

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO**

Paulo de Souza Pacheco Junior

**Análise energética em uma instalação elétrica industrial**

**Goiânia**

**2024**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### 1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Paulo de Souza Pacheco Junior

Título do trabalho: Análise Energética em uma Instalação Elétrica Industrial

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [ X ] SIM [ ] NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(a)(s) autor(a)(es)(as) e ao(a) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

### Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Nunes Belchior, Professor do Magistério Superior**, em 15/12/2024, às 22:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo De Souza Pacheco Junior, Discente**, em 16/12/2024, às 21:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5041990** e o código CRC **8E5D0A78**.

Paulo de Souza Pacheco Junior

**Análise energética em uma instalação elétrica industrial**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Melo de Oliveira

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Junior, Paulo de Souza Pacheco  
Análise energética em uma instalação elétrica industrial  
[manuscrito] / Paulo de Souza Pacheco Junior. - 2024.  
37 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Fernando Nunes Belchior; co-orientadora  
Dra. Antônio Melo de Oliveira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de  
Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2024.

Bibliografia.

Inclui siglas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de  
tabelas.

1. Eficiência Energética. 2. Sistema de ar comprimido. 3. Redução  
de consumo. 4. Viabilidade econômica. 5. Desenvolvimento  
sustentável. I. Belchior, Fernando Nunes, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) 5 dia(s) do mês de dezembro do ano de 2024 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Análise Energética em uma Instalação Elétrica Industrial”, de autoria de Paulo de Souza Pacheco Junior, do curso de Engenharia Elétrica, do(a) EMC da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior (FCT/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Felipe Pamplona Mariano (EMC/UFG) e Prof. Dr. Leonardo de Queiroz Moreira (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 8,5 (oito vírgula cinco), tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Nunes Belchior, Professor do Magistério Superior**, em 15/12/2024, às 22:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Pamplona Mariano, Professor do Magistério Superior**, em 16/12/2024, às 08:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo De Queiroz Moreira, Professor do Magistério Superior**, em 16/12/2024, às 09:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5041992** e o código CRC **0C288DD0**.

## RESUMO

Este trabalho investiga a eficiência energética em uma instalação elétrica industrial, com foco em qualidade da energia elétrica e na otimização do sistema de ar comprimido, um dos maiores consumidores de energia em ambientes industriais. O estudo explora medidas práticas e teoricamente fundamentadas para reduzir o consumo de energia elétrica, aumentar a eficiência operacional e garantir o crescimento sustentável da planta, fatores alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. As principais abordagens incluem a redução da pressão de trabalho e de desarme, a recuperação do calor gerado pela compressão e o controle de vazamentos. A análise de eficiência é realizada por meio de métodos como o levantamento do perfil de consumo da planta, o diagnóstico das demandas de energia e o cálculo de indicadores específicos, como o consumo específico de energia e o desempenho energético do sistema. Para avaliar o retorno das intervenções, foram considerados indicadores econômicos, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o tempo de *payback simples*, que mostram a viabilidade e o potencial de economia das melhorias propostas. Além disso, o trabalho também aborda o potencial de economia gerado pela recuperação de calor da compressão para o pré-aquecimento de água utilizada em outras etapas do processo industrial, demonstrando que essa medida não só reduz o consumo de energia elétrica, mas também economiza em custos de combustível para caldeiras. Os resultados obtidos reforçam a importância da eficiência energética como uma prática estratégica para indústrias de alta demanda energética, mostrando que as medidas aplicadas contribuem para uma gestão mais sustentável e para a redução significativa dos custos operacionais.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética, Sistema de Ar Comprimido, Redução de Consumo, Viabilidade Econômica, Desenvolvimento Sustentável, Controle de Vazamentos, Recuperação de Calor.

## **ABSTRACT**

*This study investigates energy efficiency in an industrial electrical installation, focusing on power quality and optimizing the compressed air system, one of the largest energy consumers in industrial environments. The research explores practical and theoretically grounded measures to reduce energy consumption, enhance operational efficiency, and ensure the plant's sustainable growth—factors aligned with the United Nations' Sustainable Development Goals. Key approaches include reducing operating and cut-off pressure, recovering heat from compression, and controlling leaks. Efficiency analysis is conducted through methods such as plant consumption profiling, energy demand diagnostics, and calculating specific indicators like energy consumption per unit and system performance. Economic indicators, including Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and simple payback period, were used to assess the financial feasibility and savings potential of the proposed improvements. Additionally, the study highlights the energy-saving potential of recovering compression heat for preheating water used in other industrial processes, demonstrating reductions in both electricity consumption and boiler fuel costs. The results emphasize the strategic importance of energy efficiency for energy-intensive industries, showing that the applied measures contribute to more sustainable management and significantly reduce operational costs.*

**Keywords:** *Energy Efficiency, Compressed Air System, Consumption Reduction, Economic Feasibility, Sustainable Development, Leak Control, Heat Recovery.*

## AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho é o resultado de um percurso que não trilhei sozinho, e por isso é com muita gratidão que registro aqui os agradecimentos aqueles que me apoiaram nesta jornada.

Primeiramente, agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo suporte incondicional e acreditando em meu potencial, mesmo nas horas de maior incerteza. Sem o incentivo e o carinho de cada um de vocês, esta etapa não seria possível. Deixo uma menção especial à minha avó, Izabel, que sempre me inspirou e me ensinou o valor de preservar a bondade e a integridade, independentemente das circunstâncias.

Aos meus amigos, agradeço pela compreensão e por me acompanharem em momentos de estudo e descontração, sempre me lembrando da importância do equilíbrio entre dedicação e descanso. Vocês são parte fundamental desse processo, trazendo leveza e apoio constante.

Meus sinceros agradecimentos também aos meus colegas de trabalho, que me ajudaram a conciliar os desafios do ambiente profissional com a realização deste trabalho acadêmico. A colaboração e a compreensão de todos foram fundamentais para que eu pudesse seguir firme em meus objetivos.

A todos vocês, minha eterna gratidão e o reconhecimento de que cada conquista é, de alguma forma, fruto do que partilhamos juntos. Obrigado por fazerem parte desta trajetória.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável .....	3
Figura 2 - Diagrama esquemático do recuperador de calor de compressão Energy Recovery. ....	16
Figura 3 - Fluxo da metodologia utilizada .....	18
Figura 4 - Unifilar Geral da Fábrica.....	24
Figura 5 - Medidor Schneider Electric ION 8650.....	24
Figura 6 - Diagrama fasorial da instalação industrial.....	29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV .....	5
Tabela 2 - Tipos e Indicadores de Distorção Harmônica .....	6
Tabela 3 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental) .....	7
Tabela 4 - Limites para o desequilíbrio de tensão.....	7
Tabela 5 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.....	8
Tabela 6 - Oportunidades de melhoria da eficiência.....	15
Tabela 7 - Vazão de ar perdido e potência desperdiçada com vazamentos.....	17
Tabela 8 - Especificações Técnicas do Medidor Schneider ION 8650 .....	25
Tabela 9 - Especificações do sistema de recuperação de calor de compressão.....	32
Tabela 10 - Indicadores de retorno e risco do projeto .....	33

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão fase neutro medida entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024 na entrada da instalação industrial. ....	25
Gráfico 2 - Corrente nas fases medida na entrada na instalação industrial entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024. ....	26
Gráfico 3 - Distorção harmônica total da tensão medida entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024 na entrada da instalação industrial.....	26
Gráfico 4 - Variações de tensão na instalação industrial registradas entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024. ....	27
Gráfico 5 - Demanda energética da instalação industrial medida entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024. ....	28
Gráfico 6 - Fator de potência da instalação industrial medido entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024. ....	28
Gráfico 7 - Desequilíbrio de tensão medido entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024. ....	29
Gráfico 8 - Carregamento dos compressores medido entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024. ....	30
Gráfico 9 - Indicador de Desempenho Energético antes e após a implementação das melhorias feitas no dia 5 de agosto de 2024. ....	32

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>2</b>
2.1	Eficiência Energética .....	2
2.2	Qualidade de Energia Elétrica - Legislação do PRODIST .....	3
2.2.1	Grandezas utilizadas .....	4
2.2.2	Tensão em Regime Permanente .....	4
2.2.3	Fator de Potência .....	5
2.2.4	Distorção Harmônica.....	5
2.2.5	Desequilíbrio de Tensão .....	7
2.2.6	Variações de Tensão de Curta Duração.....	8
2.3	Eficiência Energética em Equipamentos Industriais.....	8
2.4	Compressores.....	9
2.4.1	Princípio de Funcionamento.....	9
2.5	Sistema de Ar Comprimido .....	10
2.5.1	Sistema de Geração de Ar Comprimido.....	10
2.5.2	Sistema de Distribuição de Ar Comprimido.....	11
2.5.3	Uso Final de Ar Comprimido .....	11
2.6	Rendimento em Sistemas de Ar Comprimido .....	12
2.7	Estudo de Viabilidade Econômica de Projetos de Eficiência Energética .....	12
2.8	Melhorias de Eficiência Energética em Sistema de Ar Comprimido .....	14
2.8.1	Redução das Pressões de Trabalho e de Desarme do Sistema.....	16
2.8.2	Recuperação de Calor de Compressão .....	16
2.8.3	Eliminação de Vazamentos .....	17
2.9	Considerações Finais .....	17
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>18</b>
3.1	Coleta de Dados.....	19
3.1.1	Diagnóstico do Sistema de Ar Comprimido.....	19
3.1.2	Levantamento de dados de consumo energético .....	19
3.1.3	Análise do perfil de demanda de ar comprimido.....	19
3.2	Implementação das Medidas.....	20
3.2.1	Redução das Pressões de Trabalho e de Desarme dos Compressores de Ar .....	20
3.2.2	Inspeção Acústica para Detecção de Vazamentos de Ar Comprimido .....	21
3.2.3	Implementação de um Sistema de Recuperação de Calor de Compressão.....	22
3.3	Monitoramento e Avaliação dos Resultados.....	23
3.4	Considerações Finais .....	23

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética tem se tornado uma prioridade cada vez maior nas indústrias modernas, motivada tanto pela necessidade de reduzir custos operacionais quanto pela pressão para adotar práticas sustentáveis que minimizem o impacto ambiental. Nas instalações elétricas industriais, onde o consumo de energia é elevado, sistemas de ar comprimido, centrais de água gelada e outras infraestruturas de alta demanda energética representam uma parte expressiva dos custos operacionais com energia (ELETROBRÁS; UNIFEI; FUPAI, 2007). Nesse contexto, medidas de eficiência energética podem desempenhar um papel fundamental na viabilização de economias significativas, ao mesmo tempo em que estão diretamente ligadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (NAÇÕES UNIDAS, 2024).

Este trabalho aborda, especificamente, a eficiência energética em sistemas de ar comprimido em uma instalação elétrica de uma indústria farmacêutica. O sistema de ar comprimido é amplamente utilizado em processos de automação, controle de ferramentas pneumáticas e transporte de materiais, o que o torna essencial para a operação contínua e eficiente de várias indústrias. No entanto, esse sistema apresenta um potencial considerável de desperdício energético, seja devido a vazamentos, às pressões de trabalho e de desarme excessivas ou ao subaproveitamento do calor gerado durante a compressão do ar. Esses fatores, quando não geridos adequadamente, podem elevar significativamente o consumo de energia, impactando os custos e a competitividade da empresa.

O estudo concentra-se em três áreas principais de intervenção para a melhoria da eficiência energética no sistema de ar comprimido: a redução das pressões de trabalho e de desarme, o controle e eliminação de vazamentos e a recuperação do calor gerado pela compressão para reaproveitamento em outros processos industriais. A redução das pressões de trabalho e de desarme visa adequar o nível de pressão às necessidades reais do processo, evitando o consumo excessivo de energia que ocorre quando a pressão é desnecessariamente elevada. Já a detecção e correção de vazamentos de ar são medidas essenciais para evitar perdas e desperdícios que elevam a demanda sobre o sistema, resultando em maior uso de energia e redução da vida útil dos compressores. A recuperação de calor, por sua vez, aproveita a energia térmica gerada na compressão, redirecionando-a para atividades como o pré-aquecimento de água para caldeiras, o que contribui para reduzir tanto o consumo de energia elétrica quanto o uso de combustíveis em outros processos industriais.

