

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO  
GRANDE DO SUL – UNIJUÍ**

**RICARDO RÜBENICH RÖEHRS**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO  
INDUSTRIAL**

**Ijuí**

**2024**

**RICARDO RÜBENICH RÖEHRS**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO  
INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

**Orientador: Prof. Me. Marcelo Weber Fuhrmann**

**Ijuí**

**2024**

**RICARDO RÜBENICH RÖEHRS**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO  
INDUSTRIAL**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de ENGENHEIRO ELETRICISTA e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo membro da banca examinadora.

Ijuí, 19 de dezembro de 2024

Prof. Marcelo Weber Fuhrmann

Mestre pela Universidade Federal de Santa Maria - Orientador

Prof. Luís Fernando Sauthier

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica/UNIJUÍ

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Marcelo Weber Fuhrmann

Mestre pela Universidade Federal de Santa Maria - Orientador

Prof. Luís Fernando Sauthier

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica/UNIJUÍ

## **AGRADECIMENTO ESPECIAL**

À minha família, que é meu alicerce.

A Guilherme e Frederico, meus filhos, por serem minha inspiração diária. À Daniele, minha esposa, pelo amor e pela paciência incondicional em todos os momentos. À minha mãe, Reni, pelo apoio constante e inabalável. Aos meus irmãos, Tobias e Joaquim, pela parceria e incentivo. E ao meu eterno pai, Irio, que, em memória, continua sendo minha força e guia. A cada palavra de encorajamento, a cada gesto de carinho e compreensão, vocês foram meu refúgio e motivação. Sem vocês, eu não teria conseguido.

## **AGRADECIMENTOS**

A conclusão deste trabalho só foi possível graças ao apoio e incentivo de muitas pessoas, às quais sou profundamente grato.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me fortalecer em cada etapa, por guiar meus passos e me proporcionar coragem para continuar, mesmo nos momentos mais desafiadores. A Ele dedico toda a honra e gratidão por ter me conduzido até aqui.

Aos meus professores, por compartilharem seu conhecimento com tanto entusiasmo e dedicação, moldando minha trajetória acadêmica com ensinamentos preciosos. Sou eternamente grato por cada orientação e por acreditarem no meu potencial.

Aos meus colegas de aula, que dividiram comigo os desafios e conquistas ao longo dessa jornada acadêmica. Em especial, ao Marcos Alan Pott, pelo apoio constante e pela amizade construída ao longo desses anos. O apoio mútuo e as horas compartilhadas de estudo e discussão foram fundamentais para nosso crescimento coletivo e meu sucesso.

Aos meus colegas de trabalho, que compreenderam e apoiaram meu esforço ao longo da caminhada, oferecendo sua ajuda, compreensão e inspiração para que eu pudesse me dedicar com afinco ao desenvolvimento deste projeto. De maneira especial, agradeço à empresa Kepler Weber, que proporcionou a base para minha formação profissional e abriu portas para meu aprendizado prático, sempre oferecendo suporte e confiança no meu potencial.

A todos, meu sincero muito obrigado!

É melhor você tentar algo, vê-lo não funcionar e aprender com isso, do que não fazer nada.

Mark Zuckerberg

## RESUMO

RÖEHRS, R. R. **Eficiência Energética para Sistemas de Ar Comprimido Industrial**. 2024.

Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2024.

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo analisar a eficiência energética dos sistemas de ar comprimido industrial, com foco na identificação, correção e prevenção de vazamentos. A pesquisa foi realizada na empresa Kepler Weber, onde se buscou implementar práticas de gestão energética para a redução de custos operacionais e a promoção da sustentabilidade. A metodologia adotada envolveu o diagnóstico inicial do sistema, a detecção e quantificação de vazamentos, a análise de causas raiz, a definição de planos de ação corretivos e o desenvolvimento de um plano de manutenção preventiva. O diagnóstico inicial permitiu a identificação de pontos críticos do sistema, com destaque para as perdas de ar comprimido em conexões, válvulas e tubulações. A quantificação dos vazamentos foi realizada com o auxílio de sensores de ultrassom, que possibilitaram a medição precisa do volume de ar perdido. Com base nos resultados obtidos, foram estabelecidos planos de ação corretivos para eliminação dos vazamentos, incluindo a substituição de peças danificadas e o ajuste de parâmetros operacionais. O plano de manutenção preventiva foi elaborado para garantir a inspeção periódica de sistemas críticos, com o objetivo de evitar a recorrência dos vazamentos. Para avaliar o impacto das medidas adotadas, foram calculados os custos anuais de operação e as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) associadas ao consumo de energia elétrica. Os resultados demonstraram uma redução significativa nos custos operacionais, com destaque para a economia gerada pela eliminação dos vazamentos. Além disso, verificou-se uma diminuição nas emissões de CO<sub>2</sub>, o que evidencia o alinhamento da empresa com as práticas de responsabilidade ambiental e sustentabilidade. O estudo destaca a importância da manutenção preditiva e da utilização de tecnologias de monitoramento contínuo para garantir a eficiência energética e a confiabilidade dos sistemas de ar comprimido. Os principais benefícios alcançados incluem a redução do consumo de energia elétrica, a melhoria da produtividade e a minimização de impactos ambientais. Conclui-se que a adoção de práticas de gestão energética, aliada ao uso de ferramentas de monitoramento avançadas, permite a otimização do desempenho dos sistemas de ar comprimido industrial. Esta abordagem não apenas reduz custos e emissões, mas também contribui para a competitividade e sustentabilidade das operações industriais.

**Palavras-chave:** Eficiência energética. Vazamentos de ar comprimido. Sustentabilidade. Manutenção preditiva.

## ABSTRACT

RÖEHRS, R. R. **Eficiência Energética para Sistemas de Ar Comprimido Industrial**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2024.

This Final Course Project aims to analyze the energy efficiency of industrial compressed air systems, focusing on the identification, correction, and prevention of leaks. The research was conducted at Kepler Weber, aiming to implement energy management practices to reduce operational costs and promote sustainability. The adopted methodology involved an initial system diagnosis, leak detection and quantification, root cause analysis, the definition of corrective action plans, and the development of a preventive maintenance plan. The initial diagnosis enabled the identification of critical points within the system, highlighting compressed air losses in connections, valves, and pipelines. Leak quantification was carried out using ultrasonic sensors, which allowed for the precise measurement of the volume of air lost. Based on the results obtained, corrective action plans were established to eliminate leaks, including the replacement of damaged components and the adjustment of operational parameters. The preventive maintenance plan was designed to ensure the periodic inspection of critical systems to prevent leak recurrence. To assess the impact of the measures adopted, the annual operating costs and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions associated with electricity consumption were calculated. The results demonstrated a significant reduction in operational costs, with an emphasis on the savings generated by eliminating leaks. Additionally, a decrease in CO<sub>2</sub> emissions was observed, underscoring the company's alignment with environmental responsibility and sustainability practices. The study highlights the importance of predictive maintenance and the use of continuous monitoring technologies to ensure energy efficiency and system reliability in compressed air systems. The main benefits achieved include reduced electricity consumption, increased productivity, and minimized environmental impacts. It is concluded that adopting energy management practices, combined with the use of advanced monitoring tools, enables the optimization of the performance of industrial compressed air systems. This approach not only reduces costs and emissions but also contributes to the competitiveness and sustainability of industrial operations.

