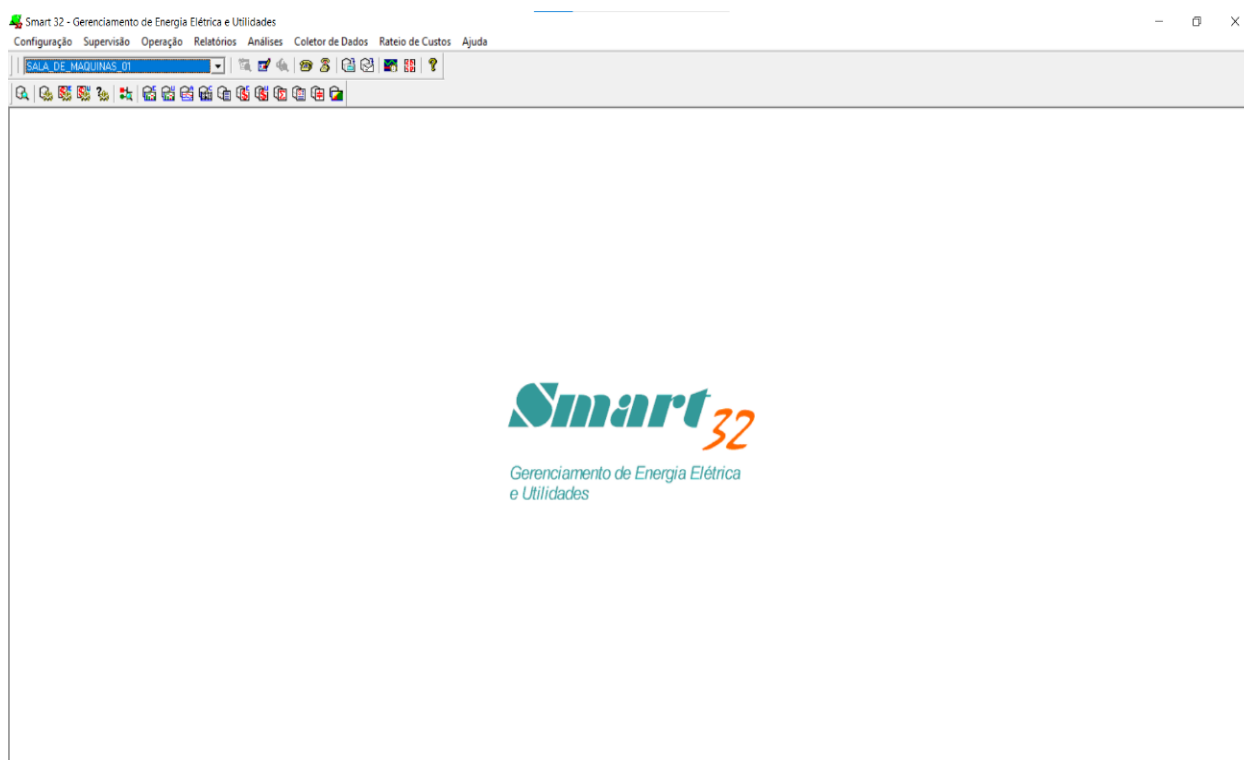
3.2.1 CONSUMO ANTES

Após os dados levantados, torna-se possível fazer uma análise do consumo de energia gasto no processo. Será trabalhado, nesse estudo de caso, o consumo de energia através do sistema de monitoramento de energia elétrica, presente nessa indústria, e o consumo teórico, calculado.

3.2.2 CONSUMO MONITORADO

Inicialmente, a indústria apresenta dois principais *softwares* responsáveis pelo monitoramento do consumo de energia no processo: o *Smart32* e o *WebEnergy*. O primeiro é responsável pelo monitoramento dos processos individuais como, por exemplo, os TCAs, as câmaras de estocagem, e demais procedimentos. Já o segundo, é o responsável pelo monitoramento do parque fabril por completo, semelhante a medição da concessionária de energia. As imagens dos *softwares* podem ser vistas nas figuras 25 e 26.

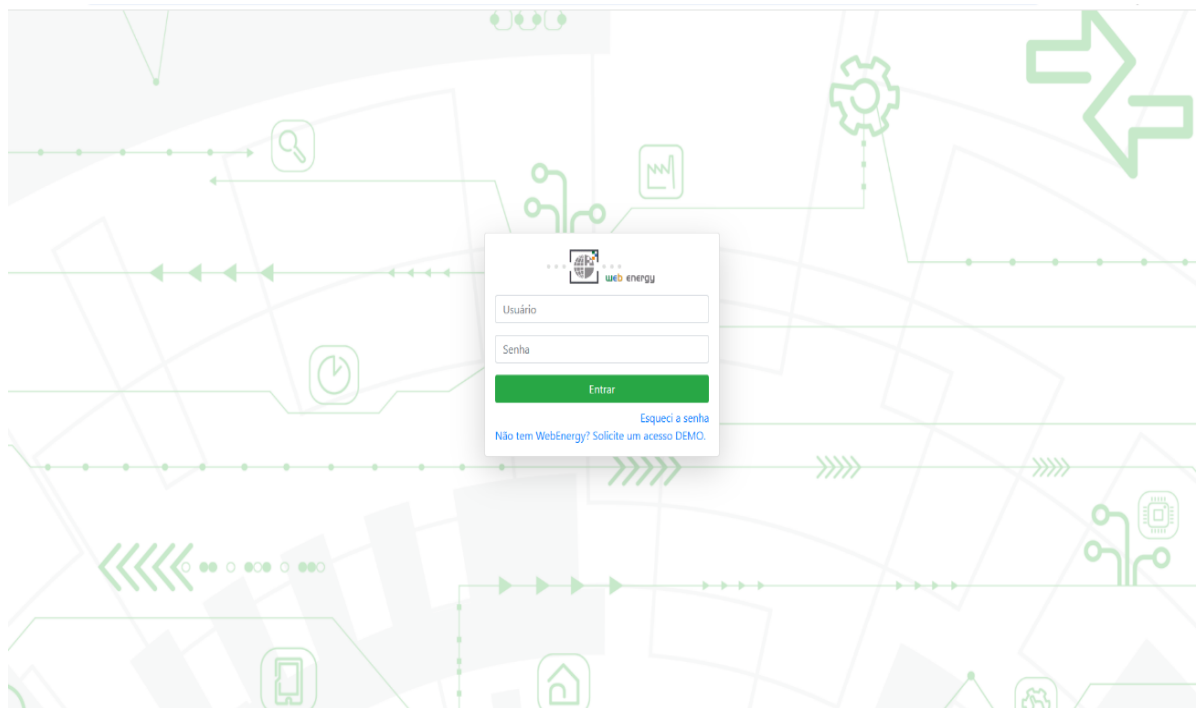
Figura 25 – Software Smart32.



Fonte: Autor.

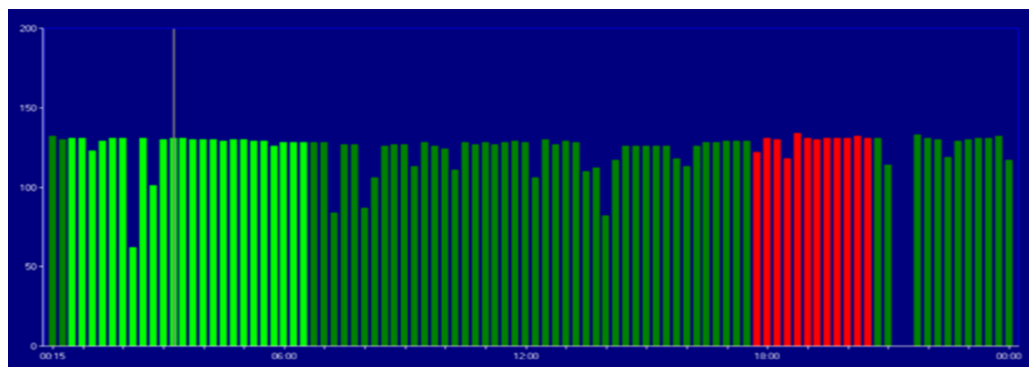
Dessa forma, utilizando o *Smart32*, foi monitorado o consumo de energia no processo de ventilação do TCA e da SLM (Sala de Máquinas) responsável por alimentar o TCA, podendo ser visto nas figuras 27 e 28, respectivamente.