Para mensurar a eficácia dessas intervenções, o trabalho aplica uma metodologia que inclui o levantamento e análise de dados de consumo energético, avaliação do perfil de demanda da

instalação, bem como da qualidade da energia elétrica fornecida à planta industrial, e cálculos de indicadores econômicos, tais como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o tempo de *payback simples* são utilizados para analisar a viabilidade financeira das medidas propostas, permitindo avaliar o retorno sobre o capital investido. Além disso, indicadores específicos de consumo de energia, como o desempenho energético do sistema, são empregados para avaliar a eficiência técnica das melhorias, identificando o impacto das intervenções na redução do consumo energético e no aumento da vida útil dos equipamentos.

Este estudo contribui para a literatura ao demonstrar, de forma prática, o impacto positivo de medidas de eficiência energética em instalações industriais e ao oferecer um modelo que pode ser replicado em outras indústrias com sistemas de ar comprimido. A pesquisa também evidencia como o investimento em eficiência energética pode proporcionar um retorno financeiro significativo, além de reforçar o compromisso da indústria com o desenvolvimento sustentável e a responsabilidade ambiental. Assim, o trabalho busca não apenas apresentar um diagnóstico e soluções práticas, mas também incentivar a adoção de estratégias de eficiência energética como uma prática essencial para a competitividade e a inovação no setor industrial.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo são fornecidas explicações sobre os conteúdos que serviram de base para a realização deste trabalho. Entre os temas abordados estão: metodologias do uso eficiente de energia elétrica, dando ênfase no processo de conversão de energia em sistemas de ar comprimido, a análise de consumo energético dos compressores, e a descrição das medidas de eficiência energética adotadas, sendo explicado o modelo de mensurar o impacto de medidas já executadas e a viabilidade econômica da melhoria que demanda investimento.

### **2.1 Eficiência Energética**

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) define o termo “Eficiência Energética” como “gerar a mesma quantidade de energia com menos recursos naturais ou obter o mesmo serviço ("realizar trabalho") com menos energia”. Com o aumento dos custos de energia e a crescente pressão para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a eficiência energética surge como uma solução viável e eficaz, aliada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7, 8, 9, 12 e 13 definidos pela ONU (NAÇÕES UNIDAS, 2024) e representados na figura 1:

Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: (NAÇÕES UNIDAS, 2024)

Ao adotar tecnologias e práticas que permitem a realização das mesmas funções com menor consumo de energia, é possível não apenas reduzir as despesas operacionais, mas também minimizar o impacto ambiental. Esse conceito abrange desde a melhoria de processos industriais e a adoção de equipamentos mais eficientes até a implementação de estratégias de construção sustentável e o ajuste de comportamentos cotidianos.

O aumento do consumo de energia elétrica nas indústrias é um fenômeno complexo que reflete tanto o crescimento da atividade industrial quanto as mudanças nos processos produtivos e na demanda por energia. Esse aumento pode ser impulsionado por uma série de fatores, que variam desde a expansão da capacidade produtiva até a introdução de novas tecnologias e a modernização de equipamentos. O crescimento do indicador ODEX (Ministério de Minas e Energia, 2023), responsável por medir os ganhos de eficiência dos processos industriais evidencia que a preocupação das grandes indústrias com o aumento da eficiência energética de seus processos aumentou ao longo dos anos. Diante desse cenário, faz-se necessário investir em medidas de eficiência energética que impactam de modo significativo o consumo de energia elétrica.

## 2.2 Qualidade de Energia Elétrica - Legislação do PRODIST

Com base na necessidade de estabelecer parâmetros para a qualidade de energia elétrica (QEE), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu um módulo de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)(ANEEL, 2022), com o objetivo de definir terminologias, fenômenos e gerar indicadores que mensuram o nível de conformidade de parâmetros como tensão em regime

permanente, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão e variação de frequência com a norma brasileira. Para entender como são estabelecidos os limites desses parâmetros, é necessário entender o cálculo das grandezas utilizadas, tensão, corrente, potência e energia aparentes, ativas, reativas.

### 2.2.1 Grandezas utilizadas

Segundo (DORF; SVOBODA, 2009), as variáveis básicas de um circuito elétrico são a corrente e a tensão. A equação 1 explicita o cálculo da tensão entre dois terminais de um componente, dada por

$$v = \frac{dw}{dq}, \quad (1)$$

onde  $v$  é a tensão,  $dw$  é a variação da energia (ou trabalho) e  $dq$  é a variação do fluxo de carga, sendo a tensão, o trabalho necessário para transportar uma unidade de carga positiva de um terminal para outro. A equação 2 apresenta o cálculo da corrente elétrica, dada por

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (2)$$

onde  $dt$  seria uma unidade de tempo e a corrente elétrica,  $i$ , a variação do fluxo de carga elétrica em um ponto dado. A equação 3 apresenta o cálculo da potência fornecida a um componente, dado por

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} * \frac{dq}{dt} = v * i, \quad (3)$$

sendo a potência a taxa com a qual a energia é fornecida ou absorvida. A equação 4 explicita o cálculo da energia absorvida ou fornecida por um componente, dado por

$$w = \int_0^t p dt, \quad (4)$$

sendo  $t$  o intervalo de tempo de fornecimento ou absorção de energia. Do capítulo 2.2.2 ao 2.2.5 são apresentados os parâmetros e limites avaliados para verificar se as grandezas de uma instalação estão em conformidade com a legislação do PRODIST.

### 2.2.2 Tensão em Regime Permanente

Segundo o Módulo 8 (ANEEL, 2022), para a tensão fornecida de 13.800 V, são definidos os limites segundo a tabela 1.

Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV

<b>Tensão de Atendimento</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)</b>
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: (ANEEL, 2022)

### 2.2.3 Fator de Potência

De acordo com o Módulo 8 (ANEEL, 2022), o fator de potência de uma instalação elétrica caracteriza a eficiência no uso da energia elétrica, e deve ser controlado não somente do ponto de vista de eficiência energética, como também por questões de custos, visto que se a concessionária identificar um fator de potência inferior a 0,92 indutivo durante o dia ou inferior a 0,92 capacitivo durante a madrugada, ela pode efetuar cobranças adicionais significativas no custo energético daquela instalação.

### 2.2.4 Distorção Harmônica

Segundo o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2022), as distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. A distorção harmônica é um dos parâmetros utilizados para aferir o nível de qualidade de energia elétrica de uma instalação. A Tabela 2 apresenta tanto os tipos de distorção harmônica quanto os indicadores utilizados para medir o nível de qualidade de energia por esse parâmetro.

Tabela 2 - Tipos e Indicadores de Distorção Harmônica

<b>Descrição</b>	<b>Símbolo</b>
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DTT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Valor do indicador de $DTT\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT95\%$
Valor do indicador de $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT_p95\%$
Valor do indicador de $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT_i95\%$
Valor do indicador de $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT_395\%$

Fonte: (ANEEL, 2022)

As expressões para o cálculo dos indicadores  $DTT_h\%$ ,  $DTT\%$ ,  $DTT_p\%$ ,  $DTT_i\%$ ,  $DTT_3\%$  são apresentadas, respectivamente, pelas equações (5), (6), (7), (8) e (9), dadas por

$$DTT_h\% = \frac{V_h}{V_1} = 100[\%], \quad (5)$$

sendo  $V_h$  a tensão harmônica de ordem h, h a ordem harmônica individual e  $V_1$  a tensão fundamental medida,

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} * 100[\%], \quad (6)$$

sendo h todas as ordens harmônicas de 2 até hmax que é a ordem harmônica máxima, conforme classe do equipamento de medição utilizado (classe A ou S). A classe do instrumento de medição determina seu nível de precisão e quais grandezas podem ser extraídas por ele.

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} * 100[\%] \quad (7)$$

sendo h todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 (h=2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, ...) e  $h_p$  a máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_i} V_h^2}}{V_1} * 100[\%] \quad (8)$$

sendo h todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 (h=5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, ...) e  $h_i$  a máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_3} V_h^2}}{V_1} * 100[\%] \quad (9)$$

sendo h todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 (h=3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, ...) e  $h_3$  a máxima ordem harmônica múltipla de 3 (ANEEL, 2022).

Os limites de distorção harmônica correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição e estão representados na tabela 3.

Tabela 3 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10%	8%	5%
$DTT_p 95\%$	2,5%	2%	1%
$DTT_i 95\%$	7,5%	6%	4%
$DTT_3 95\%$	6,5%	5%	3%

Fonte: (ANEEL, 2022).

### 2.2.5 Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, ou na defasagem elétrica de  $120^\circ$  entre as tensões de fase do mesmo sistema. A tabela 4 apresenta os limites de desequilíbrio de tensão para a respectiva classe de tensão.

Tabela 4 - Limites para o desequilíbrio de tensão

Indicador	Tensão Nominal ( $V_n$ )	
	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n \leq 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: (ANEEL, 2022).

### 2.2.6 Variações de Tensão de Curta Duração

De acordo com o módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2022), deve-se compreender desvios significativos no valor eficaz da tensão por curtos intervalos de tempo. A partir da duração e amplitude, as variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com a Tabela 4.

Tabela 5 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração

<b>Classificação</b>	<b>Denominação</b>	<b>Duração da Variação</b>	<b>Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência</b>
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão - IMT	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 p.u. (por unidade)
	Afundamento Momentâneo de Tensão - AMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 p.u. e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Momentânea de Tensão - EMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 p.u.
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão -ITT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior 3 minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior a 1,1 p.u.

Fonte: (ANEEL, 2022).

### 2.3 Eficiência Energética em Equipamentos Industriais

Existem diversas estratégias e tecnologias aplicáveis à indústria que visam melhorar a eficiência energética, desde mudanças nos processos produtivos até o uso de equipamentos mais avançados. As medidas podem ser classificadas em diferentes categorias, como eficiência de processos, otimização de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC), melhorias no isolamento térmico, automação e controle, além do uso de fontes renováveis de

energia (COPEL, 2005). Essas iniciativas não só reduzem o consumo energético e os custos operacionais, mas também contribuem para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, alinhando a indústria com as metas globais de sustentabilidade, em específico com a meta que prevê a redução de emissões de  $CO_2$  em 50% até 2030, em relação aos níveis de 2005 (ONU, 2024). Conforme já mencionado, este trabalho terá como foco as medidas de eficiência energética no sistema de ar comprimido e abordará desde o princípio de funcionamento do sistema à viabilidade econômica de implantação das melhorias.

## **2.4 Compressores**

O compressor de ar é um equipamento que converte energia em ar comprimido, calor e ruído, aumentando a pressão do ar ao reduzir seu volume (ROCHA; MONTEIRO, 2007). O compressor aspira o ar ambiente, o comprime e depois o armazena em um reservatório para uso em diversas aplicações, como ferramentas pneumáticas, sistemas de refrigeração, pintura, entre outros.

### **2.4.1 Princípio de Funcionamento**

O compressor de ar é uma máquina que converte energia mecânica (geralmente fornecida por um motor elétrico, motor a diesel ou gasolina) em energia potencial armazenada sob a forma de ar comprimido.

O processo básico de funcionamento pode ser descrito a seguir; O compressor suga o ar ambiente através de um filtro, que remove impurezas e partículas. Esse ar é então direcionado para a câmara de compressão. Dependendo do tipo de compressor, o ar é comprimido de diferentes maneiras.

Nos compressores de pistão (ou alternativos), um pistão movido por um virabrequim se desloca para baixo, aspirando o ar para dentro do cilindro. Em seguida, ao se mover para cima, o pistão comprime o ar dentro do cilindro, reduzindo seu volume e aumentando sua pressão.

Nos compressores de parafuso rotativo, dois parafusos helicoidais giram em sentidos opostos dentro de uma câmara, capturando o ar entre os lóbulos dos parafusos e comprimindo-o à medida que o espaço entre eles diminui.