**Keywords:** Energy efficiency. Compressed air leaks. Sustainability. Predictive maintenance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Imagem interna compressor alternativo.....	23
Figura 2: Imagem compressor rotativo.....	24
Figura 3: Imagem interna compressor centrífugo.....	25
Figura 4: Imagem interna compressor parafuso .....	27
Figura 5: Subsistema ar comprimido.....	30
Figura 6: Tubulação de aço carbono.....	32
Figura 7: Tubulação de alumínio.....	33
Figura 8: Tubulação de cobre .....	34
Figura 9: Tubulação PEX .....	35
Figura 10: Tubulação de inox.....	36
Figura 11: Fluxo do processo .....	53
Figura 12: Planta de Panambi/RS.....	60
Figura 13: (CPA011) Compressor 55 kW .....	62
Figura 14: (CPA015) Compressor 55 kW .....	62
Figura 15: (CPA018) Compressor 26 kW .....	63
Figura 16: (CPA020) Compressor 18 kW .....	63
Figura 17: (CPA021) Compressor 90 kW .....	64
Figura 18: Área alimentada por compressor .....	73
Figura 19: Detector de vazamentos ultrassônico.....	74
Figura 20: Identificação de vazamento.....	75
Figura 21: Exemplos de vazamentos encontrados.....	76
Figura 22: Análise de causa.....	80
Figura 23: Dashboard de monitoramento.....	86

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Diferenças entre tubulações.....	31
Tabela 2: Rota de inspeção.....	78
Tabela 3: Plano preventivo.....	82
Tabela 4: Calendário de treinamentos.....	84

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Vazamentos por local x custos .....	65
Gráfico 2: Custo manutenção x vazamentos .....	67
Gráfico 3: Produção de CO2 x equipamento.....	69
Gráfico 4: Custo total .....	71

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
bar	Unidade de pressão
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
ISO	Organização Internacional de Normalização, do <i>inglês International Organization for Standardization</i>
kg	Quilograma
kW	Quilo-Watt, do inglês <i>Kilowatt</i>
kWh	Quilo-Watt-hora, do inglês <i>Kilowatt-hour</i>
m <sup>3</sup> /h	Metros cúbicos por hora
m <sup>3</sup> /min	Metros cúbicos por minuto
NBR	Norma Brasileira
PE	Polietileno
PEX	Polietileno Reticulado
PVC	Policloreto de Vinila
psi	Libras por polegada quadrada, do inglês <i>Pounds per Square Inch</i>
R\$	Real
SAP	Sistema de Gestão Empresarial, do inglês <i>System Analysis Program Development</i>
VSD	Controle de Velocidade Variável, do inglês <i>Variable Speed Drive</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1. JUSTIFICATIVA .....	14
<b>1.1.1. Redução de custos operacionais e melhoria da eficiência energética....</b>	<b>14</b>
<b>1.1.2. Sustentabilidade e responsabilidade ambiental.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1.3. Aumento da competitividade e inovação tecnológica.....</b>	<b>15</b>
1.2. CONTEXTO.....	15
1.3. PROBLEMA.....	16
1.4. OBJETIVOS .....	17
<b>1.4.1. Objetivo geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.4.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>17</b>
1.5. ESTRUTURAÇÃO .....	18
<b>2. SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO INDUSTRIAL .....</b>	<b>19</b>
2.1. CONCEITOS BÁSICOS DE AR COMPRIMIDO .....	19
<b>2.1.1. Propriedades do ar comprimido.....</b>	<b>19</b>
2.2. TIPOS DE COMPRESSORES.....	21
<b>2.2.1. Compressores alternativos (ou pistão).....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2. Compressores rotativos .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.3. Compressores centrífugos .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.4. Compressores parafuso .....</b>	<b>25</b>
2.3. SUBSISTEMAS DE UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO .....	27
<b>2.3.1. Geração de ar comprimido .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2. Armazenamento de ar comprimido .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.3. Distribuição de ar comprimido.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.4. Tratamento de ar comprimido .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.5. Utilização do ar comprimido .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.6. Sistema de segurança.....</b>	<b>29</b>

2.4. DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO .....	30
2.4.1. Aço carbono.....	31
2.4.2. Alumínio .....	32
2.4.3. Cobre.....	33
2.4.4. Tubulação plástica (pvc, pex, pe) .....	34
2.4.5. Aço inoxidável (aço inox) .....	35
2.5. CONSUMO FINAL DE AR COMPRIMIDO.....	36
2.5.1. Como as ferramentas pneumáticas consomem ar comprimido .....	36
2.5.2. Fatores críticos que influenciam o consumo de ar.....	37
2.5.3. Medição e monitoramento do consumo de ar .....	38
2.5.4. Estratégias para otimizar o consumo de ar nas ferramentas pneumáticas	39
2.6. PROBLEMAS COMUNS EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO .....	40
2.6.1. Vazamentos no sistema.....	40
2.6.2. Insuficiência de pressão.....	40
2.6.3. Contaminação do ar comprimido.....	40
2.6.4. Falhas no compressor .....	41
2.6.5. Temperatura elevada no sistema.....	41
2.6.6. Problemas com secadores de ar.....	41
2.6.7. Consumo elevado de energia.....	41
2.6.8. Falhas em válvulas e atuadores .....	42
2.6.9. Acúmulo de condensado nas tubulações.....	42
2.6.10. Dimensionamento inadequado do sistema.....	42
2.6.11. Presença de óleo no ar comprimido .....	42
2.7. ALTA UMIDADE.....	43
2.7.1. Formação e efeitos da umidade em sistemas de ar comprimido .....	43
2.7.2. Estratégias de controle da umidade em sistemas de ar comprimido ....	44

2.8. PRESSÃO EXCESSIVA.....	45
2.8.1. Efeitos da pressão excessiva.....	46
2.8.2. Causas comuns de pressão excessiva.....	47
2.8.3. Soluções para controlar a pressão excessiva .....	47
2.9. DIMENSIONAMENTO INADEQUADO.....	48
2.9.1. Efeitos do dimensionamento inadequado .....	49
2.9.2. Causas do dimensionamento inadequado.....	50
2.9.3. Como evitar o dimensionamento inadequado.....	51
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
3.1. REALIZAÇÃO DE DIAGNÓSTICO INICIAL DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO	53
3.2. DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS VAZAMENTOS EXISTENTES	55
3.3. DESENVOLVIMENTO DE ROTAS DE INSPEÇÃO .....	55
3.4. ANÁLISE DE CAUSA RAIZ E ELABORAÇÃO DE PLANOS DE AÇÃO CORRETIVOS	56
3.5. DESENVOLVIMENTO DE PLANO PREVENTIVO DE MANUTENÇÃO PARA REDES E EQUIPAMENTOS .....	56
3.6. CAPACITAÇÃO E TREINAMENTO DA EQUIPE TÉCNICA DE MANUTENÇÃO.....	56
3.7. IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS .....	56
<b>4. DIAGNÓSTICO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO DA INDÚSTRIA</b>	<b>60</b>
3.8. VAZAMENTOS EXCESSIVOS.....	60
3.9. INEFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	64
3.10. CUSTOS DE MANUTENÇÃO ELEVADOS .....	66
3.11. IMPACTO AMBIENTAL E EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	68
3.12. CICLO DE INEFICIÊNCIA.....	70
<b>4. IMPLEMENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES CORRETIVAS.....</b>	<b>72</b>

4.1. DIAGNÓSTICO INICIAL DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO .....	72
4.2. DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS VAZAMENTOS EXISTENTES	73
4.3. DESENVOLVIMENTO DE ROTAS DE INSPEÇÃO .....	76
4.4. ANÁLISE DA CAUSA RAIZ.....	78
4.5. PLANO PREVENTIVO DE MANUTENÇÃO PARA REDES E EQUIPAMENTOS .....	80
4.6. CAPACITAÇÃO E TREINAMENTO DA EQUIPE TÉCNICA E OPERADORES	82
4.7. IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS .....	84
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>87</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>90</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por eficiência energética nas indústrias tem impulsionado a busca por soluções que minimizem o consumo de recursos e maximizem a produtividade. Essa necessidade não está apenas atrelada à redução de custos, mas também à busca por uma maior sustentabilidade nos processos produtivos (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2024). Em empresas onde o uso de sistemas de ar comprimido é essencial para diversas operações, garantir a eficiência desses sistemas torna-se uma prioridade estratégica para otimizar os custos e melhorar o desempenho da planta como um todo.