Figura 26 – Software WebEnergy.



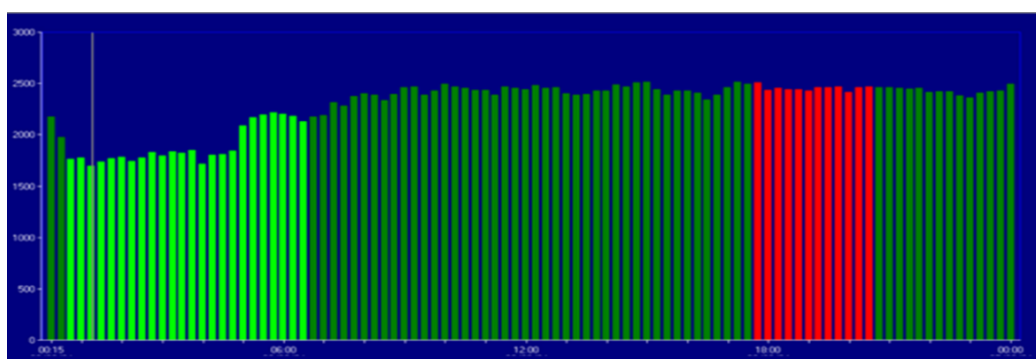
Fonte: Autor.

Figura 27 – Consumo de energia no processo de ventilação do TCA.



Fonte: Autor.

Figura 28 – Consumo de energia da SLM que alimenta o TCA.

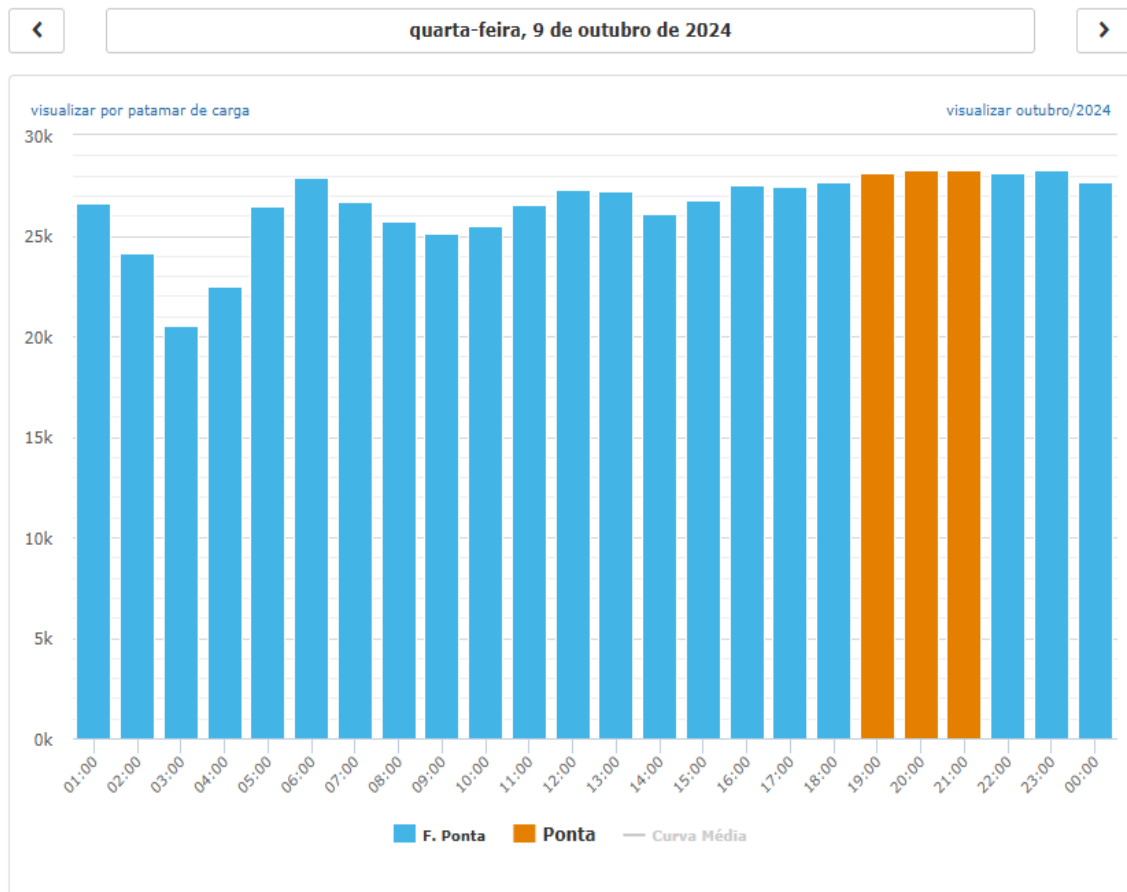


Fonte: Autor.

O consumo de energia no processo de ventilação do TCA foi de 3.810 kWh/dia. Além disso, o consumo de energia da SLM que alimenta o TCA foi de 119.366 kWh/dia.

Sequencialmente, utilizando o *WebEnergy*, foi monitorado o consumo de energia de toda a indústria, podendo ser visto na figura 29.

Figura 29 – Consumo de energia de toda a indústria.



Fonte: Autor.

O consumo de energia de toda a indústria no dia do teste realizado foi de 636.294 kWh.

3.2.3 CONSUMO TEÓRICO

Para uma análise teórica do consumo atual, será calculada a energia dos motores dos ventiladores do sistema de ventilação do TCA. A expectativa é de apresentar um consumo próximo aquele medido, encontrado através da figura 26.

Devido ao fato da SLM que alimenta o TCA estudado também ser responsável por outros sistemas e processos, o mesmo não será calculado teoricamente. Tal fato também se aplica ao consumo de energia de toda a indústria.

Assim, a energia consumida diariamente (em kWh) pelos motores dos ventiladores será encontrada através da multiplicação da potência nominal do motor (cv), o fator de conversão para kW (0,746), o carregamento do motor e as horas de operação dividido pelo rendimento, conforme a equação 02 [30].

$$CM = \frac{P_M * 0,746 * Carregamento * Horas}{n_{motor}} \quad (02)$$

Onde:

CM = Consumo do motor (kWh);

P_M = Potência nominal do motor (cv);

$Carregamento$ = Carregamento (%);

$Horas$ = Horas (h);

n_{motor} = Rendimento do motor (%).