Nos compressores centrífugos, o ar é acelerado por um rotor giratório e, em seguida, desacelerado em um difusor, onde a energia cinética é convertida em pressão. Após a compressão, o ar aquecido passa por um sistema de resfriamento para reduzir sua temperatura, evitando danos ao equipamento e melhorando a eficiência.

Em muitos casos, o ar comprimido é então armazenado em um reservatório ou tanque para uso posterior. O ar comprimido armazenado é regulado por válvulas que ajustam a pressão e a vazão conforme a necessidade da aplicação. O sistema de ar comprimido geralmente inclui dispositivos para remover a água condensada, como drenos automáticos ou separadores de água, além de separadores de óleo e silenciadores para redução de ruído.

## **2.5 Sistema de Ar Comprimido**

O sistema de ar comprimido pode ser dividido em três subsistemas; geração, distribuição e uso final (PROCEL, 2005; ROCHA; MONTEIRO, 2007). A compreensão dos subsistemas é fundamental para identificar possibilidades de melhoria de eficiência energética. A seguir, tem-se uma análise detalhada de cada um desses subsistemas:

### **2.5.1 Sistema de Geração de Ar Comprimido**

O sistema de geração de ar comprimido é uma infraestrutura complexa composta por diversos componentes e subsistemas que colaboram para produzir e distribuir ar comprimido com eficiência. O processo de geração começa com os compressores, que desempenham o papel fundamental de capturar o ar atmosférico e aumentar sua pressão.

Os motores elétricos são responsáveis por fornecer a energia necessária para o funcionamento dos compressores. Eles convertem energia elétrica em energia mecânica, acionando os mecanismos dos compressores. A eficiência e o desempenho dos motores elétricos são essenciais para garantir que o sistema opere de forma econômica e eficaz. O sistema de controle regula a quantidade de ar comprimido produzido, ajustando a operação dos compressores conforme a demanda. Esses controles podem incluir sistemas automáticos que ajustam a produção de ar com base nas necessidades variáveis da instalação.

Os equipamentos de tratamento de ar são projetados para remover contaminantes e umidade do ar comprimido, além de minimizar o ruído. Esses equipamentos incluem filtros, secadores e separadores de água e óleo, que garantem que o ar comprimido esteja limpo e seco antes de ser utilizado em aplicações finais. Os reservatórios armazenam o ar comprimido e desempenham um papel crucial ao fornecer uma reserva de ar que pode ser utilizada conforme a demanda, garantindo uma pressão estável e contínua. A presença de acessórios, como válvulas de alívio e dispositivos de monitoramento, ajuda a manter o sistema funcionando de forma segura e eficiente.

### 2.5.2 Sistema de Distribuição de Ar Comprimido

O sistema de distribuição é responsável por transportar o ar comprimido dos reservatórios para os pontos de uso final, assegurando que ele seja entregue de forma eficiente e conforme as especificações necessárias. Este sistema deve garantir que o ar comprimido seja fornecido na pressão correta e com a qualidade adequada, o que envolve a utilização de uma rede de tubulações e válvulas.

Reservatórios adicionais são frequentemente usados ao longo da rede de distribuição para manter a pressão e fornecer uma reserva adicional de ar. As linhas de distribuição podem operar em diferentes pressões e são conectadas por válvulas de isolamento e reguladores de pressão, que ajustam e controlam a pressão do ar comprimido em diferentes partes do sistema.

A drenagem de condensado é um aspecto crucial do sistema de distribuição. O condensado é a água que se acumula no sistema devido ao resfriamento do ar comprimido. A drenagem eficaz é essencial para prevenir problemas como corrosão e bloqueios nas tubulações. Além disso, a estanqueidade das tubulações e conexões é fundamental para evitar vazamentos, que podem levar a perdas de energia e aumentar os custos operacionais.

### 2.5.3 Uso Final de Ar Comprimido

O ar comprimido tem uma vasta gama de aplicações industriais, refletindo sua versatilidade e importância em diversos processos. Entre as principais aplicações estão:

- **Acionamento de Ferramentas Pneumáticas:** O ar comprimido é utilizado para operar ferramentas pneumáticas, como chaves de impacto e lixadeiras, que são essenciais para muitas operações de montagem e manutenção;
- **Controle de Válvulas e Sistemas Mecânicos:** Em muitos processos industriais, o ar comprimido é empregado para acionar válvulas e sistemas de controle mecânico, proporcionando uma maneira eficiente de regular escoamento de óleos e gases;
- **Transporte e Jateamento:** O transporte pneumático utiliza ar comprimido para mover materiais através de tubulações, enquanto o jateamento usa ar comprimido para limpar ou preparar superfícies;
- **Operações de Sopro e Jato de Água:** O ar comprimido é usado para soprar partículas ou resíduos e para jatear água em processos de limpeza e acabamento;
- **Inspeção e Teste:** Em processos de inspeção e teste, o ar comprimido pode ser utilizado para realizar testes de pressão e verificar a integridade de componentes e sistemas;

A ampla gama de aplicações do ar comprimido destaca sua importância em praticamente todos os setores industriais, desde manufatura até processamento e serviços. A eficiência na geração, distribuição e utilização do ar comprimido é crucial para manter os custos operacionais baixos e assegurar a eficácia das operações industriais.

## 2.6 Rendimento em Sistemas de Ar Comprimido

Para obter a eficiência energética de um sistema de ar comprimido, é necessário determinar a quantidade de energia utilizada para a produção de um metro cúbico ar comprimido. Para o cálculo do consumo energético do sistema, utiliza-se o software de monitoramento dos compressores do fabricante (ATLAS COPCO, 2023), que fornece também os dados de produção de ar comprimido.

O consumo específico de energia, dado em quilowatts-hora por metro cúbico (kWh/m<sup>3</sup>), é um parâmetro utilizado para avaliar a eficiência de um compressor. Na prática, ele determina a potência, dada em quilowatts (kW), necessária para comprimir uma certa quantidade de ar, medida em termos de vazão volumétrica, dada em metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/h). A fórmula para o cálculo do consumo específico de energia é dada pela equação (10) (ROCHA; MONTEIRO, 2007):

$$\text{Consumo específico de energia} = \frac{W_c}{Q} \quad (10)$$

Onde:

$W_c$  é a potência de compressão, dada em quilowatts-hora (kW);

$Q$  é a vazão volumétrica do ar, dada em metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/h).

## 2.7 Estudo de Viabilidade Econômica de Projetos de Eficiência Energética

O estudo de viabilidade econômica é fundamental para projetos de eficiência energética, porque avalia os custos iniciais em comparação com os benefícios financeiros esperados, ajudando a determinar se o projeto é financeiramente viável e qual será o retorno sobre o investimento (ROIA) (NETO, 1992). Ele também identifica riscos e incertezas, apoia o planejamento estratégico, e facilita o acesso a financiamento, demonstrando a solidez e o potencial do projeto (OLIVEIRA, 2011). Além disso, maximiza os benefícios ao alocar recursos de forma eficaz e assegura o retorno a longo prazo, garantindo que os ganhos em eficiência não sejam comprometidos por custos imprevistos ou problemas operacionais. Para analisar a viabilidade dos projetos de eficiência energética, foram utilizados os seguintes indicadores:

- VPL (Valor Presente Líquido): É a diferença entre o valor presente das entradas e saídas de caixa de um investimento, descontadas a uma taxa de atratividade pré-definida. Um VPL positivo indica que o projeto é economicamente viável, pois gera riqueza líquida adicional para a empresa. A equação (11) representa o cálculo do VPL:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (11)$$

Onde:

$FC_t$  = Fluxo de caixa no período  $t$ , dado em reais (R\$);

$r$  = Taxa de desconto (ou Taxa Mínima de Atratividade) (%);

$t$  = Período (dado em anos, meses, dias etc., dependendo da análise);

$I_0$  = Investimento inicial, dado em reais (R\$).

- VPLa (Valor Presente Líquido Ajustado): Trata-se de uma variação do VPL que ajusta os fluxos de caixa para considerar aspectos como riscos específicos do projeto ou variações em cenários econômicos. A equação (12) define o método de cálculo do VPLa:

$$VPLa = \frac{VPL * r}{1 - (1+r)^{-n}} \quad (12)$$

$r$  = Taxa de desconto (ou Taxa Mínima de Atratividade) (%);

$n$  = Número de períodos (dado em anos, meses, dias etc., dependendo da análise).

- TIR (Taxa Interna de Retorno): A TIR é a taxa de desconto que torna o VPL de um projeto igual a zero, ou seja, é a taxa de retorno efetiva do investimento. O projeto é considerado viável se a TIR for superior à taxa mínima de atratividade. A equação (13) define o cálculo da TIR:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} - I_0 \quad (13)$$

- ROIA (Retorno sobre o Investimento Adicionado): Representa o retorno obtido em relação ao valor investido, expressando a eficiência do investimento em relação à taxa

mínima de atratividade considerada. É calculado como o lucro líquido dividido pelo investimento total, ambos dados em reais (R\$), conforme a equação (14):

$$ROIA = \frac{\text{Lucro Líquido}}{\text{Investimento Total}} * 100\% \quad (14)$$

- TMA (Taxa Mínima de Atratividade) (%): É a taxa de retorno mínima que um projeto deve oferecer para ser considerado aceitável. É usada como taxa de desconto no cálculo do VPL e na avaliação de projetos.
- *Payback*: O período de *payback* é o tempo necessário para recuperar o valor investido em um projeto por meio dos fluxos de caixa gerados, dado em anos, meses, dias etc., dependendo da análise feita. Um *payback* mais curto indica menor risco, mas não leva em conta os fluxos de caixa após o período de recuperação. A equação (15) explicita o cálculo do *payback*:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Fluxo de Caixa Anual Médio}} \quad (15)$$

- IBC (Índice de Lucratividade): O índice de lucratividade é a razão entre o valor presente dos fluxos de caixa de entrada e os fluxos de caixa de saída. Um valor superior a 1 indica que o projeto é lucrativo. A seguir, na equação (16) tem-se o método de cálculo do IBC:

$$IBC = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t}}{I_0} \quad (16)$$

Onde:

$FC_t$  = Fluxo de caixa no período t, dado em reais (R\$);

$r$  = Taxa de desconto (%);

$I_0$  = Investimento inicial dado em reais (R\$).

## 2.8 Melhorias de Eficiência Energética em Sistema de Ar Comprimido

A eficiência em sistemas de ar comprimido é essencial para reduzir custos e otimizar o uso de energia nas indústrias. Esses sistemas consomem uma grande quantidade de energia, e muitas vezes parte significativa dessa energia é desperdiçada devido a vazamentos, manutenção inadequada e escolhas erradas de equipamentos. Medir a eficiência desses sistemas permite

identificar e corrigir falhas, resultando em economias financeiras e menor impacto ambiental. Ao focar em métricas como a eficiência dos compressores, a detecção de vazamentos e a qualidade do ar, as empresas podem melhorar significativamente o desempenho de seus sistemas de ar comprimido.

Além disso, é necessário identificar a curva de carga da instalação elétrica, mapeando parâmetros no domínio do tempo, tais como potência ativa, tensão eficaz, potência não ativa e fator de potência. Ademais, deve-se realizar a análise de desequilíbrio da tensão trifásica e distorção harmônica, a fim de identificar possíveis anomalias nesses parâmetros. Para a escolha das medidas, foi utilizado o Manual Prático de Eficiência Energética em sistemas de ar comprimido (ROCHA; MONTEIRO, 2007), que classifica as melhorias possíveis por sua aplicabilidade e ganhos, conforme apresentado na tabela 5. Além disso, também foi considerado o contexto da empresa, visto que algumas medidas já foram implementadas.