Os sistemas de ar comprimido desempenham um papel crucial em muitas operações industriais, desde automação e movimentação de materiais até controle de processos e sistemas de segurança. No entanto, a geração de ar comprimido consome uma quantidade significativa de energia elétrica, o que impacta diretamente nos custos operacionais e na pegada ambiental da empresa. Se esses sistemas não forem bem dimensionados ou operarem fora das condições ideais, podem resultar em desperdício de energia, comprometendo tanto a economia quanto a sustentabilidade da operação (ATLAS COPCO, 2024).

As empresas têm se dedicado a aprimorar suas operações, buscando, além da otimização de produção, a eficiência energética. A melhoria da performance dos compressores de ar comprimido, um dos maiores consumidores de energia nas plantas industriais, tem sido um ponto central da estratégia. Este estudo de caso visa analisar as ações da Kepler Weber para otimizar o uso dos compressores de ar comprimido a parafuso em suas instalações. A pesquisa abrange desde o dimensionamento adequado desses compressores, passando por estratégias de manutenção preventiva e otimização operacional, até a implementação de tecnologias avançadas de monitoramento e controle. O estudo também examina os benefícios obtidos com a redução no consumo de energia, maior confiabilidade e redução de custos com manutenção (METALPLAN, 2024).

Com isso, o estudo busca não apenas destacar as melhores práticas adotadas pela empresa, mas também identificar áreas que ainda podem ser melhoradas. A eficiência energética, portanto, representa não apenas uma forma de reduzir custos, mas também uma maneira de garantir a competitividade e a sustentabilidade no longo prazo, alinhando a empresa

com as tendências globais de responsabilidade ambiental e inovação no setor industrial (ABNT, 2024).

## 1.1. JUSTIFICATIVA

A eficiência energética é um elemento indispensável para a competitividade das indústrias, impulsionada pela necessidade de reduzir custos operacionais, melhorar a eficiência dos processos e adotar práticas mais sustentáveis (ABNT, 2024). Entre os maiores consumidores de energia nas fábricas, os sistemas de ar comprimido desempenham um papel central em diversas operações industriais. A utilização desses sistemas exige atenção especial na detecção e correção de vazamentos, transformando essas ações em estratégias prioritárias para o uso eficiente dos recursos e a promoção da sustentabilidade (ATLAS COPCO, 2024).

Os vazamentos em sistemas de ar comprimido representam uma das principais fontes de desperdício energético, impactando diretamente os custos operacionais e comprometendo a eficiência do sistema. Esses vazamentos, muitas vezes difíceis de detectar, limitam o desempenho total dos equipamentos e sistemas. Estudos indicam que a eliminação de vazamentos pode reduzir o consumo de energia em até 30% sem comprometer a qualidade do ar comprimido (METALPLAN, 2024). Além disso, vazamentos não apenas elevam os custos, mas também contribuem para o aumento das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agravando os impactos ambientais e dificultando o cumprimento das metas de sustentabilidade (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2024).

A justificativa para este trabalho é sustentada por três pilares fundamentais:

### 1.1.1. Redução de custos operacionais e melhoria da eficiência energética.

Os vazamentos em sistemas de ar comprimido acarretam perdas significativas de energia, resultando em custos operacionais elevados. A identificação e correção desses problemas permitem uma redução substancial no consumo de energia, promovendo economias financeiras consideráveis. Estudos de caso demonstram que essas ações não apenas reduzem custos, mas também tornam os processos mais ágeis e eficientes (FLUKE, 2024).

### 1.1.2. Sustentabilidade e responsabilidade ambiental.

Em um cenário global onde a redução da pegada de carbono é cada vez mais necessária, a eficiência energética destaca-se como uma das maneiras mais eficazes de mitigar as emissões de gases de efeito estufa. A correção de vazamentos vai além de reduzir o consumo de energia;

ela demonstra o compromisso da empresa com o uso responsável dos recursos naturais, alinhando suas operações às melhores práticas ambientais e promovendo uma atuação socialmente responsável e sustentável (CEJN, 2024).

### **1.1.3. Aumento da competitividade e inovação tecnológica.**

Empresas que investem continuamente na inovação, podem obter benefícios significativos ao adotar tecnologias avançadas para o monitoramento e controle de vazamentos. A implementação de planos de manutenção preventiva e preditiva fortalece a competitividade, garantindo que os sistemas funcionem de maneira confiável e eficiente, enquanto alinham a empresa às tendências globais de sustentabilidade e excelência operacional (BIBLUS, 2024).

Este estudo propõe não apenas soluções específicas para a Kepler Weber, mas também visa preencher uma lacuna importante na gestão energética industrial. Apresentando um modelo prático e sustentável para a detecção e correção de vazamentos, o trabalho contribui para a melhoria da eficiência energética da empresa e promove o avanço das práticas de gestão de energia e manutenção preditiva em todo o setor industrial. Assim, busca-se integrar inovação, sustentabilidade e eficiência em um modelo de gestão que favoreça a competitividade e a responsabilidade ambiental no longo prazo.

## **1.2. CONTEXTO**

Com o aumento dos custos de energia elétrica e a necessidade de se adaptar a regulamentações ambientais mais rigorosas, as empresas têm revisado suas práticas operacionais. Nesse contexto, a eficiência no uso da energia tornou-se um pilar estratégico para as organizações que buscam reduzir custos, aumentar a competitividade no mercado global e atender às exigências ambientais (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2024). A gestão eficaz da energia não apenas gera benefícios financeiros, mas também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e promove o uso eficiente dos recursos naturais (ABNT, 2024).

Nos processos industriais, os compressores de ar comprimido estão entre os maiores consumidores de energia. Em grandes plantas, esses sistemas são amplamente utilizados em operações como automação, movimentação de produtos, controle de qualidade e segurança. Contudo, muitos desses sistemas operam com baixa eficiência devido a falhas no dimensionamento, manutenção inadequada ou falta de tecnologias atualizadas, resultando em desperdícios significativos de energia (METALPLAN, 2024).

Este trabalho se justifica pela crescente relevância da eficiência energética no setor industrial e pela oportunidade de aplicar soluções técnicas avançadas para otimizar processos de grande impacto. A gestão adequada da energia é um dos principais diferenciais competitivos para as empresas industriais, permitindo reduções de custo e maior alinhamento às demandas do mercado global. Estudos indicam que análises detalhadas dos sistemas, estratégias de manutenção proativas e o uso de tecnologias avançadas de monitoramento podem reduzir significativamente o desperdício de energia sem prejudicar a eficiência do sistema (FLUKE, 2024).