- Cálculo do consumo do motor:

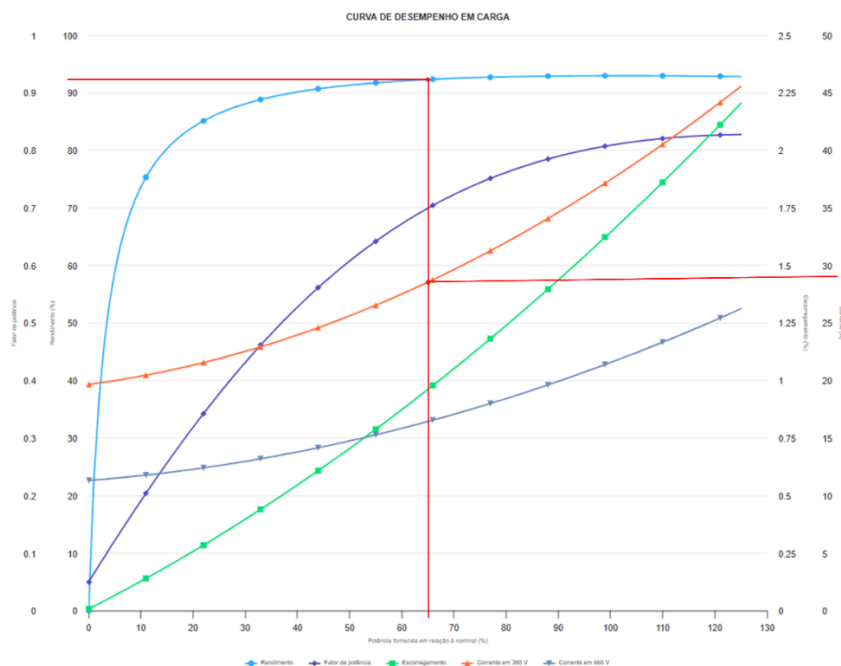
Analisando a curva de rendimento do motor utilizado, disponível na figura 30, com a corrente de operação de 28,22A, foi obtido que ele está operando com um rendimento de 92%, um fator de potência de 0,69 e um carregamento de 65%. Logo o consumo diário do motor será:

$$CM = \frac{25 * 0,746 * 0,65 * 24}{0,92} = 315,21 \text{ kWh/dia}$$

Todavia, tem-se um total de 12 ventiladores no TCA, logo 12 motores:

$$CM (12) = 315,12 * 12 = 3782,54 \text{ kWh/dia}$$

Figura 30 – Curva de rendimento do motor.



Fonte: Motor W22 – WEG [29] (Adaptado autor).

Ao comparar com o consumo monitorado, tem-se a tabela 02, apresentando baixo um erro (%) de 0,72. Assim, é possível dizer que o resultado encontrado é satisfatório.

Tabela 2 – Consumo Monitorado x Consumo Teórico.

Parâmetro	Consumo Monitorado	Consumo Teórico
Unidade	kWh	kWh
Medição	3810	3782,54
Erro (%)	0,72%	

Fonte: Autor.

3.3 TESTES E SOLUÇÕES

Nesta seção será abordada a solução proposta perante os dados levantados anteriormente: a troca das hélices com o objetivo de reduzir o peso, aumentar a vazão de ar e, também, melhorar a segurança de possíveis acidentes com amônia em TCA.

Através do contato com um fornecedor de uma empresa terceira, iniciou-se o estudo de desenvolvimento de uma hélice de maior eficiência e, possivelmente, mais leve, composta por outro material.

Posteriormente, uma hélice de polímero PAG (material capaz de suportar baixas temperaturas) foi desenvolvida e, por sua vez, pesando 14kg cada. Assim, foi possível realizar a substituição da mesma, no TCA, para a realização de um teste inicial e comparar o resultado obtido. A nova hélice de polímero PAG pode ser vista na figura 31.

Figura 31 – Hélices de polímero PAG – 14kg.



Fonte: Autor.

Hélices de ventiladores produzidas com poliamida reforçada com fibra de vidro (conhecida como PAG) têm sido amplamente utilizadas em aplicações industriais devido à sua resistência mecânica, estabilidade dimensional e desempenho confiável em ambientes com temperaturas extremas. Empresas como a Multi-Wing International destacam o uso desse material em sistemas de ventilação, especialmente em ambientes refrigerados, como túneis de congelamento. Nessas condições, o PAG mantém suas propriedades estruturais, sendo uma escolha técnica sólida para garantir eficiência operacional e longevidade do equipamento [32].

Sob condições controladas, como baixa umidade, a durabilidade dessas hélices aumenta consideravelmente. A ausência de degradação por umidade permite que o polímero mantenha sua integridade ao longo do tempo. Estimativas conservadoras indicam uma vida útil entre 10 e 15 anos para essas hélices, considerando boa qualidade do material e práticas adequadas de manutenção. Essa longevidade representa uma vantagem significativa em aplicações industriais onde a confiabilidade e o baixo custo de manutenção são essenciais.

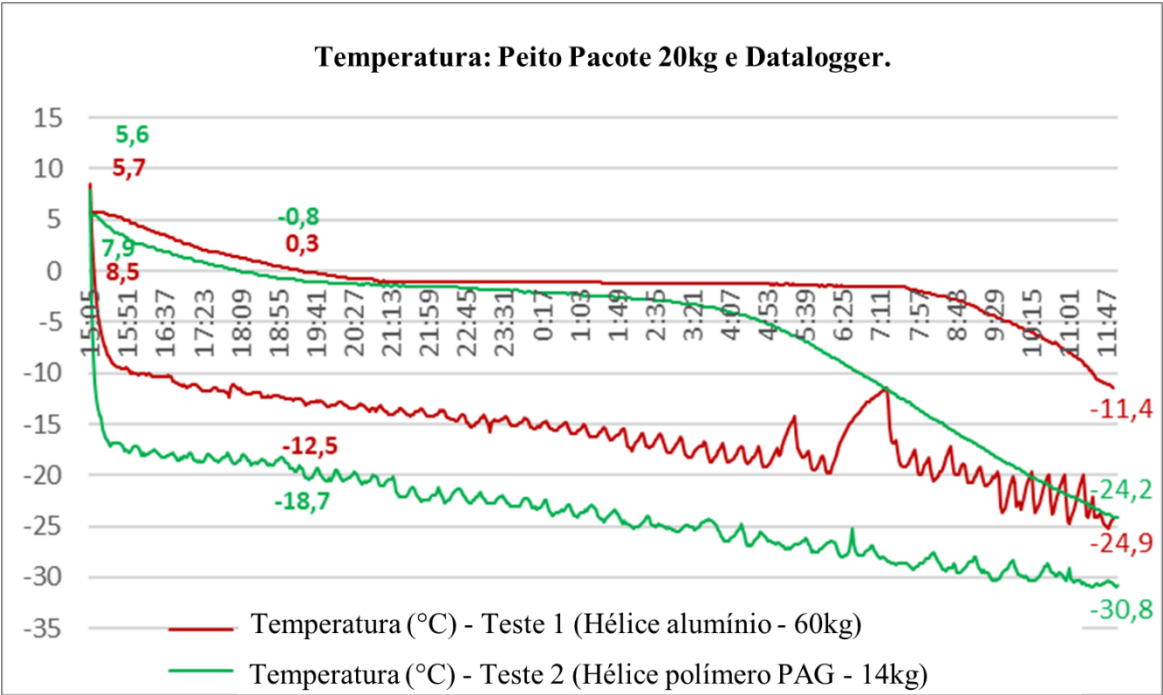
Além disso, avanços no desenvolvimento de materiais reforçados têm aprimorado ainda mais o desempenho do PAG. O sistema de fibra de poliamida tem possibilitado uma estrutura interna mais coesa e estável, funcionando como um “esqueleto” reforçado. Isso reduz deformações e falhas prematuras mesmo sob temperaturas extremas, contribuindo para maior resistência à fadiga térmica e estrutural. Esses aprimoramentos fazem das hélices de PAG uma solução tecnológica de alto desempenho e com excelente custo-benefício para aplicações severas como as encontradas em túneis de congelamento [33].

Para a análise de substituição, foi feito novamente com o Peito Pacote 20kg. Além disso, foi acompanhado de um datalogger de temperatura, ambos no nível 10 do túnel. O Peito Pacote 20kg pode ser visto na figura 19 e o datalogger de temperatura pode ser visto na figura 20.

Assim, o túnel de congelamento estava trabalhando em uma temperatura de regime de -32°C (já demonstrando uma eficiência maior). Durante o teste, o produto teve uma saída de temperatura em $-24,2^{\circ}\text{C}$ e o datalogger registrou uma temperatura de $-30,8^{\circ}\text{C}$, uma diferença de $6,6^{\circ}\text{C}$ entre os dois. É importante ressaltar que o tempo de retenção dentro do túnel ficou próximo de 20 horas. O registro de temperatura do datalogger e do produto pode ser visto na figura 32.