Tabela 6 - Oportunidades de melhoria da eficiência

<b>Medidas de Economia de Energia</b>	<b>Aplicabilidade</b>	<b>Ganhos</b>	<b>Potencial de Contribuição</b>
Melhoria dos acionamentos (motores de alta eficiência)	25%	2%	0,5%
Melhoria dos acionamentos (Reguladores de velocidade)	25%	15%	3,8%
Troca de compressores por versões mais modernas (aperfeiçoamento)	30%	7%	2,1%
Uso de sistema de controle sofisticado	20%	12%	2,4%
Recuperação de calor rejeitado para uso em outras funções	20%	20%	4,0%
Melhoria no resfriamento, secagem e filtragem do ar	10%	5%	0,5%
Projeto global do sistema, incluindo sistema de multipressões	50%	9%	4,5%
Redução na perda por queda de pressão	50%	3%	1,5%
Otimização de dispositivos (equipamentos) de uso final	5%	40%	2,0%
<b>Manutenção e Operação do Sistema</b>			
Redução de vazamentos de ar	80%	20%	16%
Substituição de filtros mais frequente	40%	2%	0,8%
<b>Total</b>			<b>32,9%</b>
(1) Percentual de situações em que esta medida é aplicável (2) Percentual de redução no consumo anual de energia (3) Potencial de contribuição = aplicabilidade x ganho			

Fonte: (ROCHA; MONTEIRO, 2007).

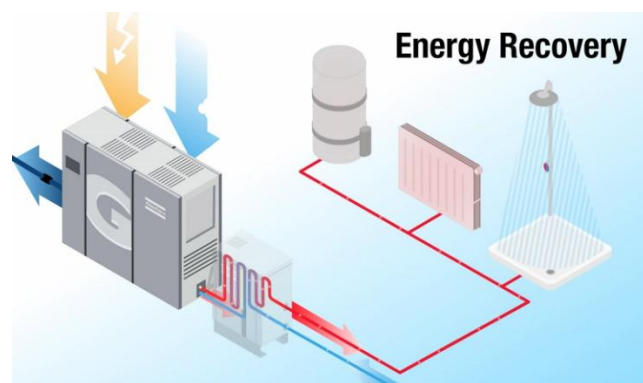
### 2.8.1 Redução das Pressões de Trabalho e de Desarme do Sistema

Segundo o Manual de Eficiência Energética em sistemas de Ar Comprimido (ROCHA; MONTEIRO, 2007), a pressão é um aspecto crucial no sistema de ar comprimido, pois influencia diretamente no consumo energético. Equipamentos que operam sob diferentes pressões em um único sistema podem ser otimizados ajustando a pressão nos pontos de consumo através de válvulas redutoras. Em alguns casos, pode ser vantajoso utilizar compressores com diferentes capacidades e pressões para atender às variadas demandas operacionais. A pressão deve ser cuidadosamente definida para garantir que atenda aos requisitos dos equipamentos, levando em consideração as perdas de rede e outros componentes, como filtros e válvulas. Geralmente, um aumento de 1 bar na pressão de trabalho pode elevar o consumo de energia dos motores dos compressores em 6% a 10%, para pressões em torno de 6 a 7 bar (ROCHA; MONTEIRO, 2007).

### 2.8.2 Recuperação de Calor de Compressão

A energia térmica dissipada no processo de compressão pode ser aproveitada em outras partes do processo industrial, como no aquecimento de água ou ambientes, como ilustrado pela figura 2, resultando em uma economia de energia considerável. Sistemas de recuperação de calor são uma maneira eficaz de melhorar a eficiência energética do sistema de ar comprimido. A medida citada considerará o uso da tecnologia *Energy Recovery* (ATLAS COPCO, 2009). No sistema proposto, foi considerado o reaproveitamento da energia emitida pelos compressores na forma de calor para auxiliar o pré-aquecimento da água utilizada pelas caldeiras, gerando um duplo ganho, tanto em energia elétrica, quanto em combustível para os geradores de vapor. Para a aquisição do sistema, foram levantados todos os custos e ganhos e calculados os indicadores de risco e retorno supracitados.

Figura 2 - Diagrama esquemático do recuperador de calor de compressão *Energy Recovery*.



### 2.8.3 Eliminação de Vazamentos

Vazamentos de ar comprimido podem causar flutuações na pressão do sistema, resultando em funcionamento ineficiente de ferramentas e equipamentos, além de sobrecarregar os compressores, aumentando os custos operacionais e reduzindo a vida útil dos equipamentos. As principais áreas propensas a vazamentos incluem acoplamentos, mangueiras, válvulas e purgadores de condensado. A quantidade de ar perdida depende da pressão do sistema e do tamanho dos furos, com a vazão de ar perdida aumentando exponencialmente com o diâmetro do furo. A Tabela 6 estabelece a relação entre o diâmetro dos furos dos vazamentos, vazão de ar desperdiçado e a energia gasta para suprir a compressão perdida:

Tabela 7 - Vazão de ar perdido e potência desperdiçada com vazamentos

<b>Diâmetro do Furo de Vazamento</b>	<b>Escape de Ar à Pressão de 6 bar</b>	<b>Potência p/ Suprir a Compressão Perdida</b>
(mm)	(m <sup>3</sup> /min)	(kW)
1	0,006	0,3
3	0,6	3,1
5	1,6	8,3
10	6,3	33,0
15	25,2	132,0

Fonte: (ROCHA; MONTEIRO, 2007)

Para a identificação dos vazamentos, foi utilizada a câmera acústica de modelo FLIR SI124-LD PLUS, que detecta os vazamentos de ar comprimido e calcula o ganho com a remoção deles.

## 2.9 Considerações Finais

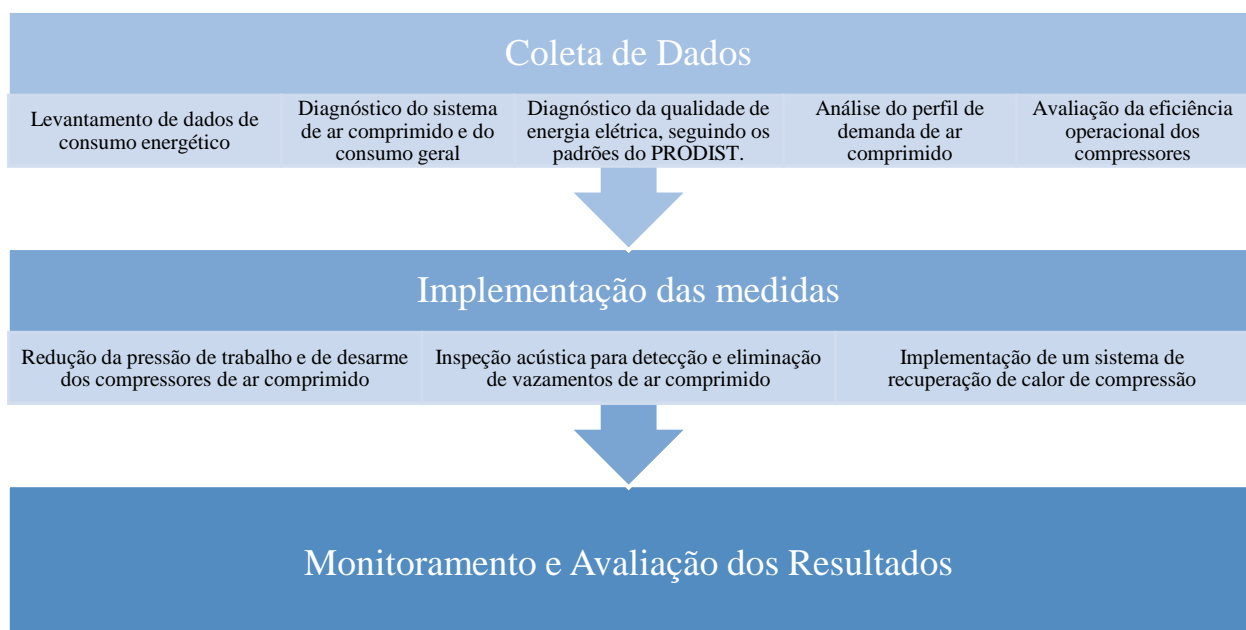
Neste capítulo foi abordado o embasamento para a teoria da eficiência energética em sistemas de ar comprimido, destacando o processo de conversão de energia e medidas para otimização do consumo em plantas industriais. O conceito de eficiência energética é discutido como uma estratégia essencial para reduzir custos operacionais e o impacto ambiental. A análise inclui a importância dos compressores de ar, descrevendo seus tipos e princípios de funcionamento, e detalha a estrutura dos sistemas de ar comprimido, que compreende a geração, distribuição, e uso final do ar.

A eficiência dos sistemas de ar comprimido é fundamental para minimizar desperdícios de energia, sendo o consumo específico de energia um indicador chave para avaliação. A análise também enfatiza a importância do estudo de viabilidade econômica em projetos de eficiência energética, utilizando indicadores como VPL, TIR, ROIA, e *Payback* para determinar a viabilidade financeira e o retorno sobre o investimento. Medidas práticas de eficiência energética são exploradas, como a redução das pressões de trabalho e de desarme do sistema, a recuperação de calor de compressão, e a eliminação de vazamentos. Essas ações visam não apenas otimizar o uso de energia, mas também garantir a sustentabilidade e o desempenho eficiente dos sistemas industriais.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo abordará a metodologia aplicada para a implementação das medidas de eficiência energética no sistema de ar comprimido. Durante o capítulo, serão utilizadas diversas das informações mencionadas anteriormente na Fundamentação Teórica, aplicando as equações apresentadas e entendendo como foram feitos os estudos de viabilidade técnica e econômica para as medidas de eficiência energética. A figura 8 apresenta o fluxo de processos seguido pela metodologia do trabalho.

Figura 3 - Fluxo da metodologia utilizada



Fonte: Autor

### **3.1 Coleta de Dados**

Inicialmente, devem ser coletados os dados de consumo de energia elétrica da planta industrial. Para isso, deve ser utilizado um multimedidor e, através dele, extraídos os valores de tensão, corrente, energia, fator de potência e harmônicos no intervalo de 168 horas, conforme estabelecido pela legislação do PRODIST (ANEEL, 2022). Posteriormente, é feita a coleta de dados de consumo de energia e produção de ar comprimido, por meio do *software* de monitoramento dos compressores analisados. Através dele, são monitorados os impactos das medidas de eficiência energética, verificando os cenários antes e depois da implementação das melhorias. Para a detecção dos vazamentos de ar comprimido, deve ser utilizada uma câmera acústica, que calcula os ganhos em energia com a eliminação dos vazamentos considerando a tarifa industrial de energia.

#### **3.1.1 Diagnóstico do Sistema de Ar Comprimido**

Antes da implementação das medidas de eficiência energética, deve ser realizado um diagnóstico detalhado do sistema de ar comprimido da instalação. Esta etapa tem como objetivo compreender o desempenho atual do sistema, identificar ineficiências e estabelecer uma linha de base para comparação dos resultados após as intervenções. O diagnóstico inclui:

#### **3.1.2 Levantamento de dados de consumo energético**

Análise do consumo de energia elétrica e medições em tempo real do consumo dos compressores. Para essa etapa são coletados os valores de demanda energética em um período de, no mínimo, 1 semana, a fim de entender o perfil de consumo energético da planta industrial. A partir da coleta desses dados, é identificado de que forma é o consumo energético da planta industrial, ou seja, em quais momentos ele é alto e baixo, associados aos momentos em que há muita produção, mas também em momentos em que a produção é baixa, como em fins de semana ou feriados, verificando se há ineficiência no uso da energia elétrica no âmbito geral. Diante desse cenário, é possível identificar ou não a necessidade de reduzir o consumo de energia elétrica por meio de medidas de eficiência energética.

#### **3.1.3 Análise do perfil de demanda de ar comprimido**

Após o levantamento de consumo geral, é feito o mapeamento do consumo energético dos sistemas de ar comprimido, visto que o sistema de ar comprimido é um dos maiores consumidores de energia elétrica de uma planta com o perfil abordado neste trabalho. Para isso,

deve ser utilizado um *software* que é responsável por monitorar a produção de ar comprimido dos compressores e o consumo energético desses equipamentos.