Além disso, a experiência prática, em uma empresa que combine diversidade de operações e foco em inovação, permite uma compreensão direta dos desafios enfrentados na gestão energética de compressores de ar comprimido. Pesquisas acadêmicas reforçam a relevância desse tema, destacando que a manutenção bem executada e o uso de sistemas de controle inteligentes podem gerar economias substanciais, promovendo uma operação mais eficiente e sustentável (ATLAS COPCO, 2024).

### 1.3. PROBLEMA

Os vazamentos em sistemas de ar comprimido representam uma das principais fontes de ineficiência energética nas operações industriais, impactando diretamente os custos operacionais e a sustentabilidade dos processos (CEJN, 2024). Esses sistemas desempenham um papel crucial em diversas atividades industriais, como automação, movimentação de materiais e controle de processos. Contudo, muitos sistemas operam de forma ineficiente devido à presença de vazamentos, que podem corresponder a até 30% do consumo total de energia em uma planta (KAESER COMPRESSORES, 2024).

A detecção de vazamentos, frequentemente pequenos e difíceis de identificar, é um desafio relevante para a maioria das indústrias. Esses vazamentos não apenas geram desperdício de energia, mas também comprometem a capacidade do sistema de atender à demanda de produção, aumentando significativamente os custos operacionais. A ausência de métodos adequados de monitoramento contínuo e a falta de uma estratégia integrada de manutenção preventiva são fatores críticos que perpetuam esses problemas.

Uma das principais deficiências no gerenciamento de vazamentos é a falta de uma abordagem sistemática e tecnológica que permita sua detecção e correção em tempo real. Embora a literatura técnica reconheça a importância de tais práticas, poucas empresas adotam

soluções eficazes, representando uma oportunidade significativa de melhoria (CUBI ENERGIA, 2024). A integração de tecnologias avançadas, como sensores inteligentes para detecção em tempo real, pode reduzir substancialmente o desperdício de energia, aumentar a eficiência dos sistemas e diminuir os custos operacionais.

Portanto, vazamentos em sistemas de ar comprimido exigem uma abordagem técnica que integre monitoramento contínuo, manutenção preditiva e o uso de tecnologias modernas. A ausência de estratégias eficazes de detecção e correção representa não apenas um desafio operacional, mas também uma oportunidade estratégica para promover maior eficiência energética, reduzir custos e garantir operações industriais mais sustentáveis (ENERGY STAR, 2024).

## 1.4. OBJETIVOS

### 1.4.1. Objetivo geral

Objetivo geral deste trabalho é implementar de sistema de monitoração e avaliação de resultados. Este sistema de monitoração se basear-se nas melhores práticas de engenharia de eficiência energética, manutenção preditiva e gestão de ativos.

### 1.4.2. Objetivos específicos

O objetivo específico deste trabalho é:

- Economia considerável de energia;
- Capacitação e treinamento da equipe;
- Aumento de confiabilidade e eficiência;
- Planejamento de manutenção preventiva;
- Análise da causa raiz dos vazamentos encontrados;
- Monitoramento através de indicadores;

## 1.5. ESTRUTURAÇÃO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. O primeiro aborda a introdução, apresentando o tema, a justificativa, os objetivos e a metodologia do estudo. O segundo explora a base teórica dos sistemas de ar comprimido industrial, abrangendo a composição do ar atmosférico, conceitos básicos, tipos de compressores e os subsistemas de geração, distribuição e consumo final, além dos problemas mais comuns no setor.

O terceiro detalha a metodologia utilizada, incluindo diagnóstico inicial, detecção de vazamentos, rotas de inspeção, análise de causa raiz, planos preventivos de manutenção, capacitação técnica e monitoramento contínuo, com ferramentas como sensores ultrassônicos, câmeras termográficas e medidores de vazão. O quarto apresenta o diagnóstico do sistema de ar comprimido da Kepler Weber, identificando vazamentos e consumo excessivo de energia.

O quinto descreve as soluções corretivas implementadas e os métodos de monitoramento adotados. Por fim, o sexto capítulo traz as conclusões, analisando os resultados obtidos, destacando a redução de consumo energético e custos, e oferecendo recomendações e propostas de replicabilidade para outras unidades industriais.

## 2. SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO INDUSTRIAL

O uso de sistemas de ar comprimido é uma prática comum e essencial em diversas indústrias, sendo aplicado em processos como automação, controle de máquinas, limpeza e movimentação de materiais. Esses sistemas são fundamentais por sua versatilidade e eficiência em fornecer energia de forma segura e controlada. Este capítulo, aborda a base teórica necessária para entender como funciona um sistema de ar comprimido industrial, discutindo desde a composição do ar atmosférico até os subsistemas de geração, distribuição e consumo final, além dos problemas mais comuns encontrados nas indústrias.

### 2.1. CONCEITOS BÁSICOS DE AR COMPRIMIDO

O ar comprimido é uma forma de energia armazenada obtida pela compressão do ar atmosférico. No processo de compressão, a pressão do ar é ampliada, o que reduz seu volume e eleva sua densidade. Essa transformação permite que o ar seja armazenado em reservatórios compactos e transportado por tubulações até os pontos de consumo, onde é liberado sob pressão para realizar trabalho. Esse trabalho mecânico pode ser utilizado em uma vasta gama de aplicações industriais, como na movimentação de máquinas, operação de ferramentas pneumáticas e em sistemas de controle automatizado (KAESER, 2024; METALPLAN, 2024).

#### 2.1.1. Propriedades do ar comprimido

O ar comprimido possui propriedades físicas essenciais que determinam seu comportamento durante a compressão, armazenamento e utilização.

A pressão do ar comprimido é uma das suas características fundamentais, pois está diretamente relacionada à quantidade de energia armazenada no sistema. A pressão é comumente medida em unidades como atmosferas (ATM), bar ou Pascal (Pa). Em sistemas industriais, a pressão do ar comprimido normalmente varia entre 6 bar e 10 bar, ou seja 600.000 a 1.000.000 pascal, mas pode ser superior dependendo das exigências específicas do processo ou da aplicação (PACCO,2011).

O aumento de pressão no ar comprimido resulta em uma maior densidade do ar, o que significa que mais moléculas de ar estão presentes em um determinado volume. Isso permite o armazenamento eficiente do ar em reservatórios menores e facilita o transporte do ar comprimido por longas distâncias (CEJN, 2024).

A temperatura do ar comprimido aumenta significativamente durante o processo de compressão. Esse aumento de temperatura ocorre devido à compressão adiabática, onde o ar é comprimido sem troca de calor com o ambiente. A temperatura do ar comprimido pode superar os 100°C em sistemas de alta pressão, o que pode representar um desafio técnico, pois se não resfriado, poderá danificar componentes devido a sua alta temperatura.

Esse aquecimento excessivo do ar comprimido deve ser controlado. Para minimizar esse problema, sistemas de refrigeração ou resfriadores de ar são frequentemente empregados, garantindo que a temperatura seja mantida dentro de faixas seguras para operação (ATLAS COPCO, 2024).

Uma das propriedades mais utilizadas do ar comprimido é sua capacidade de expansão. Quando o ar comprimido é liberado sob pressão, ele se expande rapidamente, podendo ser utilizado para gerar trabalho mecânico. Esse princípio é aplicado em motores pneumáticos, cilindros e ferramentas que utilizam o ar comprimido como fonte de energia (COELHO, 2025).