A análise comparativa do antes e depois, comparando o gráfico da figura 24, pode ser vista na tabela 03.

Figura 32 – Registro de temperatura do datalogger e do produto.



Fonte: Autor.

Tabela 3 – Antes e depois do gráfico da figura 24.

ANTES							
Item	Parâmetro	TCA	Nível	Regime de operação	Horário de entrada	Temperatura de entrada	Horário de saída
	Unidade	-	-	°C	Hrs/Dia	°C	°C
PRODUTO	Medição	2	10	-34,4	12/1	5,7	-11,4
DATALOGGER	Medição	2	10	-34,4	12/1	8,5	-25,2

DEPOIS							
Item	Parâmetro	TCA	Nível	Regime de operação	Horário de entrada	Temperatura de entrada	Horário de saída
	Unidade	-	-	°C	Hrs/Dia	°C	°C
PRODUTO	Medição	2	10	-32	15/1	5,6	-24,2
DATALOGGER	Medição	2	10	-32	15/1	7,9	-30,8

Fonte: Autor.

Ademais, a análise comparativa do antes e depois, analisando as velocidades e correntes do motor pode ser vista na tabela 04.

Tabela 4 – Antes e depois da velocidade e corrente do motor.

Parâmetro	Velocidade ANTES	Velocidade DEPOIS	Corrente do motor ANTES	Corrente do motor DEPOIS	Inclinação das pás ANTES	Inclinação das pás DEPOIS
Unidade	m/s	m/s	A	A	°	°
Medição	11,4	14,78	28,22	32,39	15	32,5

Fonte: Autor.

É observado a elevação da inclinação das pás (aumento de 17,5°), fazendo com que seja empurrado uma quantidade maior de ar, exigindo, consequentemente, uma vazão maior e, por sua vez, aumentando o torque do motor, ou seja, aumentando sua carga.

Em suma, nota-se um aumento na eficiência da ventilação (aumento de 3,38 m/s) com as novas hélices de polímero PAG instaladas. Além disso, teve-se, também, um aumento na

corrente do motor, pressupondo um aumento no consumo de energia. Porém, é válido ressaltar que, devido a maior eficiência apresentada, é possível realizar pausas e paradas no sistema de ventilação do túnel sem afetar a qualidade e entrega do produto. Outro fator impactante é o regime de operação do túnel que, operando em -32°C , necessita de uma quantidade menor de máquinas para atuação. Ambos os pontos culminam em uma economia de energia, a qual será vista e detalhada nas próximas seções.

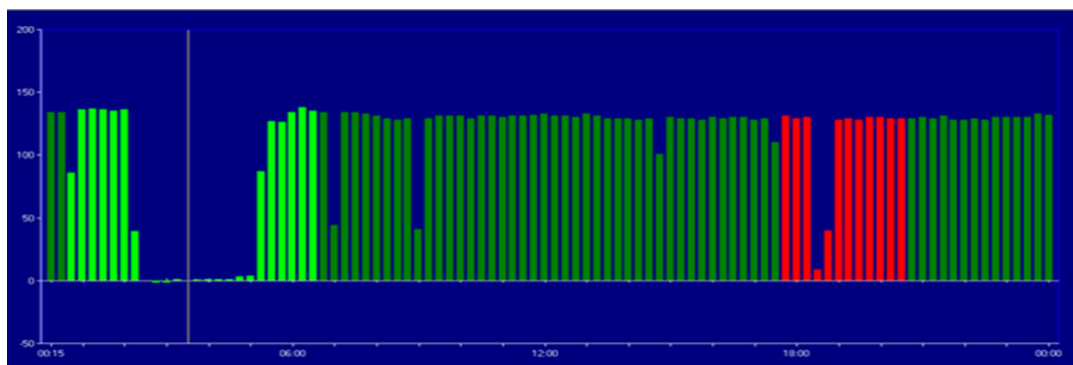
3.3.1 CONSUMO DEPOIS

Após os testes e soluções apresentados, torna-se possível fazer uma análise do consumo de energia gasto no processo. Será trabalhado, nesse estudo de caso, o consumo de energia através do sistema de monitoramento de energia elétrica, presente nessa indústria, e o consumo teórico, calculado.

3.3.2 CONSUMO MONITORADO

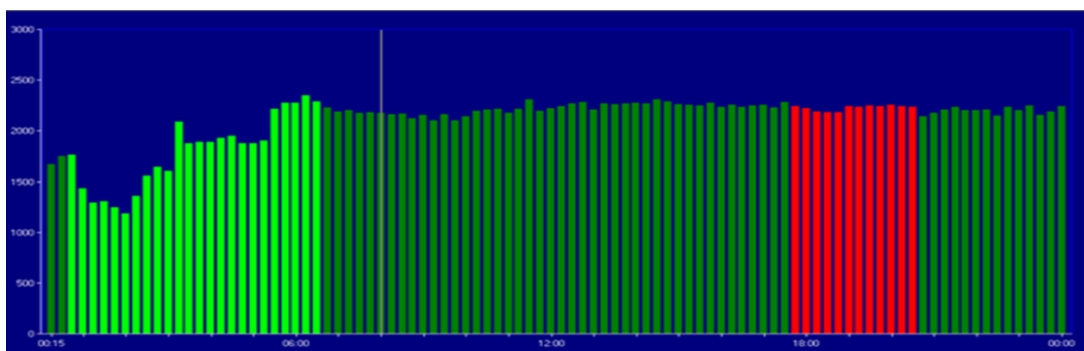
Com os *softwares* vistos anteriormente, o *Smart32* e o *WebEnergy*, foram monitorados os consumos de energia no processo de ventilação do TCA e da SLM responsável por alimentar o TCA, podendo ser visto nas figuras 33 e 34, respectivamente.

Figura 33 – Consumo de energia no processo de ventilação do TCA.



Fonte: Autor.

Figura 34 – Consumo de energia da SLM que alimenta o TCA.

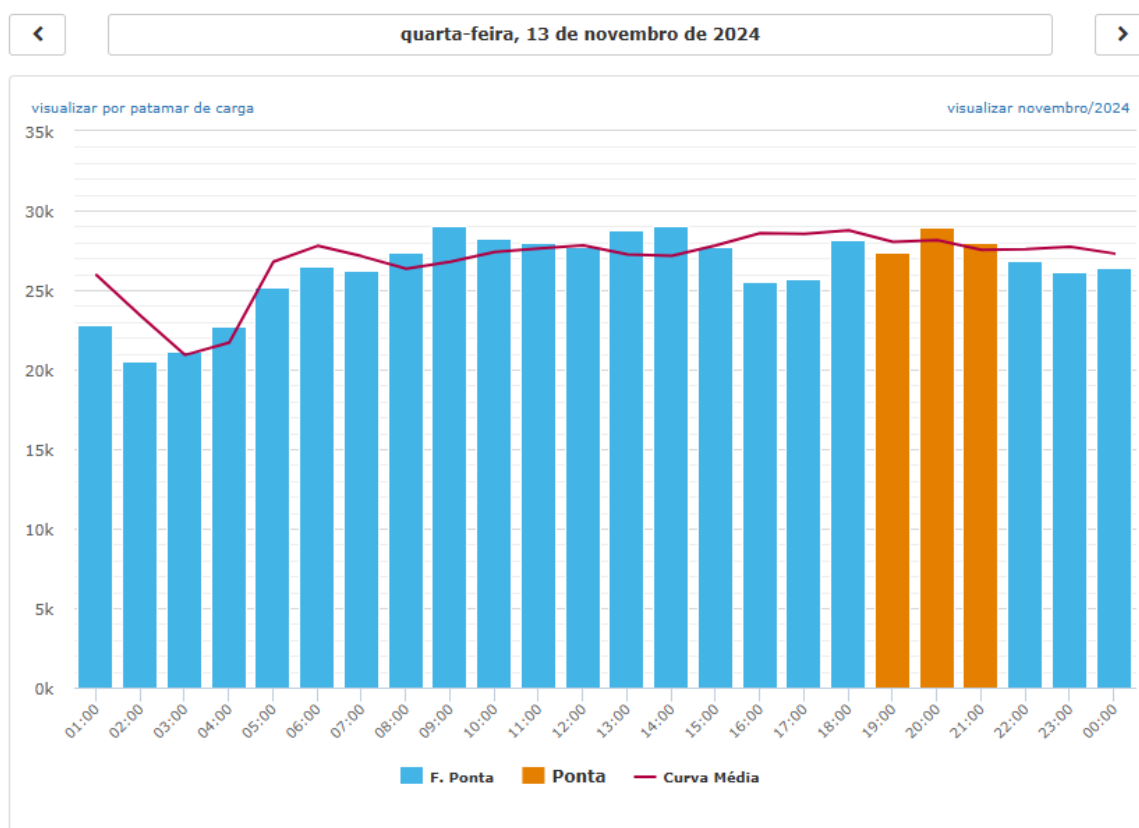


Fonte: Autor.