Com os dados obtidos, será possível identificar que o consumo de energia elétrica do sistema de ar comprimido pode ser também desproporcional em relação à produção da fábrica nos fins de semana e feriados, e isso pode servir de base para a implementação das medidas de eficiência energética abordadas nesse trabalho.

Diante desse cenário, é possível fazer o levantamento de indicadores, sendo o primeiro o indicador de desempenho energético (IDE) (International Copper Association Brazil, 2017), dado em quilowatt-hora por mil unidades produzidas (kWh/1000 UP), que calcula a quantidade de energia injetada no sistema de ar comprimido para a fabricação de mil unidades produzidas. O segundo é o consumo específico (ROCHA; MONTEIRO, 2007), que calcula a energia consumida pelo sistema de ar comprimido para produzir um litro de ar, dado em quilowatts-hora por metro cúbico (kWh/m<sup>3</sup>). Esses indicadores não somente mostram o nível de eficiência dos equipamentos em diferentes períodos, como também validam os impactos das medidas de eficiência energética implementadas.

## **3.2 Implementação das Medidas**

### **3.2.1 Redução das Pressões de Trabalho e de Desarme dos Compressores de Ar**

A operação de compressores de ar em pressões superiores às necessárias resulta em aumento no consumo de energia. Portanto, reduzir as pressões de trabalho e de desarme pode gerar uma economia significativa, desde que seja levado em consideração a pressão requerida pelos equipamentos que utilizam ar comprimido.

#### *A. Etapas de Implementação*

**Análise da Pressão Atual:** Devem ser realizadas medições contínuas das pressões de trabalho e de desarme ao longo de um mês, utilizando o sistema supervisão instalado na geração de ar comprimido, a fim de identificar possíveis variações e identificar a pressão mínima necessária para manter a operação adequada dos equipamentos

**Definição das novas pressões de trabalho e de desarme:** Segundo o Manual de Eficiência Energética (ROCHA; MONTEIRO, 2007) em Sistemas de Ar Comprimido, os projetos consideram uma diferença de no máximo 0,8 bar entre a pressão média de trabalho no ponto

mais distante do sistema e a pressão que se ajusta no pressostato de controle para fins efetivos de desarme.

**Ajuste dos Compressores:** Após a determinação das novas pressões de trabalho e de desarme, os compressores devem ser reprogramados para operarem na nova faixa de pressão, utilizando o painel de controle eletrônico dos equipamentos. Após a implementação, deve ser monitorado o impacto da redução da pressão no consumo energético dos compressores, utilizando dados de consumo em tempo real.

Além disso, deve ser monitorado junto às áreas abastecidas pelo sistema de ar comprimido, com o intuito de verificar o impacto na produção decorrente da implementação da medida, como a falta de ar comprimido ou mal funcionamento das máquinas. É importante monitorar a demanda instantânea dos compressores um mês antes e um mês após a implementação da redução das pressões de trabalho e de desarme, além de verificar também a produção de condensado, pois caso diminua, pode estar havendo passagem de ar úmido para as máquinas, podendo gerar corrosão.

### **3.2.2 Inspeção Acústica para Detecção de Vazamentos de Ar Comprimido**

Vazamentos em sistemas de ar comprimido são uma das principais causas de desperdício energético, podendo representar até 30% da produção de ar em sistemas não monitorados (HARUKI, 2024). A inspeção acústica é uma técnica eficiente para detectar vazamentos de forma precisa e com baixo custo.

#### *A. Etapas de Implementação*

**Treinamento da Equipe:** Inicialmente, é importante realizar o treinamento da equipe de manutenção sobre a utilização do instrumento de inspeção acústica pelo fabricante. Além disso, promover o treinamento de eficiência energética em sistemas de ar comprimido, visando conscientizar a equipe técnica a respeito de boas práticas de eficiência energética nesse sistema.

**Inspeção Acústica do Sistema:** Após isso, a equipe deve realizar a inspeção em uma linha de produção de medicamentos sólidos com a câmera acústica e identificar possíveis vazamentos. Eles podem ser localizados com base no ruído gerado pela fuga do ar. Esse ruído é captado pelos microfones presentes na câmera e o cálculo da vazão de ar comprimido desperdiçado e do consumo energético adicional dos compressores com a remoção do vazamento é feito através

do *software* da câmera acústica. Com isso, é possível obter o ganho com a remoção dos vazamentos.

**Reparo dos Vazamentos:** Após a detecção, todos os pontos identificados com vazamentos devem ser reparados. As ações de reparo incluem a substituição de conexões, juntas e trechos danificados das tubulações.

**Relatório de Eficiência:** Por meio do *software* do fabricante da câmera acústica, deve ser gerado um relatório, detalhando a quantidade de vazamentos antes dos reparos, a localização desses vazamentos, o grau de criticidade baseado na vazão de ar comprimido desperdiçado de cada um, e a economia potencial proporcionada.

### **3.2.3 Implementação de um Sistema de Recuperação de Calor de Compressão**

Cerca de 80% a 90% da energia elétrica consumida por compressores de ar é convertida em calor. A recuperação desse calor pode ser utilizada em diversos processos industriais, como aquecimento de água ou ar, resultando em economia significativa de energia. Para o estudo realizado, deve ser projetado o cenário no qual utiliza-se do calor de compressão para pré-aquecer a água que alimenta os geradores de vapor.

#### *A. Etapas de Implementação*

**Avaliação de Viabilidade Técnica:** Deve ser realizada uma análise preliminar para determinar os potenciais usos do calor gerado pelos compressores. Caso a planta industrial utilize vapor para aquecimento de água em determinados processos, a recuperação de calor pode ser uma solução viável. Para esta análise, deve ser considerado o uso do calor recuperado com o intuito de fornecer mais energia para o pré-aquecimento da água que abastece as caldeiras da planta industrial.

**Avaliação de Viabilidade Econômica:** Deve ser realizado um estudo de viabilidade econômica de acordo com o dimensionamento prévio do projeto. Por meio desse estudo, é possível levantar o investimento necessário para a implementação do sistema. Além disso, é possível calcular o ganho energético por meio do pré-aquecimento da água, por meio da quantidade da energia utilizada para elevar a temperatura da água até a temperatura que o calor dos compressores elevaria. Essa economia energética é convertida para o volume de Gás Natural Liquefeito, utilizando o potencial calorífico do fabricante do combustível e a eficiência da caldeira.

Para se analisar a parte financeira associada à eficiência energética, é importante calcular os indicadores de retorno e risco do projeto, inicialmente obtendo-se o fluxo de caixa para um

horizonte de planejamento de projeto e posteriormente obtendo-se os indicadores ROIA, VPL, VPLa, TIR e *Payback*.

### **3.3 Monitoramento e Avaliação dos Resultados**

Após a implementação das duas medidas simultaneamente, inicia-se um programa de monitoramento contínuo dos consumos de energia elétrica dos compressores. Além disso, cria-se uma rota de inspeção para verificação das pressões reduzidas e um plano de inspeção acústica para a verificação e correção de vazamentos no sistema de ar comprimido. Com base nos dados obtidos, compara-se o consumo antes e depois da implementação da redução de pressão de ar comprimido e da detecção de vazamentos (International Copper Association Brazil, 2017).

### **3.4 Considerações Finais**

As metodologias descritas neste capítulo seguem as melhores práticas de eficiência energética aplicáveis a sistemas de ar comprimido, priorizando a redução de desperdícios e o aproveitamento de energia residual. A implementação dessas medidas visa não apenas reduzir o consumo energético, mas também otimizar o desempenho operacional e aumentar a sustentabilidade da planta industrial.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a implementação das medidas de eficiência energética no sistema de ar comprimido da planta industrial. Inicialmente, foi realizado um levantamento detalhado dos dados de consumo energético, bem como dos parâmetros de qualidade de energia, seguindo as orientações da resolução 1000 da ANEEL (ANEEL, 2021) e do Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2005) tanto da planta como um todo quanto especificamente do sistema de ar comprimido. A partir desses dados, foi possível identificar os principais pontos de ineficiência e estabelecer um diagnóstico preciso do consumo energético atual.

Com base nesse diagnóstico, foram sugeridas e implementadas soluções voltadas à otimização do desempenho do sistema de ar comprimido, visando a redução do consumo de energia e o aumento da eficiência operacional. Os resultados obtidos a partir dessas ações são apresentados e analisados a seguir, com o intuito de demonstrar os impactos concretos das

melhorias adotadas, tanto em termos de economia de energia quanto na redução de custos operacionais e emissões associadas.

Inicialmente, foram coletados os valores de tensão, corrente, distorção harmônica total, variações de tensão, demanda energética e fator de potência utilizando o medidor Schneider Electric ION8650 (SCHNEIDER ELECTRIC, 2019). As leituras foram realizadas no intervalo de 168 horas (uma semana) considerando 1024 amostras por ciclo, conforme exigido pelo módulo 8 (ANEEL, 2005). O unifilar geral da fábrica e as especificações do medidor utilizado estão apresentados nas figuras 9 e 10 e na tabela 7, respectivamente.

O unifilar geral da fábrica está representado na figura 9, onde está especificado o local que receberá o foco das ações de eficiência energética.