A expansão do ar comprimido é rápida e pode gerar uma força considerável, sendo aproveitada em diversos processos industriais, como na movimentação de pistões, controle de válvulas e na operação de sistemas de automação (METALPLAN, 2024).

A energia do ar comprimido é um conceito crucial para entender como ele pode ser utilizado para realizar trabalho. A quantidade de energia armazenada no ar comprimido pode ser calculada utilizando a equação de trabalho realizado por um gás ideal durante uma compressão adiabática (sem troca de calor com o ambiente) (CEJN, 2024).

A equação que descreve essa energia é:

Equação 1: Energia do ar comprimido

$$W = \frac{P_1 V_1}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (1)$$

Fonte: SMITH, R. 2019

Onde:

P1 e P2 são as pressões inicial e final do ar comprimido, respectivamente.

V1 é o volume inicial do ar.

$\gamma$  é o índice adiabático do ar, que é aproximadamente 1,4 para o ar seco.

Essa Equação 1 destaca como a pressão e o volume determinam a quantidade de energia que pode ser armazenada no ar comprimido. O índice adiabático ( $\gamma$ ) representa a relação entre a capacidade térmica do gás a pressão constante e a volume constante, sendo uma constante típica para o ar devido à sua composição predominante de nitrogênio e oxigênio (KAESER COMPRESSORES, 2024).

A equação demonstra que quanto maior a diferença de pressão entre o ponto inicial (P1) e o ponto final (P2), maior será a energia potencial acumulada no sistema. Essa energia pode ser convertida em trabalho mecânico ao liberar o ar comprimido, tornando-o uma fonte eficiente de energia para uma ampla gama de aplicações industriais (ATLAS COPCO, 2024).

## 2.2. TIPOS DE COMPRESSORES

Os compressores desempenham um papel fundamental nos sistemas de ar comprimido, sendo responsáveis por aumentar a pressão do ar e reduzir seu volume para armazenamento ou uso em processos industriais. Os compressores desempenham um papel fundamental nos sistemas de ar comprimido, sendo responsáveis por aumentar a pressão do ar e reduzir seu volume para armazenamento ou uso em processos industriais. Dependendo das características do processo e dos requisitos de operação, existem diferentes tipos de compressores, cada um com suas vantagens, desvantagens e aplicações específicas. A seguir, vamos explorar os principais tipos de compressores usados na indústria, suas características e as melhores práticas de uso. Dependendo das características do processo e dos requisitos de operação, existem diferentes tipos de compressores, cada um com suas vantagens, desvantagens e aplicações específicas. A seguir, os principais tipos de compressores usados na indústria, suas características e as melhores práticas de uso (ATLAS COPCO, 2024; KAESER COMPRESSORES, 2024).

### 2.2.1. Compressores alternativos (ou pistão)

Os compressores alternativos, também conhecidos como compressores de pistão, são amplamente reconhecidos como os tipos mais tradicionais e utilizados na indústria. Seu funcionamento baseia-se no movimento de um pistão dentro de um cilindro, comprimindo o ar à medida que o pistão realiza movimentos repetitivos de ida e volta. Esse mecanismo os torna particularmente adequados para aplicações que demandam altas pressões e versatilidade operacional (KAESER COMPRESSORES, 2024).

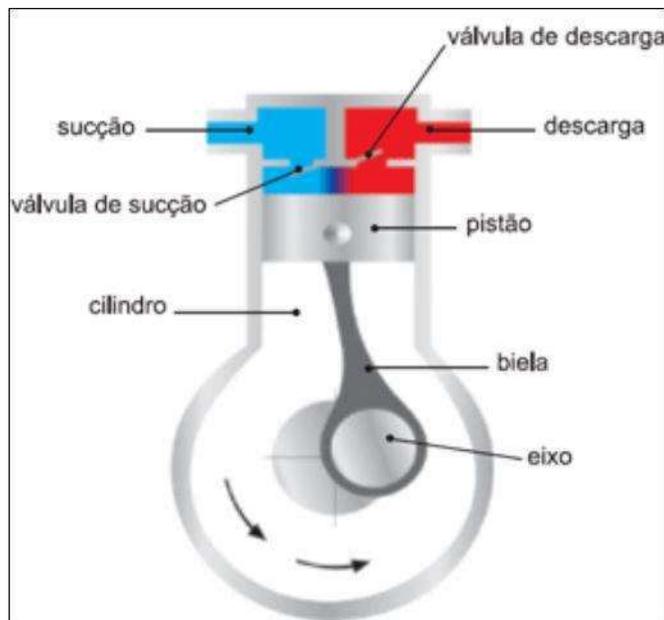
Entre as principais vantagens dos compressores alternativos, destaca-se a capacidade de atingir pressões elevadas, podendo superar 30 bar, o que os torna ideais para aplicações de alta pressão. Além disso, eles oferecem grande versatilidade, sendo utilizados em uma ampla gama de aplicações, desde pequenas oficinas até grandes instalações industriais. Outra vantagem é o custo inicial relativamente acessível, tornando-os uma escolha econômica para diversas necessidades (ARC, 2024).

No entanto, esses compressores também apresentam algumas limitações. O movimento mecânico intenso do pistão gera a necessidade de manutenção frequente, especialmente em componentes como pistões e vedações. Além disso, eles tendem a ser mais ruidosos durante a operação devido ao movimento repetitivo dos pistões, o que pode ser um fator relevante em determinados ambientes. Outra desvantagem está relacionada à eficiência em cargas variáveis, que pode ser reduzida quando a demanda de ar comprimido não é constante (HBR, 2024).

Os compressores alternativos são amplamente utilizados em indústrias pequenas e médias, em aplicações como oficinas, sistemas automotivos, ferramentas pneumáticas e sistemas de climatização. Eles também são comuns em indústrias que demandam alta pressão, como laboratórios e processos de embalagem a vácuo.

Figura 1 apresenta um exemplo típico de um compressor alternativo, ilustrando seu design interno e componentes principais.

Figura 1: Imagem interna compressor alternativo



Fonte: ARC (2024, s.p.).

### 2.2.2. Compressores rotativos

Os compressores rotativos são caracterizados por um design que utiliza um rotor girando dentro de um cilindro para comprimir o ar. À medida que o ar passa pelo espaço entre as lâminas ou entre o rotor e a parede do cilindro, ele é comprimido de maneira eficiente. Esses compressores possuem variações como os modelos de lâminas e os compressores rotativos parafuso, que são amplamente utilizados em diversas aplicações industriais (KAESER COMPRESSORES, 2024).

Entre as vantagens dos compressores rotativos, destaca-se sua operação contínua e suave, que elimina o impacto causado por movimentos mecânicos bruscos, como nos compressores alternativos. Isso resulta em menor vibração e níveis reduzidos de ruído durante o funcionamento. Além disso, esses compressores são particularmente eficientes em cargas variáveis, tornando-os ideais para aplicações onde a demanda de ar comprimido flutua. Outro benefício relevante é a baixa manutenção, já que esses compressores não possuem pistões ou válvulas móveis, componentes que requerem maior atenção em outros modelos (HBR, 2024).

Por outro lado, os compressores rotativos têm algumas limitações. Eles oferecem capacidade de pressão inferior, geralmente abaixo de 10 bar, o que pode restringir sua aplicação

em processos que demandam pressões mais altas. O custo inicial desses compressores também tende a ser mais elevado quando comparado a compressores alternativos de capacidade similar, o que pode ser um fator crítico para algumas empresas (ARC, 2024).