O consumo de energia no processo de ventilação do TCA foi de 3.798 kWh/dia. Em um primeiro momento, nota-se um aumento do consumo de energia do sistema de ventilação decorrente do aumento da corrente do motor (fruto da mudança do ponto de operação do motor) e, também, tem-se a oportunidade de desligamento do processo de ventilação do TCA em 4,5 horas, podendo verificar visualmente no gráfico da figura 31. Além disso, o consumo de energia da SLM que alimenta o TCA foi de 117.858 kWh/dia, refletindo um consumo menor (1.508 kWh/dia) que o CONSUMO ANTES, devido ao regime de trabalho de -32°C do TCA.

Sequencialmente, utilizando o *WebEnergy*, foi monitorado o consumo de energia de toda a indústria, podendo ser visto na figura 35.

Figura 35 – Consumo de energia de toda a indústria.



Fonte: Autor.

O consumo de energia de toda a indústria no dia do teste realizado foi de 634.197 kWh, onde há o reflexo do consumo menor, visto na SLM que alimenta o TCA.

3.3.3 CONSUMO TEÓRICO

Para uma análise teórica do consumo atual, será calculada a energia dos motores dos ventiladores do sistema de ventilação do TCA. A expectativa é de apresentar um consumo próximo aquele medido, encontrado através da figura 32.

Devido ao fato da SLM que alimenta o TCA estudado também ser responsável por outros sistemas e processos, o mesmo não será calculado teoricamente. Tal fato também se aplica ao consumo de energia de toda a indústria.

Assim, a energia consumida diariamente (em kWh) pelos motores dos ventiladores será encontrada através da equação 02.

- Cálculo do consumo do motor:

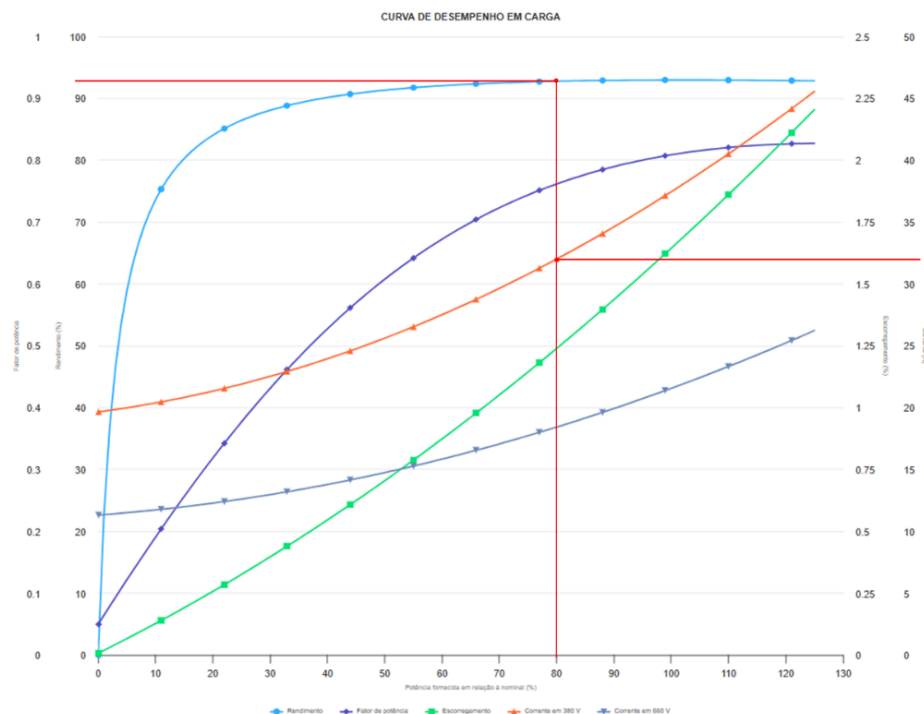
Analisando a curva de rendimento do motor utilizado, disponível na figura 36, com a corrente de operação de 32,39A, foi obtido que ele está operando com um rendimento de 93%, um fator de potência de 0,76 e um carregamento de 80%. Logo o consumo diário do motor será:

$$CM = \frac{25 * 0,746 * 0,80 * 19,5}{0,93} = 312,84 \text{ kWh/dia}$$

Todavia, tem-se um total de 12 ventiladores no TCA, logo 12 motores:

$$CM (12) = 312,84 * 12 = 3754,07 \text{ kWh/dia}$$

Figura 36 – Curva de rendimento do motor.



Fonte: Motor W22 – WEG [29] (Adaptado autor).

Ao comparar com o consumo monitorado, tem-se a tabela 05, apresentando baixo um erro (%) de 1,16. Assim, é possível dizer que o resultado encontrado é satisfatório.

Tabela 5 – Consumo Monitorado x Consumo Teórico.

Parâmetro	Consumo Monitorado	Consumo Teórico
Unidade	kWh	kWh
Medição	3798	3754,06
Erro (%)	1,16%	

Fonte: Autor.

4 ANÁLISE ECONÔMICA

Nesta seção será apresentada uma análise econômica completa diante do levantamento de dados e, também, dos testes e soluções realizados. Inicialmente, será visto e apresentado a economia em energia realizada no processo de refrigeração da indústria no estudo de caso. Posteriormente, os ganhos financeiros serão demonstrados através da economia financeira, com o cálculo do tempo de retorno do investimento, ou seja, o *payback*.

4.1 ECONOMIA EM ENERGIA

Para a economia em energia, a qual foi realizada no processo de refrigeração da indústria, será possível encontrar a economia anual com a oportunidade e melhoria desenvolvida.

Diante disso, é importante mencionar que será considerado a economia existente através do sistema de ventilação e, a mais expressiva, a economia existente na SLM responsável por alimentar o TCA através da mudança de regime de operação. É válido ressaltar que não será considerada a economia de energia presente em toda a indústria devido a presença de vários outros processos, ao quais podem influenciar no resultado encontrado.