Figura 4 - Unifilar Geral da Fábrica

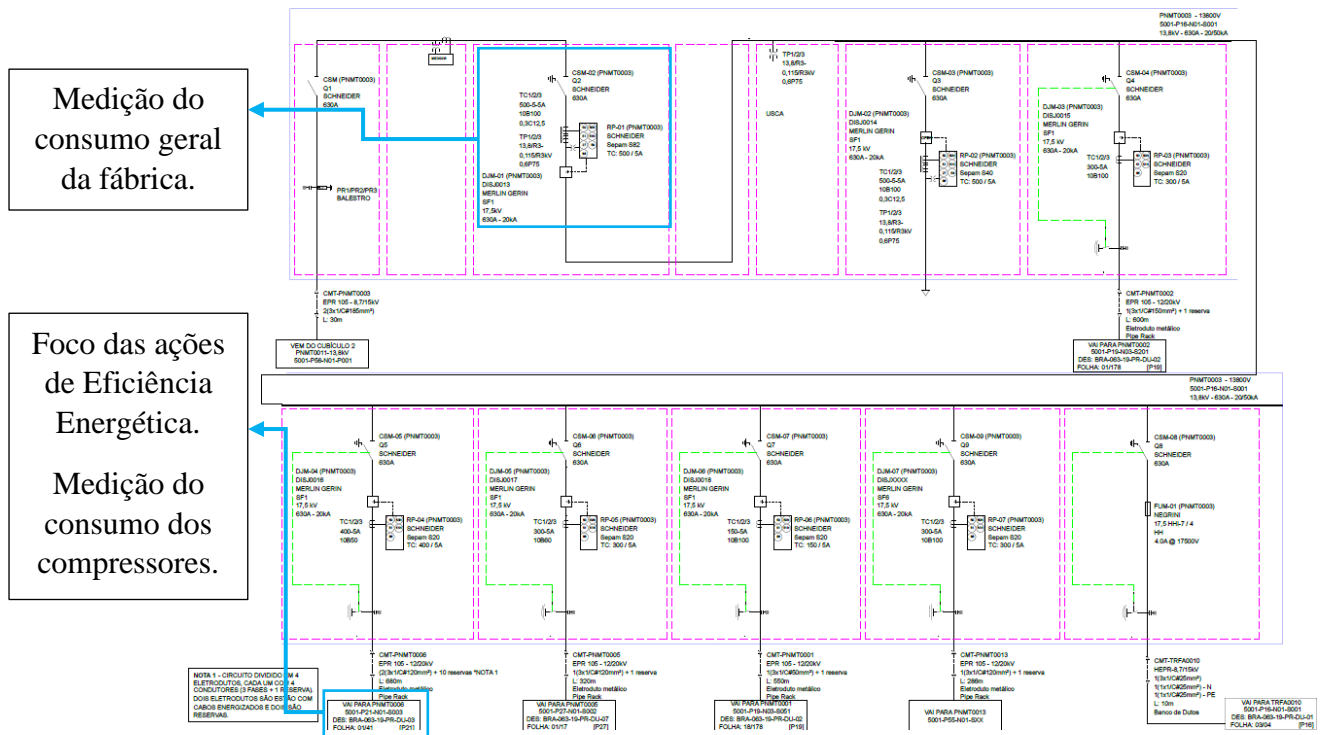


Figura 5 - Medidor Schneider Electric ION 8650



Tabela 8 - Especificações Técnicas do Medidor Schneider ION 8650

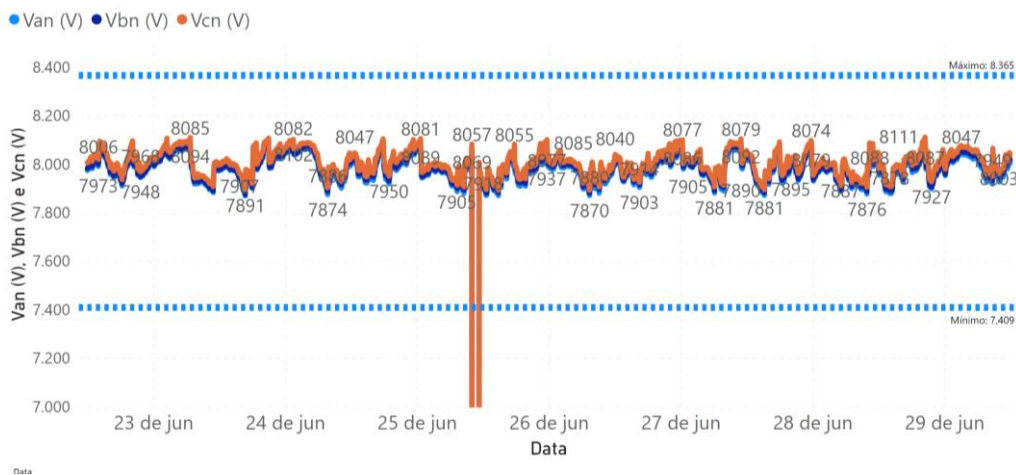
Características	Schneider ION8650 - Classe A
Medição	Potência, Energia e Demanda
Qualidade de Energia	Monitoramento de Quedas/Oscilações, harmônicas
	Harmônicas até 63ª: individual, par, ímpar
	Harmônicas até 50ª: magnitude, fase e inter-harmônicas
	IEC 61000-4-30 (IEC61000-4-30, 2015) Classe A
	Componentes simétricos: zero, positivo, negativo
	Detecção de transientes, microssegundos (50/60hz): 20/17 µs

Fonte: Autor

Com exceção do gráfico 7, todos os gráficos apresentados a seguir foram construídos considerando o intervalo de uma semana, entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024. Os dados foram utilizados com o intuito de avaliar a qualidade de energia da planta industrial, de acordo com os padrões definidos pela ANEEL.

O gráfico 1 apresenta os valores de tensão medidos na entrada da planta industrial e os respectivos limites de tensão máxima e mínima definidos de acordo com a Tabela 1. Através do intervalo, é possível verificar que houve apenas um momento em que o limite mínimo foi ultrapassado, ocorrido no dia 25 de junho. Nessa data, houve a desenergização do circuito para a realização de uma manutenção corretiva emergencial na subestação que alimenta a fábrica. Os demais pontos permanecem dentro dos limites adequados de tensão estabelecidos pela legislação do PRODIST, especificados pelas linhas tracejadas.

Gráfico 1 - Tensão fase neutro medida entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024 na entrada da instalação industrial.



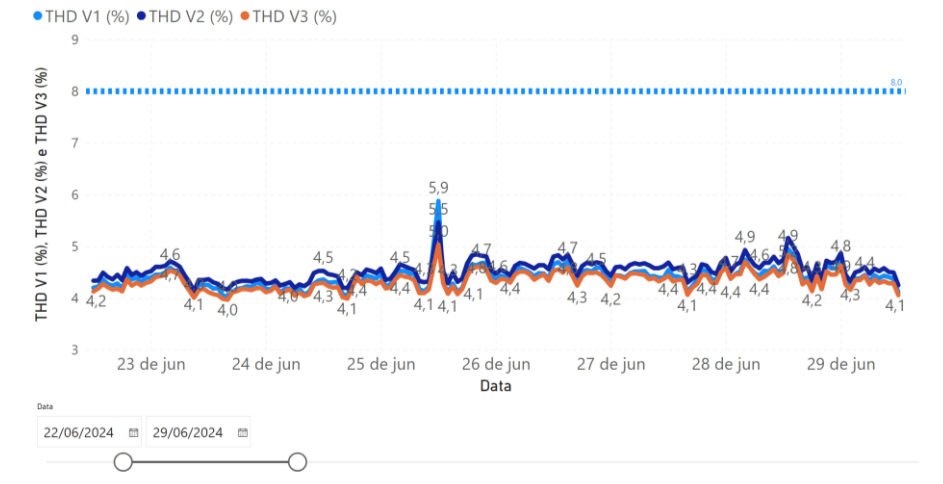
O gráfico 2 apresenta os valores de corrente medidos durante o mesmo período, ressaltando que a empresa opera sob regime 24 horas/7 dias na semana e também evidenciando a parada do fornecimento de energia para a manutenção no dia 25 de junho.

Gráfico 2 - Corrente nas fases medida na entrada na instalação industrial entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024.



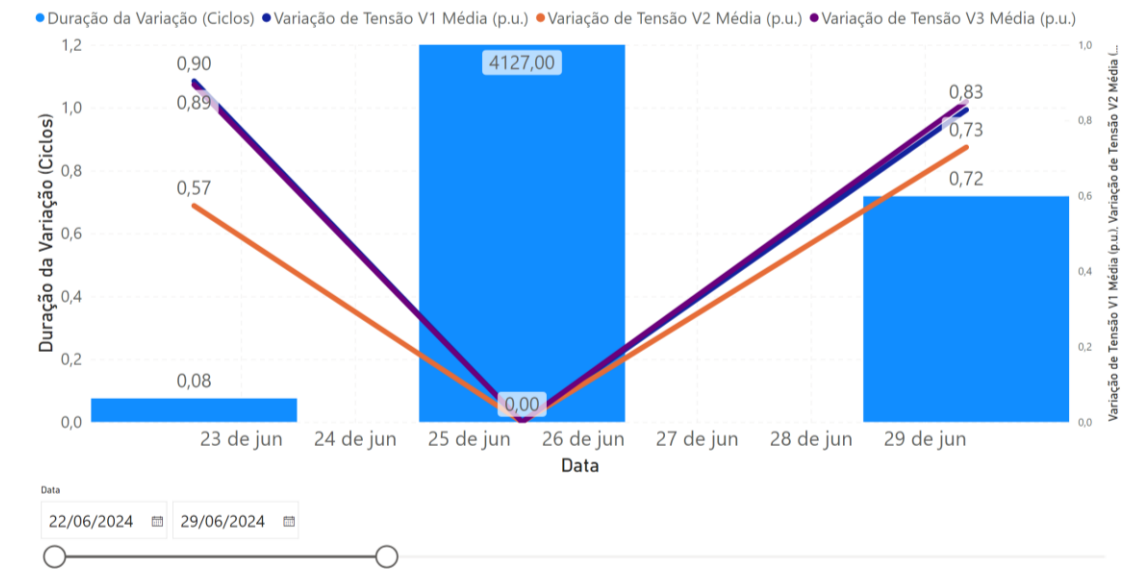
O gráfico 3 apresenta o perfil da distorção harmônica total medido no mesmo período e o limite estabelecido pela legislação do PRODIST. O gráfico constata que no período de medição, a distorção harmônica total da tensão não ultrapassou o limite de 8% estabelecido pela Tabela 3 para tensões entre 2,3 kV e 69 kV, mantendo-se estável durante as leituras.

Gráfico 3 - Distorção harmônica total da tensão medida entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024 na entrada da instalação industrial.



O gráfico 4 apresenta as variações de tensão ocorridas entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024. Ele especifica as datas em que ocorreram as variações no eixo x (tanto afundamentos quanto elevações), a magnitude dessas variações em p.u. (gráfico de linhas) e a duração em segundos para os limites estabelecidos entre 0,9 e 1,1 p.u (gráfico de colunas).

Gráfico 4 - Variações de tensão na instalação industrial registradas entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024.

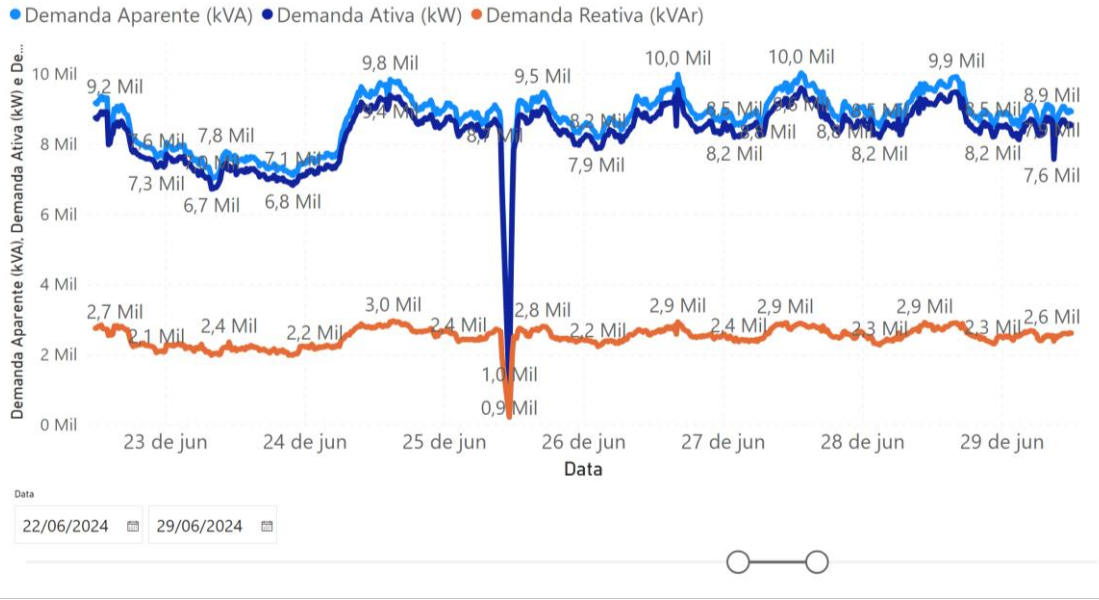


Por meio do gráfico 4, é possível observar que houve 3 variações de tensão ao longo de uma semana. A maior delas ocorreu no dia 25 de junho e durou cerca de 4.127 ciclos, fazendo com que a tensão chegasse a 0 p.u. Como mencionado anteriormente, no dia 25 de junho houve a parada do fornecimento de energia para a execução de uma manutenção corretiva emergencial. Outra variação de tensão média ocorreu no dia 29 de junho. Houve uma alteração significativa tensão das fases 1, 2 e 3, que assumiram valores médios em V1, V2 e V3 de 0,83, 0,73 e 0,72 p.u., respectivamente. A duração dessa variação foi de 0,72 ciclos.