Esses compressores são amplamente aplicados em indústrias de médio porte, onde é necessária uma quantidade constante de ar comprimido a uma pressão moderada, como em sistemas de automação, controle de processos e na indústria alimentícia. Eles também são usados em sistemas de climatização e ar condicionado, especialmente em aplicações de HVAC e refrigeração. A Figura 2 apresenta um exemplo típico de compressor rotativo, destacando seu design interno que facilita o funcionamento contínuo e eficiente.

Figura 2: Imagem compressor rotativo



Fonte: Intermach (s.d., s.p.).

### 2.2.3. Compressores centrífugos

Os compressores centrífugos, também conhecidos como compressores de fluxo dinâmico, operam utilizando um rotor giratório que acelera o ar e aumenta sua pressão através de forças centrífugas. Essa tecnologia é amplamente empregada em aplicações industriais que demandam grandes volumes de ar a pressões moderadas, sendo especialmente eficaz em operações contínuas e de alta capacidade (KAESER COMPRESSORES, 2024).

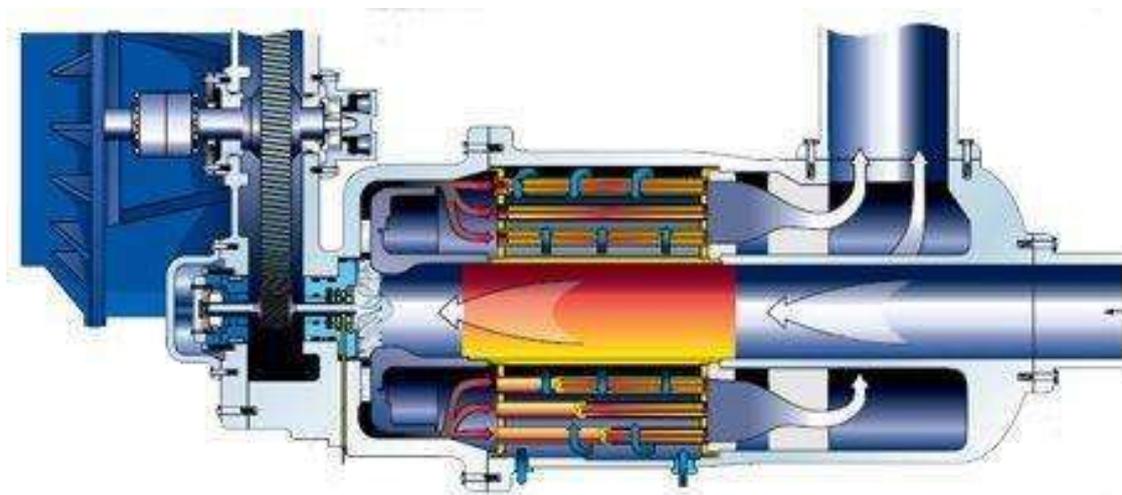
Entre as vantagens dos compressores centrífugos, destaca-se a alta capacidade de fluxo, tornando-os ideais para aplicações que exigem grandes volumes de ar comprimido a níveis de pressão baixos ou moderados. Eles operam de forma contínua e eficiente, com menos peças

móveis, o que reduz significativamente a necessidade de manutenção. Além disso, seu design de fluxo contínuo minimiza vibrações e níveis de ruído, proporcionando uma operação mais estável e silenciosa (HBR, 2024).

Por outro lado, esses compressores apresentam limitações relacionadas à capacidade de pressão, geralmente restrita a valores abaixo de 10 bar, o que pode ser um obstáculo para aplicações que exigem pressões mais altas. Outro fator relevante é o custo inicial elevado de aquisição e instalação, o que pode torná-los menos atrativos para empresas de menor porte ou com orçamento restrito (ARC, 2024).

As aplicações típicas de compressores centrífugos incluem indústrias de grande porte, como refinarias, petroquímicas e usinas de energia, onde é necessário movimentar grandes volumes de ar comprimido. Eles também são amplamente utilizados em sistemas de alta capacidade, como em resfriamento industrial e ventilação de edifícios de grande porte. A Figura 4 ilustra um exemplo de compressor centrífugo, destacando seu design interno que permite a operação contínua e eficiente.

Figura 3: Imagem interna compressor centrífugo



Fonte: HBR (s.d., s.p.).

#### 2.2.4. Compressores parafuso

Os compressores de parafuso são uma subcategoria de compressores rotativos que se destacam pelo design específico de seus dois parafusos (ou rotores). Esses parafusos giram em direções opostas, comprimindo o ar entre eles de maneira contínua e eficiente. Essa característica os torna uma escolha predominante para aplicações industriais de médio e grande

porte, onde o ar comprimido é necessário em grandes volumes e de forma constante (KAESER COMPRESSORES, 2024).

Entre as vantagens dos compressores de parafuso, a operação contínua e eficiente é um dos principais pontos. Diferentemente dos compressores alternativos, eles não apresentam picos de carga, proporcionando uma produção de ar mais estável e eficiente. Sua construção robusta, com menos peças móveis, reduz a necessidade de manutenção e aumenta a durabilidade. Essa confiabilidade permite que os compressores de parafuso operem continuamente, 24 horas por dia, 7 dias por semana, sem interrupções significativas (HBR, 2024).

Por outro lado, os compressores de parafuso apresentam algumas desvantagens. O custo inicial de aquisição é geralmente elevado, o que pode ser uma barreira para empresas com restrições orçamentárias. Além disso, apesar de requererem menos manutenção, quando são necessários reparos, sua tecnologia avançada pode tornar o processo mais complexo e custoso (INTERMACH, 2024).

Esses compressores são amplamente utilizados em indústrias de grande porte, como as dos setores automotivo, alimentício, têxtil e químico, onde a demanda por ar comprimido constante é alta. Também são essenciais em sistemas de produção contínuos, como na fabricação de produtos que requerem um fluxo estável e confiável de ar comprimido. A Figura 4 apresenta o design interno de um compressor de parafuso, destacando sua construção robusta e operação eficiente.

Figura 4: Imagem interna compressor parafuso



Fonte: Intermach (s.d., s.p.).

### 2.3. SUBSISTEMAS DE UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

Um sistema de ar comprimido é uma infraestrutura crítica em diversas aplicações industriais, fornecendo ar pressurizado para operações que exigem alta precisão, potência e eficiência, como no acionamento de ferramentas pneumáticas, sistemas de controle automatizados e processos industriais diversos. Esse sistema é composto por subsistemas interdependentes, que abrangem desde a geração do ar comprimido até sua utilização, passando pelo armazenamento, tratamento e distribuição, cada um desempenhando um papel fundamental na garantia do desempenho e da confiabilidade do sistema (KAESER COMPRESSORES, 2022; ATLAS COPCO, 2023).

#### 2.3.1. Geração de ar comprimido

O subsistema de geração de ar comprimido é a espinha dorsal de todo o sistema. Ele tem como principal componente o compressor de ar, responsável por capturar o ar atmosférico e pressurizá-lo para níveis superiores à pressão atmosférica. Dependendo das necessidades operacionais, o compressor pode ser alternativo, rotativo (*screw*) ou centrífugo. Cada tipo de compressor tem características específicas quanto à eficiência, capacidade e manutenção, sendo selecionado conforme o perfil de carga do sistema. O motor do compressor é o elemento que

fornece a energia necessária para a operação do compressor, sendo normalmente elétrico, embora versões movidas a combustível (gás ou diesel) também sejam utilizadas em locais onde a energia elétrica não está disponível ou para aplicações móveis (ATLAS COPCO, 2023; KAESER COMPRESSORES, 2022).