Além disso, foi encontrado o consumo de energia diário, em dia produtivo. Para o cálculo anual, serão considerados 23 dias produtivos por mês. Isso é feito para desconsiderar os dias em que o processo produtivo está parado, ou seja, os feriados, os domingos e alguns sábados. Multiplicando a quantidade de dias considerados pela quantidade de meses no ano, encontra-se a quantidade de dias no ano:

- Quantidade de dias no ano:

$$QTD = 23 * 12 = 276 \text{ dias/ano}$$

Consumos ao longo do levantamento de dados (antes):

- Consumo diário da ventilação antes (monitorado):

$$CDVA (\text{monitorado}) = 3.810 \text{ kWh/dia}$$

- Consumo diário da ventilação antes (teórico):

$$CDVA (teórico) = 3.782,54 \text{ kWh/dia}$$

- Consumo diário da SLM antes (monitorado):

$$CDSLMA (monitorado) = 119.366 \text{ kWh/dia}$$

Multiplicando o consumo diário pela quantidade de dias, tem-se o consumo anual:

- Consumo anual da ventilação antes (monitorado):

$$CAVA (monitorado) = 3.810 * 276 = 1.051.560 \text{ kWh/ano}$$

- Consumo anual da ventilação antes (teórico):

$$CAVA (teórico) = 3.782,54 * 276 = 1.043.981,04 \text{ kWh/ano}$$

- Consumo anual da SLM antes (monitorado):

$$CASLMA (monitorado) = 119.366 * 276 = 32.945.016 \text{ kWh/ano}$$

Consumos ao longo dos testes e soluções de dados (depois):

- Consumo diário da ventilação depois (monitorado):

$$CDVD (monitorado) = 3.798 \text{ kWh/dia}$$

- Consumo diário da ventilação depois (teórico):

$$CDVD (teórico) = 3.754,06 \text{ kWh/dia}$$

- Consumo diário da SLM depois (monitorado):

$$CDSLMD (monitorado) = 117.858 \text{ kWh/dia}$$

Multiplicando o consumo diário pela quantidade de dias, tem-se o consumo anual:

- Consumo anual da ventilação depois (monitorado):

$$CAVD (monitorado) = 3.798 * 276 = 1.048.248 \text{ kWh/ano}$$

- Consumo anual da ventilação depois (teórico):

$$CAVD (teórico) = 3.754,06 * 276 = 1.036.120,56 \text{ kWh/ano}$$

- Consumo anual da SLM depois (monitorado):

$$CASLMD \text{ (monitorado)} = 117.858 * 276 = 32.528.808 \text{ kWh/ano}$$

Em suma, torna-se possível encontrar a economia total anual entre antes e depois, considerando o sistema de ventilação e a SLM.

- Consumo total anual antes:

$$CTAA = CAVA \text{ (monitorado)} + CASLMA \text{ (monitorado)}$$

$$CTAA = 1.051.560 + 32.945.016 = 33.996.576 \text{ kWh/ano}$$

- Consumo total anual depois:

$$CTAD = CAVD \text{ (monitorado)} + CASLMD \text{ (monitorado)}$$

$$CTAD = 1.048.248 + 32.528.808 = 33.577.056 \text{ kWh/ano}$$

Realizando a diferença entre ambos, é encontrado a economia em energia.

- Economia em energia:

$$EE = CTAA \text{ (monitorado)} - CTAD \text{ (monitorado)}$$

$$EE = 33.996.576 - 33.577.056 = 419.520 \text{ kWh/ano}$$

4.2 ECONOMIA FINANCEIRA

Para a economia financeira e encontrar o tempo de retorno do investimento, payback, é preciso coletar algumas informações iniciais como, por exemplo, o valor de cada hélice comprada, a tarifa de energia paga pela indústria e a taxa de juros anual.

Inicialmente, foi cotado com a empresa terceira fornecedora das hélices de polímero PAG, sendo R\$ 5.739,48 cada, em um total de 12 hélices novas.

Para a tarifa de energia, foi considerado a tarifa média dos últimos 12 meses, sendo de 0,25416 R\$/kWh. É importante ressaltar que o valor baixo da tarifa se dá pelo fato de que uma indústria alimentícia é isenta do pagamento do imposto de ICMS, o qual representa 18% da fatura em MG.

Além disso, será considerado uma taxa de juros anual (i) de 6% nesse estudo.

- Custo total das hélices:

$$CTH = 5.739,48 * 12 = 68.873,76 \text{ reais}$$

Para a economia financeira, basta multiplicar a economia em energia pela tarifa média anual:

- Economia financeira:

$$EF = EF * 0,25416 = 419.520 * 0,25416 = 106.625,20 \text{ reais}$$

Para o cálculo do tempo de retorno do investimento, payback, será utilizada a equação 03 [30].

$$TR = \frac{\log(\frac{EF}{EF-CTH*i})}{\log(1+i)} \quad (03)$$

Onde:

TR = Tempo de retorno de investimento (anos);

EF = Economia financeira (reais);

CTH = Custo total das hélices (reais);

i = Taxa de juros anual (%).

- Tempo de retorno de investimento:

$$TR = \frac{\log(\frac{106.625,20}{106.625,20 - 68.873,76 * 0,06})}{\log(1 + 0,06)} = 0,677 \text{ anos}$$

Logo, o tempo de retorno do investimento é de 0,677 anos, ou de 8 meses e 4 dias.

5 RESULTADOS

Após o estudo de caso realizado e análise econômica feita, torna-se possível verificar alguns resultados obtidos, seja voltado para o tema foco, a eficiência energética, ou benefícios gerais apresentados.

Voltado para a eficiência energética, notou-se que a melhoria aplicada (substituição das hélices dos ventiladores) fez com que o motor pudesse trabalhar com uma corrente próxima à corrente nominal, visto que seu dimensionamento não estava correto.

Diante disso, com a mudança do ponto de operação de motor, sendo mais otimizado, foi possível obter um dimensionamento melhor, o qual ocasionou o aumento da corrente dos motores dos ventiladores de 28,22A para 32,39A (aumento de 14,77%) e, conseqüentemente, uma elevação no consumo de energia. Porém, como visto inicialmente, eficiência energética não é apenas reduzir o consumo de energia, de modo geral. A troca das hélices, mesmo provocando o consumo maior, provou uma maior eficiência no sistema de ventilação do TCA, aumentando a velocidade do ar e, dessa maneira, uma melhor eficiência no congelamento dos produtos.

De acordo com o teste realizado, os Pacotes Peito 20Kg, no nível 10, pacotes com maiores dificuldades para congelamento, apresentaram um melhor desempenho, saindo de -11,4°C para -24,9°C, frente a temperatura de congelamento de saída (redução de 54,22%) e 20 horas de retenção. Assim, tal desempenho melhor proporcionou o desligamento do sistema de ventilação do TCA em 4,5 horas.

Com isso, mesmo com a mudança no ponto de operação do motor, o desligamento do sistema proporcionou uma economia de energia, saindo de 3.810kWh/dia (monitorado) para 3.798kWh/dia (monitorado) (redução de 0,32%).

Além disso, tais pontos citados proporcionaram um aumento no regime de operação da SLM, saindo de -34,4°C para -32°C (aumento de 7,5%). Consequentemente, a elevação do regime de operação permite a operação com uma quantidade menor de máquinas e, assim, um consumo menor de energia, saindo de 119.336 kWh/dia para 117.858 kWh/dia (redução de 1,25%).

Após as melhorias realizadas e ganhos operacionais, toda uma análise econômica foi feita. Ao todo, estimou-se uma economia de 419.520 kWh/ano. Pode-se dizer que é uma economia de energia bem expressiva, representando cerca de 66,15% de todo um dia produtivo da indústria estudada.

Além da economia energética direta, outro benefício observado foi a melhoria na estabilidade operacional do sistema como um todo. A otimização dos ventiladores reduziu a necessidade de acionamentos frequentes e variações bruscas de carga, o que contribui para uma menor solicitação térmica e elétrica dos componentes. Isso, por sua vez, tende a prolongar a vida útil dos motores e equipamentos auxiliares, reduzindo custos com manutenção corretiva e paradas não programadas, fatores que afetam diretamente a produtividade da planta industrial.

A economia financeira encontrada resultou em um montante de R\$ 106.625,20, que diante do investimento realizado proporcionou um tempo de retorno de apenas 0,677 anos (8 meses e 4 dias). Com o retorno operacional imediato das melhorias, ao contrário de investimentos que demandam longos períodos para apresentar resultados, onde a troca das hélices proporcionou efeitos visíveis já nos primeiros ciclos de operação. A combinação de economia energética, melhoria na qualidade do congelamento e redução do tempo de operação reforça a eficiência da intervenção e evidencia como ajustes pontuais podem trazer benefícios significativos em curto prazo.