O gráfico 5 apresenta a demanda energética da instalação elétrica industrial. Ao analisar o consumo de energia da planta, verificou-se que, durante os fins de semana, quando a produção era significativamente reduzida, o consumo de energia apresentava uma queda, como esperado. No entanto, foi observado que, mesmo com a redução da atividade produtiva, o consumo energético permanecia consideravelmente elevado. Esse comportamento indicava a existência de sistemas que continuavam em operação desnecessariamente, entre eles o sistema de ar comprimido, que continuava a demandar uma quantidade substancial de energia, mesmo com a baixa ou nula demanda de ar comprimido durante esses períodos. Essa constatação foi

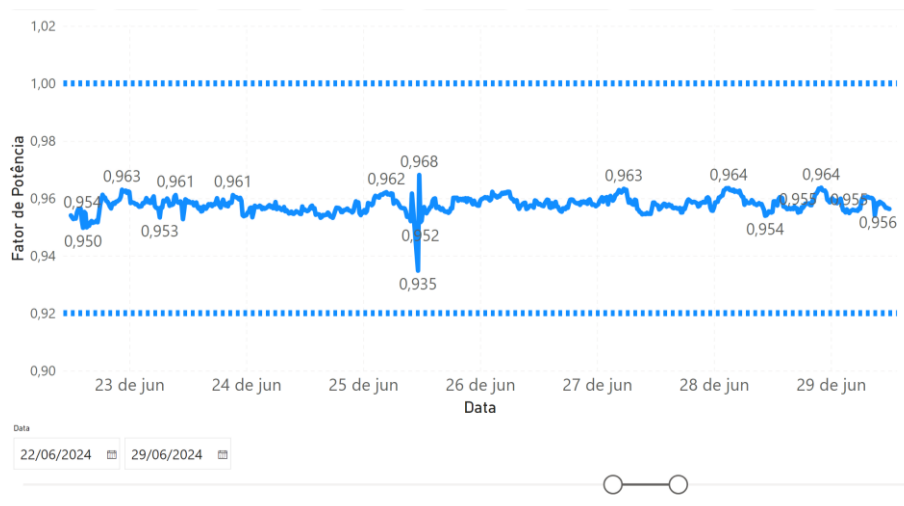
fundamental para direcionar as medidas de eficiência energética, especialmente no sentido de otimizar o funcionamento do sistema de ar comprimido em momentos de baixa produção.

Gráfico 5 - Demanda energética da instalação industrial medida entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024.



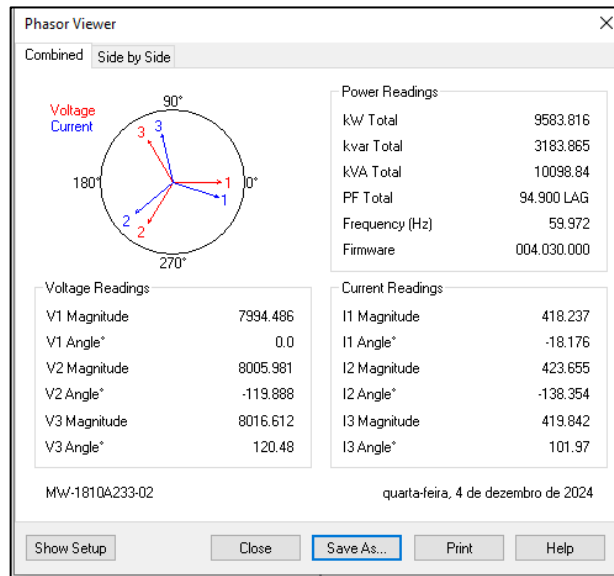
O gráfico 6 apresenta o fator de potência da instalação industrial e os limites estabelecidos pela legislação do PRODIST através das linhas tracejadas. Como pode ser observado no gráfico, em nenhum momento houve a ultrapassagem dos limites de 0,92 a 1,00 indutivo definidos pelo Módulo 8 do PRODIST, evidenciando uma boa condição para o fator de potência geral da fábrica.

Gráfico 6 - Fator de potência da instalação industrial medido entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024.



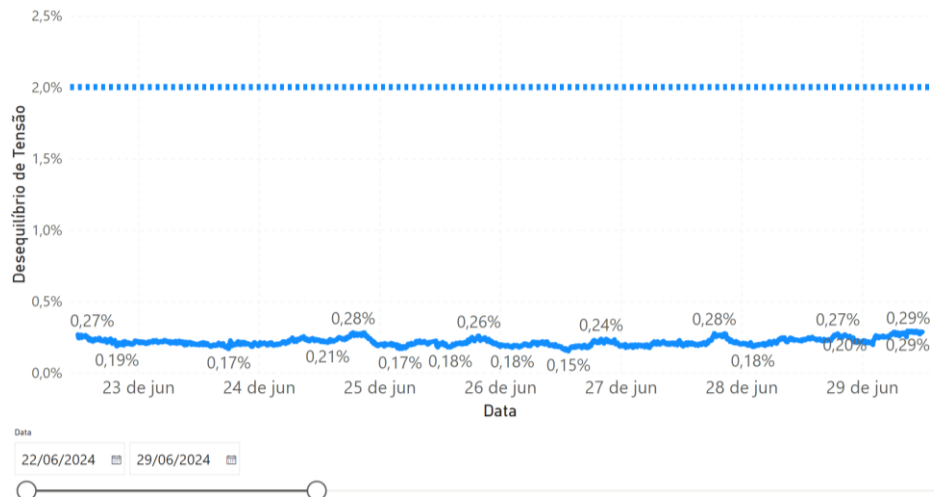
A figura 6 apresenta o diagrama fasorial da instalação industrial, fornecendo as magnitudes e ângulos de fase de tensão e corrente. Através da figura, é possível ver uma defasagem de aproximadamente 120° entre as tensões V1, V2 e V3 e uma defasagem de 18,18° da corrente em relação à tensão, resultando em um fator de potência igual a 0,949 atrasado no momento da leitura.

Figura 6 - Diagrama fasorial da instalação industrial



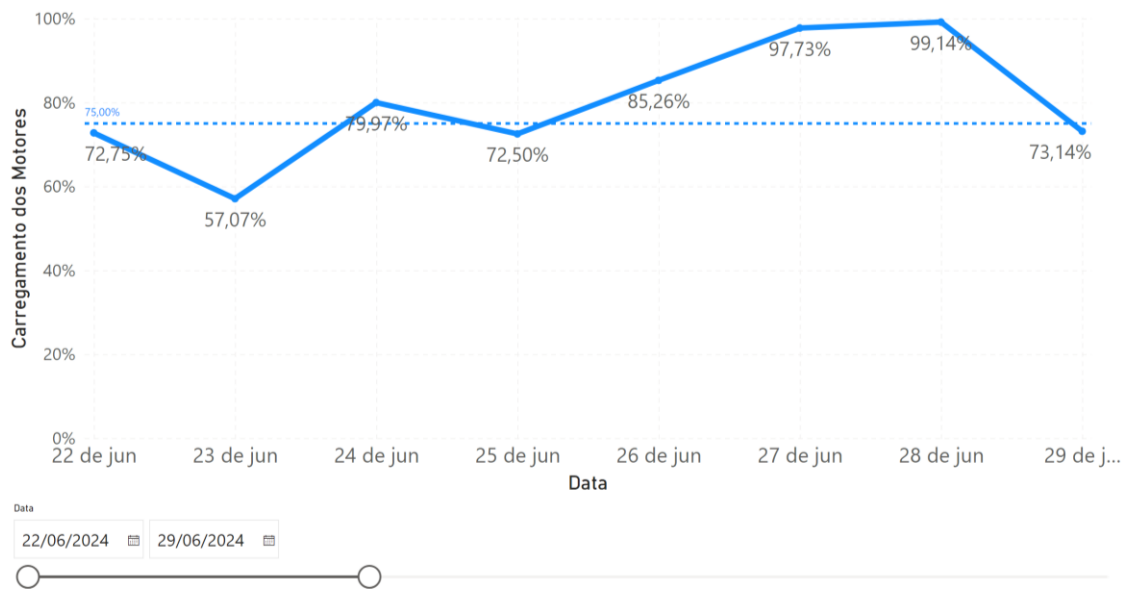
O gráfico 7 apresenta o perfil de desequilíbrio de tensão medido no intervalo de uma semana para a instalação industrial. Durante o período, não houve leituras acima do valor limite de 2% estabelecido pela legislação do PRODIST, indicando a conformidade desse parâmetro com a legislação.

Gráfico 7 - Desequilíbrio de tensão medido entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024.



O gráfico 8 apresenta o carregamento dos motores ao longo de uma semana. Durante o período, quatro leituras apresentaram valores abaixo do limite ideal de 75% (MELLO, 2013), indicando que o motor costuma operar abaixo da faixa de carregamento que lhe proporcione o melhor rendimento.

Gráfico 8 - Carregamento dos compressores medido entre os dias 22 de junho de 2024 e 29 de junho de 2024.



Em relação ao sistema de ar comprimido, foi desenvolvido um Indicador de Desempenho Energético (IDE) (International Copper Association Brazil, 2017) para monitorar e avaliar a eficiência do sistema antes e depois da implementação das melhorias propostas. Esse indicador permitiu relacionar o consumo de energia do sistema de ar comprimido com o volume de produção da fábrica, possibilitando uma análise comparativa dos resultados obtidos com as ações de otimização.

Após a implementação das melhorias, os resultados mostraram uma significativa redução no consumo energético, refletindo diretamente em uma economia anual prevista de aproximadamente R\$ 315.000,00. O ganho foi obtido pela diferença entre o indicador antes e depois da melhoria, multiplicado pelo volume de produção após a implementação dos projetos. Esse ganho energético foi transformado em valor monetário utilizando a tarifa de 0,31 R\$/kWh utilizada pela empresa.

As intervenções que contribuíram para essa economia foram a realização de uma inspeção acústica para a detecção e eliminação de vazamentos de ar comprimido, onde foram encontrados 37 vazamentos de ar, e a redução das pressões de trabalho e de desarme dos

compressores, ajustando-as para níveis mais compatíveis com a demanda real da planta. A pressão de trabalho foi reduzida de 7,8 bar para 7,0 bar e a pressão de desarme foi reduzida de 8,0 bar para 7,3 bar. Tais ações foram realizadas simultaneamente a partir do dia 5 de agosto de 2024 e influenciaram diretamente no consumo energético do compressor parafuso rotativo modelo ZT315VSDF (ATLAS COPCO, 2017), com vazão de 2793 m<sup>3</sup>/h, responsável pelo abastecimento de um dos sites da planta. O site é composto por centenas de equipamentos, que incluem os equipamentos do P55 (maior planta de produção de injetáveis da América Latina), o P01 (planta de produção de medicamentos sólidos, semissólidos e probióticos), P07 (planta produtora de penicilínicos). Entre os equipamentos, incluem reatores, encartuchadeiras, blistadeiras, unidades de tratamento de ar, entre outros.

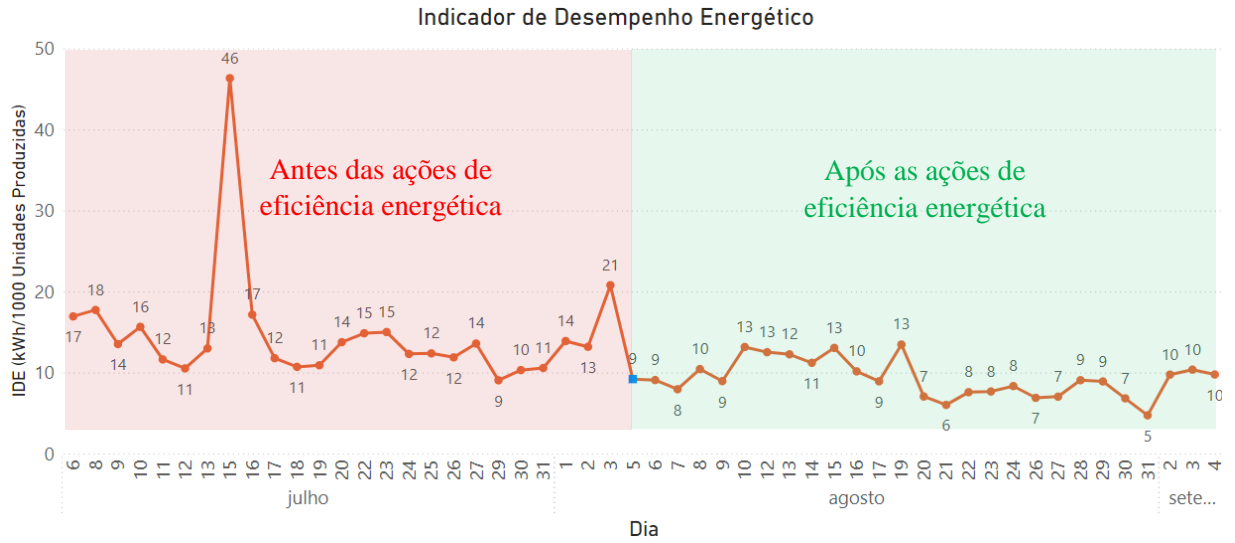
Trata-se de um compressor controlado por acionamento de velocidade variável, cujas manutenções são realizadas conforme horímetros, tendo sido a última realizada em agosto de 2024, com 8.000 horas, onde foi efetuada a troca dos elementos filtrantes de ar e óleo, de vedações dos trocadores de calor e do secador.