### **2.3.2. Armazenamento de ar comprimido**

Após a compressão, o ar precisa ser armazenado de maneira eficiente e segura para que possa ser utilizado de forma controlada. Este subsistema é composto pelos reservatórios de ar comprimido, que são tanques projetados para armazenar o ar sob alta pressão. Eles atuam como um buffer, estabilizando a pressão do sistema e permitindo que o ar comprimido seja disponibilizado de forma contínua, sem grandes flutuações. O dimensionamento do reservatório depende da demanda de ar e da capacidade do compressor, sendo dimensionado para garantir que o sistema atenda a picos de demanda sem comprometer a eficiência ou segurança (CAGGIANO, 2021; HENRY, 2020).

### **2.3.3. Distribuição de ar comprimido**

O subsistema de distribuição é responsável por transportar o ar comprimido desde o ponto de geração até os pontos de consumo. Ele inclui uma rede de tubulações, que devem ser projetadas para suportar as pressões elevadas do ar comprimido e para minimizar perdas de pressão durante o transporte. As válvulas de controle e regulação são essenciais neste processo, permitindo ajustar o fluxo e a pressão do ar e distribuí-lo de forma equilibrada entre os diferentes usuários. Além disso, filtros e separadores de água são componentes imprescindíveis, pois o ar comprimido pode conter impurezas e umidade que podem afetar o funcionamento dos equipamentos pneumáticos e comprometer a qualidade do processo. Filtros de partículas e separadores de água devem ser instalados de forma estratégica ao longo da rede de distribuição, garantindo que o ar fornecido esteja livre de contaminantes (CAGGIANO, 2021; HENRY, 2020).

### **2.3.4. Tratamento de ar comprimido**

O tratamento do ar comprimido é uma etapa fundamental, especialmente em sistemas que exigem ar de alta qualidade, como em processos industriais sensíveis ou no uso de ferramentas pneumáticas de precisão. O ar comprimido pode conter diversas impurezas, como

partículas sólidas, óleo e, principalmente, umidade, que podem causar danos aos equipamentos e reduzir a eficiência do sistema. Filtros são usados para remover as partículas sólidas, secadores de ar eliminam a umidade, seja por processos de resfriamento ou adsorção, e separadores de água são instalados para garantir que o ar comprimido esteja livre de condensação antes de ser utilizado. A qualidade do ar comprimido deve ser constantemente monitorada, e os equipamentos de tratamento devem ser mantidos regularmente para garantir sua eficiência (HENRY, 2020; METALWORK, 2022).

### **2.3.5. Utilização do ar comprimido**

O subsistema de utilização do ar comprimido é o destino final do ar pressurizado, onde ele é convertido em trabalho útil. Ferramentas pneumáticas, como chaves de impacto, furadeiras e lixadeiras, destacam-se como os principais dispositivos que utilizam o ar comprimido para executar tarefas com alta precisão e força. Cilindros pneumáticos, por sua vez, desempenham papel essencial em processos automatizados, permitindo o movimento linear de componentes e sendo indispensáveis em sistemas de controle industrial que exigem movimentos repetitivos e precisos. Além disso, sistemas de controle pneumático operam válvulas, atuadores e outros dispositivos, oferecendo uma solução eficiente para o controle de máquinas e processos, especialmente em ambientes onde a ausência de eletricidade é vantajosa, como locais com risco de explosão (HENRY, 2020; PARKER, 2022).

### **2.3.6. Sistema de segurança**

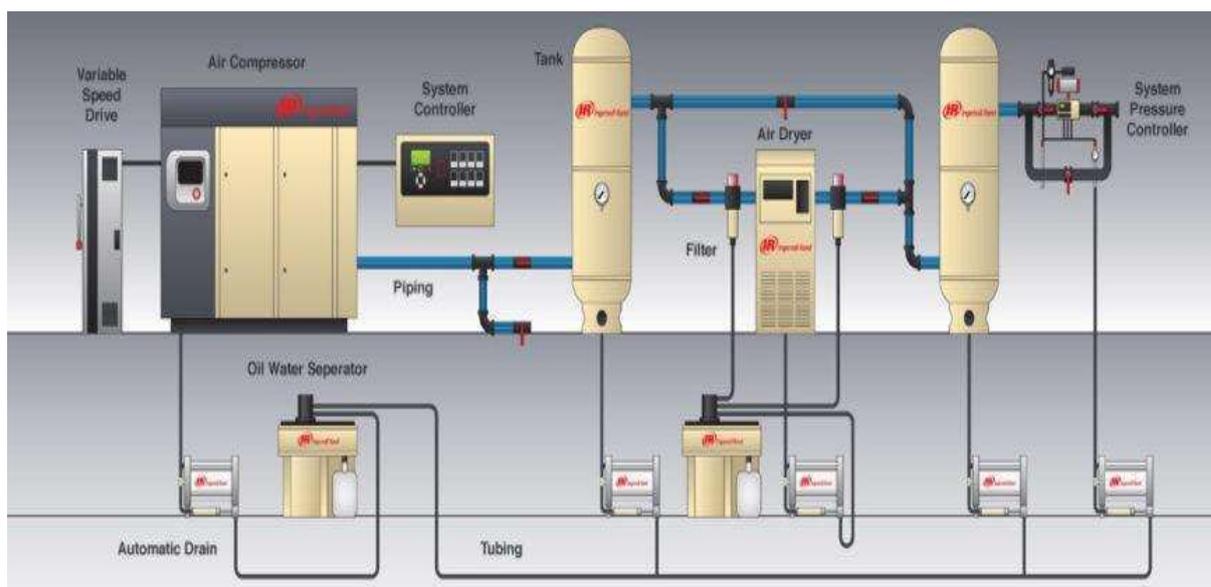
A segurança em sistemas de ar comprimido é fundamental para evitar acidentes e garantir a integridade do sistema e dos operadores. O subsistema de segurança inclui componentes como válvulas de alívio de pressão, que são ativadas quando a pressão no sistema atinge níveis excessivos, prevenindo a ruptura dos reservatórios ou danos aos outros componentes (HENRY, 2020). Dispositivos de desligamento automático também são importantes, pois interrompem o funcionamento do sistema em caso de falhas, como quedas inesperadas de pressão ou vazamentos significativos, protegendo tanto os equipamentos quanto os trabalhadores (SMITH, 2019).

Em resumo, um sistema de ar comprimido eficiente e confiável depende da integração e do bom funcionamento de todos os seus subsistemas. Cada componente, desde a geração até a utilização do ar comprimido, deve ser projetado, operado e mantido de acordo com as

melhores práticas, garantindo não apenas o desempenho adequado, mas também a segurança e a durabilidade do sistema (ISO 8573-1:2010; NORDIN; GRAHAM, 2023).

Figura 5 ilustra de forma detalhada a composição do subsistema de ar comprimido, destacando os elementos de segurança e integração entre os componentes.

Figura 5: Subsistema ar comprimido



Fonte: ARC (2024, s.p.).