Além dos ganhos técnicos e econômicos, a intervenção também demonstrou impactos positivos na organização e controle do processo produtivo. Com o congelamento mais eficiente e previsível, tornou-se possível planejar melhor a sequência de produção e o tempo de ocupação das câmaras, otimizando o fluxo de entrada e saída dos produtos. Isso contribui para uma maior rotatividade e melhor aproveitamento da capacidade instalada, beneficiando a logística interna e a gestão dos estoques.

Com a padronização do desempenho do sistema, passou-se a apresentar resultados mais consistentes após a intervenção. Isso facilita o monitoramento contínuo da eficiência operacional e permite identificar rapidamente eventuais desvios no processo, o que é essencial para a manutenção de um ambiente produtivo controlado e confiável. Essa estabilidade também reforça a segurança dos processos, especialmente em ambientes onde o controle térmico é fator crítico de qualidade.

Por último, mas não menos importante, é válido mencionar o ganho de segurança com a instalação para com os riscos com vazamentos de amônia isso, pois, as hélices de polímero PAG são mais leves frente as outras utilizadas anteriormente. Tal fato é que, ao longo dos testes, foi identificado que a rampa de aceleração na partida do motor estava muito curta, provocando uma rápida tração na hélice, quebrando os parafusos de suporte e desbalanceado, ocasionando a quebra das lâminas. Todavia, não houve nenhum dano ocasionado ao TCA. Diante disso, como medida corretiva, tratou-se com o fornecedor a substituição dos parafusos para o material de aço inox, bem como, a correção da rampa de partida na soft-starter para 15 segundos, podendo ser vista na figura 37.

Figura 37 – Rampa de partida na soft-starter em 15 segundos.



5.1 OPORTUNIDADES FUTURAS

Diante dos resultados apresentados, cabe levantar algumas oportunidades futuras para a melhoria aplicada. Inicialmente, estima-se replicar o sistema feito nos outros TCAs de mesmo modelo na unidade de Uberlândia/MG. Assim, tem-se mais dois túneis de congelamento que permitem a substituição das hélices no sistema de ventilação, os quais consequentemente podem proporcionar bons retornos, seja com uma economia de energia e, posteriormente, uma economia financeira com a redução de custos.

Além disso, outro aspecto fundamental, é a formalização da melhoria feita de modo que a mesma possa ser aplicada nas demais unidades da companhia e, desse modo, escalonar todo o ganho apresentado nesse trabalho para as demais unidades, sejam as unidades nacionais e, também, internacionais. Em suma, com a divulgação dos resultados e metodologia adotada nesse projeto, pode fortalecer a integração entre as unidades da empresa, promovendo o compartilhamento de boas práticas e soluções inovadoras.

Também é válido considerar a realização de estudos comparativos entre os túneis otimizados e os ainda não modificados, a fim de aprofundar a análise dos resultados obtidos. Esses estudos podem fornecer dados ainda mais precisos sobre o impacto da substituição das hélices em diferentes condições operacionais, fortalecendo a justificativa técnica para a expansão do projeto em outras unidades.

A capacitação técnica das equipes de manutenção e operação quanto à nova configuração dos ventiladores e seus impactos no processo irá se tornar fundamental. O conhecimento detalhado sobre as alterações realizadas possibilita uma operação mais eficiente e segura, além de fortalecer a autonomia da equipe local para replicar, ajustar ou até mesmo propor novas melhorias. Dessa forma, a companhia não apenas amplia os benefícios do projeto, como também consolida uma cultura interna voltada à inovação e à eficiência operacional.

Por fim, também serão avaliadas oportunidades voltadas para a implementação de novas tecnologias, por exemplo, através da substituição das soft-starters existentes por inversores de frequências, possibilitando, dessa maneira, uma ventilação variável e, assim, buscando novamente oportunidades na redução do consumo de energia em TCAs.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A melhoria aplicada serviu como base para repensar outras oportunidades de otimização dentro da planta, incentivando uma cultura voltada à eficiência energética e à melhoria contínua. A experiência positiva obtida com essa intervenção simples, porém bem planejada,

demonstra que ações pontuais podem gerar impactos significativos e mensuráveis, tanto em termos técnicos quanto econômicos, tornando-se referência para decisões futuras dentro da indústria.

A abordagem adotada reforça a importância de olhar para os processos com uma visão crítica e analítica, identificando gargalos e oportunidades mesmo em operações já consolidadas. Muitas vezes, os maiores ganhos em eficiência não estão em grandes investimentos, mas em ajustes estratégicos que exigem conhecimento técnico, análise de dados e comprometimento com a melhoria contínua. Nesse sentido, a intervenção realizada mostra que é possível gerar resultados relevantes com baixo custo e alta viabilidade prática.

Com o apoio da liderança técnica e operacional, criou-se um ambiente favorável à inovação, onde sugestões de melhoria passaram a ser mais valorizadas e consideradas. Esse movimento fortalece a cultura organizacional voltada à sustentabilidade e à otimização dos recursos disponíveis, o que é essencial em um cenário industrial cada vez mais competitivo e exigente. O reconhecimento do potencial de mudanças simples contribui também para o engajamento das equipes envolvidas na rotina produtiva.

O impacto positivo da melhoria também reforça a importância da coleta e análise de dados como ferramenta de tomada de decisão. A observação sistemática dos indicadores de desempenho, como consumo energético, temperatura final dos produtos e tempo de operação, possibilitou a identificação clara de ganhos reais. Essa abordagem baseada em evidências evita decisões baseadas apenas em percepção ou experiência, tornando o processo mais objetivo e eficaz.

Além disso, os resultados reforçam a necessidade de revisar rotinas de manutenção e operação, pois, mesmo com equipamentos adequados, práticas mal conduzidas podem comprometer o desempenho energético. A melhoria aplicada também motivou uma reavaliação de procedimentos internos, promovendo a adoção de boas práticas operacionais que asseguram maior durabilidade dos equipamentos e melhor aproveitamento energético.

Outro fator de destaque foi a interdisciplinaridade da iniciativa, que envolveu áreas como engenharia, produção, manutenção e segurança do trabalho. A atuação conjunta desses setores foi essencial para garantir que a intervenção fosse tecnicamente viável, operacionalmente segura e financeiramente justificável. Essa integração é um diferencial importante quando se busca aplicar melhorias de forma ampla e sustentável.

A replicação do projeto em outras unidades da empresa surge como um desdobramento natural dessa iniciativa. A padronização da melhoria, associada a um sistema estruturado de monitoramento e avaliação, permite que os resultados alcançados se tornem escaláveis e consistentes. Assim, não apenas se garante uma economia energética ampliada, mas também se estabelece um modelo replicável de gestão de eficiência, que pode ser aplicado a outros setores e processos da organização.

Além dos ganhos operacionais e financeiros, o projeto fortalece a imagem da empresa frente a critérios de sustentabilidade e responsabilidade ambiental. A redução do consumo de energia, mesmo que em pequena escala por intervenção, representa um avanço em direção a metas ambientais mais amplas, contribuindo para certificações e para o cumprimento de compromissos assumidos em políticas corporativas de ESG (Environmental, Social and Governance).

Por fim, a intervenção demonstra como a engenharia pode atuar de forma estratégica dentro do setor industrial, alinhando performance técnica, viabilidade econômica e impacto ambiental positivo. A melhoria realizada, mesmo localizada, serve como exemplo da importância de unir conhecimento técnico à tomada de decisão inteligente, criando um ciclo virtuoso de aprendizado, eficiência e progresso sustentável.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – Raízen. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/eficiencia-energetica>. Acesso em 23 abr. 2025.
- [02] QUEM É QUEM DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL – Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/quem-e-quem>. Acesso em 23 abr. 2025.
- [03] OS SETOR COM MAIOR CONSUMO DE ENERGIA NO BRASIL – Pacto Energia. Disponível em: <https://pactoenergia.com.br/blog/energia/setores-com-maior-consumo-de-energia-no-brasil>. Acesso em 23 abr. 2025.
- [04] COMO REDUZIR GASTOS COM ENERGIA NO MEU FRIGORÍFICO? – Simple Energy. Disponível em: <https://simpleenergy.com.br/como-reduzir-gastos-com-energia-no-meu-frigorifico>. Acesso em 23 abr. 2025.