O sistema analisado é composto por um reservatório de ar comprimido com capacidade de 10 m<sup>3</sup> localizado na saída do gerador de ar comprimido. Além disso, conta com um secador do tipo IMD, que utiliza cilindro de sílica e possui modulação automática integrada. Dessa forma, não foi necessária qualquer intervenção para ajuste do secador após a redução da pressão. Os compressores são controlados por um controlador MK04, sendo os motores acionados por inversores e frequência. O primeiro projeto da rede de distribuição do sistema de ar comprimido foi feito em 2010, onde foi refeita toda a linha de ar comprimido do site. O último projeto foi realizado em meados de 2022, onde a geração de ar comprimido foi totalmente refeita para a construção de uma nova linha de ar comprimido que abasteceria o P55.

Para monitorar os efeitos da redução de pressão de ar comprimido, foi utilizado o *software* de monitoramento *online* dos compressores, que fornece ao usuário dados como temperaturas (do óleo, bobinas do motor, rolamentos etc.) pressões e número de rotações. Além disso, existem planos de manutenção periódica onde são realizadas trocas dos filtros manta da entrada de ar e verificações de nível de óleo.

As ações de eficiência energética não só reduziram as perdas de energia, como representado por meio do Indicador de Desempenho Energético no Gráfico 7, como também melhoraram a confiabilidade do sistema e diminuíram os custos operacionais relacionados à geração de ar comprimido.

Gráfico 9 - Indicador de Desempenho Energético antes e após a implementação das melhorias feitas no dia 5 de agosto de 2024.



Antes da implementação das ações corretivas, o IDE revelava um consumo específico de energia de 15,07 kWh por mil unidades produzidas. Após as melhorias, esse valor foi reduzido para 9,76 kWh para cada mil unidades produzidas, evidenciando uma redução de 35% no consumo de energia do sistema para a geração desse recurso, comprovando o impacto positivo das medidas adotadas no consumo total de energia do sistema, que geraram a economia anual citada anteriormente. Esses resultados confirmam a eficácia das ações implementadas, demonstrando a relevância da otimização do sistema de ar comprimido tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.

Para a implementação do sistema de recuperação do calor de compressão para pré-aquecimento da água de alimentação das caldeiras, foi considerada a aquisição de 5 equipamentos com as especificações apresentadas na Tabela 8.

Tabela 9 - Especificações do sistema de recuperação de calor de compressão

Descrição	Potência (kW)	Regime (horas/ano)	Vazão Média (Litros/Segundo) [30°C-90°C]
ZR250 P 380V 8.6	250	6000	0,68
ZR250 P 380V 8.6	250	6000	0,68
ZR275P 8.6	275	6000	0,75
ZR250 VSD 8.6 P 380	250	4000	0,40
ZR315VSD 8.6	315	4000	0,44

Fonte: (ATLAS COPCO, 2024)

Para a geração dos indicadores de retorno e risco, foi considerada a taxa mínima de atratividade (TMA) a 10,50% ao ano e um horizonte de planejamento de projeto de 36 meses. Contabilizando todos os investimentos no projeto, contemplando equipamentos, acessórios, instalação, e considerando uma vazão de 10,7 m<sup>3</sup>/h a 90°C, foi previsto um custo inicial de R\$ 3.011.572,65. Considerando o custo do metro cúbico de Gás Natural Liquefeito a R\$ 5,15, foi estimado um ganho mensal com a implementação do sistema de R\$ 189.835,00. Com esses dados, foram obtidos os indicadores para o investimento no projeto mostrados na tabela 9:

Tabela 10 - Indicadores de retorno e risco do projeto

<b>Indicadores de Retorno e Risco</b>	<b>Valor</b>
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 2.869.407,51
Valor Presente Líquido Ajustado (VPLa)	R\$ 92.622,99
Índice Benefício Custo (IBC)	1,95
Retorno Sobre Investimento Adicionado (ROIA)	1,88%
Taxa Interna de Retorno (TIR)	5,33%
<i>Payback</i> Simples (Meses)	15,86

O VPL significativamente positivo demonstra que o projeto gera um valor econômico expressivo, indicando que os fluxos de caixa futuros, quando descontados pela TMA de 0,8355%, superam consideravelmente o investimento inicial.

Esse VPL elevado sugere que o projeto não apenas cobre os custos, mas também proporciona ganhos substanciais ao longo dos 36 meses, sendo um forte indicador de viabilidade econômica.

O valor do VPLa reforça a lucratividade do projeto, indicando que, em termos presentes, o investimento está gerando cerca de R\$ 92.622,99 por mês ao longo dos três anos. Isso mostra um retorno consistente e significativo ao longo do período.

O índice de lucratividade (IBC) de 1,95 indica que, para cada R\$ 1 investido, o retorno esperado é de R\$ 1,95. Isso sugere uma relação custo-benefício altamente favorável, praticamente dobrando o valor investido. Um IBC próximo de 2 é um excelente indicador da eficiência econômica do projeto, sugerindo que o investimento gera benefícios que superam significativamente os custos.

O ROIA de 1,88% representa um retorno adicional significativo após o pagamento dos custos de capital. Esse valor mostra que, além de cobrir o custo do capital, o projeto ainda gera um retorno extra, tornando-o atraente.

A TIR de 5,33% ao mês é substancialmente maior do que a TMA de 0,8355% ao mês, o que indica que o projeto não apenas supera o custo de oportunidade do capital, mas o faz de forma expressiva. A diferença significativa entre a TIR e a TMA sugere que o projeto oferece um retorno robusto em relação ao custo do capital, o que torna o investimento muito atrativo.

O *payback* simples de 15,86 meses indica que o tempo necessário para recuperar o investimento é inferior aos 36 meses previstos inicialmente. Isso significa que, ao longo dos 36 meses, o projeto recupera o capital investido rapidamente, e há um período significativo onde o projeto opera gerando lucros. Um *payback* relativamente curto reduz os riscos associados ao investimento, aumentando ainda mais sua atratividade.

Com base nesses indicadores, o investimento se mostra altamente viável e lucrativo ao longo de um horizonte de 36 meses. O VPL elevado, o IBC de quase 2, o ROIA superior a 1,88% e a TIR expressiva em relação à TMA indicam que o projeto não apenas cobre seus custos, mas também oferece um retorno substancial para os investidores.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou, por meio de uma análise detalhada e fundamentada, que a implementação de medidas de eficiência energética em sistemas de ar comprimido pode gerar benefícios substanciais para instalações industriais em termos de economia de energia e redução de custos. Focando em três principais estratégias — redução das pressões de trabalho e de desarme, controle de vazamentos e recuperação de calor da compressão —, o estudo comprovou que práticas relativamente simples podem impactar profundamente o desempenho energético de uma instalação, promovendo economias significativas e melhorando a viabilidade financeira da operação.

A redução das pressões de trabalho e de desarme revelou-se uma medida eficaz para ajustar o sistema de ar comprimido às necessidades reais de consumo, eliminando o uso desnecessário de energia associado a pressões excessivas.

O controle e a eliminação de vazamentos foram identificados como fundamentais para evitar desperdícios de ar comprimido, que afetam diretamente o consumo de energia e a eficiência do sistema, sendo responsáveis pela maior parte da economia apresentada no capítulo anterior. A

inspeção e manutenção contínua são recomendadas como práticas regulares, não apenas para reduzir os vazamentos, mas também para preservar a integridade dos equipamentos e aumentar a sua vida útil. As análises sugerem que o monitoramento constante, associado a um programa de manutenção preditiva, é uma das formas mais eficazes de assegurar a eficiência energética em sistemas de ar comprimido.

A recuperação de calor da compressão mostrou-se vantajosa para o sistema de ar comprimido. O reaproveitamento do calor residual da compressão é uma solução que beneficia o consumo energético de toda a planta, reduzindo a necessidade de energia elétrica e o uso de combustíveis fósseis. Os resultados indicam que o calor gerado durante o processo de compressão pode ser eficientemente direcionado para outros processos, proporcionando uma economia substancial ao longo do tempo.

Para validar a viabilidade econômica dessa intervenção, o trabalho calculou os indicadores como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *payback* simples, os quais mostraram que os investimentos realizados em melhorias de eficiência energética têm um retorno financeiro expressivo e rápido. A análise econômica destacou que o retorno positivo desses investimentos justifica o custo inicial e gera um retorno considerável antes do fim do horizonte de planejamento de projetos.

O estudo também enfatiza que a eficiência energética em sistemas industriais não deve ser vista apenas como uma medida econômica, mas como uma responsabilidade ambiental e uma contribuição para o desenvolvimento sustentável. A redução do consumo de energia e a minimização de desperdícios contribuem diretamente para a diminuição da pegada de carbono das indústrias, alinhando-se com as metas globais de sustentabilidade e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (NAÇÕES UNIDAS, 2024).

Por fim, este trabalho reafirma que a adoção de práticas de eficiência energética não só melhora a competitividade e sustentabilidade das indústrias, como também serve como um modelo replicável para outras plantas industriais. As abordagens e resultados apresentados podem orientar novas pesquisas e inspirar o setor a investir continuamente em soluções de otimização energética, abrangendo tanto o sistema de ar comprimido quanto outros sistemas, como os sistemas de refrigeração, bombeamento e vapor, por exemplo. Em um cenário onde os custos de energia e as exigências ambientais tendem a aumentar, a eficiência energética surge como uma ferramenta estratégica indispensável para a inovação e o desenvolvimento sustentável na indústria.

## 6 REFERÊNCIAS

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição**. [s.l: s.n.].

ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL Nº 1.000**. [s.l: s.n.].

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. [s.l: s.n.].

ATLAS COPCO. **Soluções de recuperação de energia (ER 90-900)**. [s.l: s.n.].

ATLAS COPCO. **Compressores de Parafuso Rotativos Isentos de Óleo**. [s.l: s.n.].

ATLAS COPCO. **Smartlink Atlas Copco: Conheça os Principais Recursos e Benefícios**.

ATLAS COPCO. **Estudo de Viabilidade Energy Recovery**. [s.l: s.n.].

COPEL, C. P. DE E. **Manual de eficiência energética na indústria**. Curitiba-PR: [s.n.].

DORF, R.; SVOBODA, J. **Introdução aos Circuitos Elétricos**, 8a Edição. 2009.

ELETROBRÁS; UNIFEI; FUPAI. **Eficiência Energética Teoria & Prática**. [s.l: s.n.].

HARUKI, P. 5 Métodos Essenciais para Detecção de Vazamento de Ar Comprimido. **VCP Automação**, 2024.

IEC61000-4-30. **IEC 61000-4-30 - Electromagnetic compatibility (EMC)**., 2015.  
Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/en/publication/68642>>. Acesso em: 25 ago. 2024

International Copper Association Brazil. **Guia para Aplicação da Norma ABNT NBR ISO 50001 Gestão de Energia**. [s.l: s.n.].

MELLO, R. **Eficiência Energética em Motores Elétricos Trifásicos de Indução**. [s.l: s.n.].

NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

NETO, A. A. **Os Métodos Quantitativos de Análise de Investimentos**. [s.l: s.n.].

OLIVEIRA, C. K. **Engenharia Econômica**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[www.unisul.br/unisulvirtual](http://www.unisul.br/unisulvirtual)>.

ONU. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 8 out. 2024.

PROCEL. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**. 2005.

ROCHA, C. R.; MONTEIRO, M. A. G. **Manual prático - Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido**. [s.l.] Procel/Eletróbrás, 2007.

SCHNEIDER ELECTRIC. **PowerLogic ION8650**. [s.l: s.n.].