- [05] O QUE É ENERGIA – Eletronuclear Energia Limpa. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/O-que-e-Energia.aspx>. Acesso em 23 abr. 2025.
- [06] EVOLUÇÃO DA ENERGIA AO LONGO DA HISTÓRIA – Khan Academy. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/7-ano/desenvolvimento-tecnologico/as-maquinas-termicas/a/evolucao-do-uso-da-energia-ao-longo-da-historia>. Acesso em 23 abr. 2025.
- [07] HISTÓRIA DA ELETRICIDADE – Mundo Educação UOL. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/a-historia-eletricidade.htm>. Acesso em 23 abr. 2025.
- [08] PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA – Brasil Escola UOL. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/primeira-lei-da-termodinamica.htm>. Acesso em 23 abr. 2025.
- [09] EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA – CURY, Yasmin. 2022. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.
- [10] SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA – Brasil Escola UOL. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/segunda-lei-da-termodinamica.htm>. Acesso em 23 abr. 2025.
- [11] MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA – Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em 23 abr. 2025.
- [12] EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: ESTRATÉGIAS, BENEFÍCIOS E INOVAÇÕES – Edenred. Disponível em: <https://blog.edenredmobilidade.com.br/gestao-de-frotas/eficiencia-energetica>. Acesso em 24 abr. 2025.
- [13] EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA E NAS RESIDÊNCIAS – Estudos da Demanda - EPE. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-270/20100809_4%5B1%5D.pdf. Acesso em 24 abr. 2025.
- [14] EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: O DIFERENCIAL COMPETITIVO PARA AS INDÚSTRIAS BRASILEIRAS – Comerc. Disponível em:

<https://www.comerc.com.br/panorama/eficiencia-energetica-o-diferencial-competitivo-para-as-industrias-brasileiras>. Acesso em 24 abr. 2025.

[15] EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (EE) NO BRASIL E NO MUNDO: MECANISMOS DAS POLÍTICAS DE EE EM UNIDADES CONSUMIDORAS INTENSIVAS DE ELETRICIDADE – Climate Policy Initiative. Disponível em: <https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2023/01/230117-REL-GIZ-Mecanismos-de-EE.pdf>. Acesso em 24 abr. 2025.

[16] U4E: CONHEÇA A UNIÃO PELA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA LIGERADA PELO PNUMA – Nações Unidas, Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/194726-u4e-conhe%C3%A7a-uni%C3%A3o-pela-efici%C3%Aancia-energ%C3%A9tica-liderada-pelo-pnuma>. Acesso em 24 abr. 2025.

[17] BRASIL QUASE OCUPA LANTERNA EM RANKING DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – Quimicryl. Disponível em: <https://www.quimicryl.com.br/brasil-quase-ocupa-lanterna-em-ranking-de-eficiencia-energetica>. Acesso em 24 abr. 2025.

[18] CONHEÇA MAIS SOBRE A ETIQUETA DO PBE – Inmetro. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/conheca-mais-sobre-a-etiqueta-do-pbe>. Acesso em 24 abr. 2025.

[19] EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>. Acesso em 24 abr. 2025.

[20] EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES – UNIFEI. Disponível em: https://www.voltimum.com.br/sites/www.voltimum.com.br/files/pdflibrary/01_livro_eficiencia_energetica.pdf. Acesso em 24 abr. 2025.

[21] REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL: PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES – Apema. Disponível em: <https://apema.com.br/blog/refrigeracao-industrial-principios-e-aplicacoes/>. Acesso em 24 abr. 2025.

[22] FLUÍDOS REFRIGERANTES NATURAIS – CETESB. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/prozonesp/wp-content/uploads/sites/16/2014/02/fluidos.pdf>. Acesso em 25 abr. 2025.

- [23] BOAS PRÁTICAS DE REFRIGERAÇÃO – SENAI. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/apostila-boas-praticas-de-refrigeracao-senai-44-pg-br/48993735>. Acesso em 25 abr. 2025.
- [24] TÚNEL DE CONGELAMENTO: O QUE É, CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES EM LOGÍSTICA – Mecalux. Disponível em: <https://www.mecalux.com.br/blog/tuneis-congelamento>. Acesso em 28 abr. 2025.
- [25] TÚNEL DE CONGELAMENTO E SUAS APLICAÇÕES – MultiFrio. Disponível em: <https://www.multifrio.com.br/conteudo/tunel-de-congelamento-e-suas-aplicacoes.html>. Acesso em 28 abr. 2025.
- [26] O QUE É O CLICLO PLAN-DO-CHECK-ACT? – Businessmap. Disponível em: <https://businessmap.io/pt/gestao-lean/melhoria/o-que-e-o-ciclo-pdca>. Acesso em 28 abr. 2025.
- [27] DATALOGGER TEMPERATURA – Tecnoferramentas. Disponível em: https://www.tecnoferramentas.com.br/datalogger-temperatura--40-a-70-c-umidade-0-a-100-rh-atende-norma-rdc304-novotest-by-cem-dt-172-078628_0/p. Acesso em 29 abr. 2025.
- [28] MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO – Engelogic. Disponível em: <https://www.engelogic.com.br/download/motor-eletrico-inducao.pdf>. Acesso em 29 abr. 2025.
- [29] MOTOR W22 – WEG. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Uso-Geral/W22/W22-/W22-IR3-Premium-25-cv-6P-180L-3F-220-380-440-V-60-Hz-IC411---TFVE---B14D/p/12219871>. Acesso em 29 abr. 2025.
- [30] EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – UFU. Anotações de aula – FERREIRA, Sérgio.
- [31] SOFTW STARTER SSW07 – WEG. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Soft-Starters/Uso-geral/Soft-Starter-SSW07/Soft-Starter-SSW07/p/MKT_WDC_BRAZIL_PRODUCT_SOFT_STARTERS_SSW07. Acesso em 03 jun. 2025.
- [32] THE WIND OF CHANGE THROUGH LONG GLASS FIBRES IN FAN IMPELLERS. Disponível em: <https://textile-future.com/archives/39006>. Acesso em 03 jun. 2025.

- [33] THE WIND OF CHANGE THROUGH LONG GLASS FIBRES IN FAN IMPELLERS. Disponível em: <https://lectura.press/en/article/the-wind-of-change-through-long-glass-fibers-in-fan-impellers/13473>. Acesso em 03 jun. 2025.
- [34] ESTRATÉGIA INDUSTRIAL PARA REDUÇÃO DO TEMPO DE RETENÇÃO DE CORTES SUÍNOS EM TÚNEL DE CONGELAMENTO CONTÍNUO – ZANDONAI, Silmara. 2021. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai, Erechim, 2021.
- [35] MELHORIA DA CAPACIDADE DE CONGELAMENTO DE TÚNEL DE CONGELAMENTO EM AGROINDÚSTRIA DO FRANGO DE CORTE: UM ESTUDO DE CASO – SPRICIGO, Maurício. 2019. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021.
- [36] VENTILAÇÃO VARIÁVEL COMO ESTRATÉGIA PARA REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM TÚNEIS DE CONGELAMENTO – ROOS, Roger. 2013. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2021.
- [37] ENERGY EFFICIENCY PROGRAM OF ELECTRICITY DISTRIBUTION COMPANIES – PEE ANEEL. Disponível em: <https://www.iea.org/policies/14049-energy-efficiency-program-of-electricity-distribution-companies-pee-aneel>. Acesso em 03 jun. 2025.