## 2.4. DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO

A escolha do tipo de tubulação para sistemas de ar comprimido é um aspecto crucial no design e operação de qualquer instalação industrial. A tubulação é responsável por transportar o ar comprimido do compressor até os pontos de consumo, e sua seleção impacta diretamente na eficiência do sistema, nos custos operacionais e na longevidade dos componentes. Existem diversas opções de materiais para as tubulações de ar comprimido, cada um com características específicas que os tornam mais adequados para diferentes condições de operação, como pressão, temperatura e ambiente. Essas diferenças podem ser observadas na Tabela 1, que detalha os benefícios, limitações e aplicações ideais de cada material. Nesse contexto, a análise criteriosa dessas opções é essencial para o planejamento eficiente de sistemas industriais (HENRY, 2020).

Tabela 1: Diferenças entre tubulações

	ALUMÍNIO	PPR (PLÁSTICO)	PRETO (AÇO CARBONO)	GALVANIZADO (AÇO CARBONO)	AÇO INOX
<i>Eficiência energética</i>	excelente ●	bom ●	ruim ●	regular ●	excelente ●
<i>Perda de carga</i>	mínima ●	baixa ●	alta ●	média ●	baixa ●
<i>Vazamentos</i>	0% ●	0% ●	15 ~ 20% ●	15 ~20% ●	0% ●
<i>Rugosidade interna</i>	mínima ●	baixa ●	alta ●	média ●	baixa ●
<i>Resist. à corrosão</i>	excelente ●	excelente ●	baixa ●	média ●	excelente ●
<i>Resist. ao calor</i>	alta ●	alta/baixa ●	alta ●	alta ●	alta ●
<i>Resist. ao impacto</i>	alta ●	baixa ●	alta ●	alta ●	alta ●
<i>Resist. radiação UV</i>	alta ●	média ●	alta ●	alta ●	alta ●
<i>Resist. a hidrocarbonetos</i>	alta ●	baixa ●	alta ●	alta ●	muito alta ●
<i>Resist. à pressão</i>	alta ●	baixa ●	muito alta ●	muito alta ●	baixa ●
<i>Pintura externa</i>	eletrostática (azul) ●	pigmento azul ●	exige pintura ●	exige pintura ●	exige pintura ●
<i>Reutilizável</i>	sim ●	eventualmente ●	eventualmente ●	eventualmente ●	eventualmente ●
<i>Tempo de montagem</i>	muito baixo ●	médio ●	alto ●	médio ●	alto ●
<i>Pressão x Temp.</i>	16/70 bar(e) a 100°C ●	20 bar(e) a 20°C ●	OK ●	OK ●	OK ●
<i>Distância entre suportes</i>	3 a 4 metros ●	0,4 a 1,4 metro ●	3 a 4 metros ●	3 a 4 metros ●	3 a 4 metros ●

Fonte: Togawa Engenharia (2018, s.p.).

#### 2.4.1. Aço carbono

O aço carbono é, de longe, o material mais tradicional e amplamente utilizado em sistemas de ar comprimido, especialmente em ambientes industriais de médio e grande porte. Sua robustez e resistência mecânica fazem dele a escolha preferencial para instalações que exigem alta capacidade de pressão. O aço carbono é econômico em termos de custo inicial, o que o torna acessível para projetos de grande escala (VCP AUTOMAÇÃO, 2025).

No entanto, uma das principais desvantagens do aço carbono é sua suscetibilidade à corrosão. Quando exposto a ambientes úmidos ou quando o sistema de ar comprimido gera condensados com alta umidade, as tubulações de aço carbono podem sofrer desgaste prematuro. Para mitigar esse problema, é fundamental que o sistema de distribuição tenha um bom controle de condensado, com a instalação de drenagens automáticas e a utilização de revestimentos anticorrosivos, como pintura epóxi ou galvanização (BRASIL AÇOS, 2025).

Em sistemas de alta pressão onde a resistência a impactos e abrasão é necessária, o aço carbono continua sendo uma opção bastante confiável, desde que a manutenção seja realizada

adequadamente. A Figura 6, exemplifica uma instalação típica, demonstrando sua aplicação em sistemas industriais robustos (NORDIN; GRAHAM, 2023).

Figura 6: Tubulação de aço carbono



Fonte: GMF Montagens (s.d., s.p.).

#### 2.4.2. Alumínio

O alumínio tem ganhado popularidade como alternativa ao aço em sistemas de ar comprimido, especialmente em aplicações que exigem leveza e resistência à corrosão. O alumínio é particularmente vantajoso para instalações menores ou para sistemas onde a redução de peso seja um fator relevante. Sua resistência à corrosão natural, o torna ideal para ambientes com alta umidade ou com risco de exposição a substâncias agressivas, é um dos principais pontos a seu favor. Além disso, o alumínio não requer revestimentos adicionais, o que simplifica a instalação e reduz os custos operacionais (PLAMAN,2025).

Outro benefício do alumínio é sua facilidade de instalação, já que ele é mais leve e pode ser cortado e manipulado com mais facilidade em comparação com materiais mais pesados, como o aço. No entanto, o alumínio possui limitações em termos de resistência à pressão, sendo mais adequado para sistemas de baixa a média pressão. Seu uso em sistemas de alta pressão não é recomendado devido à menor resistência mecânica quando comparado ao aço carbono ou inoxidável (COMPRACO,2025).

Além disso, o custo do alumínio tende a ser mais elevado que o do aço carbono, o que pode impactar o orçamento de projetos de grande porte. No entanto, para instalações que não exigem alta pressão, o alumínio oferece uma excelente relação custo-benefício. A Figura 7 ilustra uma aplicação típica deste material em sistemas de ar comprimido (NORDIN; GRAHAM, 2023).

Figura 7: Tubulação de alumínio



Fonte: Kaeser Compressores (s.d., s.p.).

### 2.4.3. Cobre

O cobre é amplamente reconhecido pela sua resistência à corrosão e condutividade térmica. Ele é particularmente útil em sistemas de ar comprimido em que a pureza do ar é uma prioridade, como em indústrias farmacêuticas, alimentícias e de semicondutores. O cobre não enferruja nem libera partículas contaminantes no ar comprimido, o que o torna ideal para aplicações em que a qualidade do ar é fundamental (SMITH, 2019). Além disso, sua excelente condutividade térmica ajuda a dissipar o calor do ar comprimido, evitando o superaquecimento nas tubulações (MASTERTECH,2025).

No entanto, o custo elevado do cobre e sua menor resistência mecânica em comparação com o aço o tornam uma escolha mais viável para sistemas de menor porte ou onde a qualidade do ar seja a principal consideração. O cobre também pode ser vulnerável ao desgaste por abrasão e a danos mecânicos, o que limita sua aplicação em sistemas com alta movimentação ou condições agressivas (NORDIN; GRAHAM, 2023). A Figura 8 ilustra a aplicação deste material em sistemas industriais de ar comprimido.

Figura 8: Tubulação de cobre



Fonte: Blog Parker (2019, s.p).

#### 2.4.4. Tubulação plástica (pvc, pex, pe)

As tubulações plásticas, como policloreto de vinila (PVC), polietileno reticulado (PEX) e polietileno (PE), são uma solução econômica e de fácil instalação para sistemas de ar comprimido, principalmente em aplicações menores ou temporárias. O PVC é a opção mais comum, oferecendo boa resistência à corrosão e facilidade de manipulação. No entanto, o PVC é limitado em termos de resistência à pressão e temperatura e deve ser usado apenas em sistemas de baixa pressão (ATLAS COPCO, 2025).

O PEX e o PE, por sua vez, oferecem maior flexibilidade e resistência ao desgaste, sendo utilizados principalmente em instalações que exigem tubulações que possam ser facilmente moldadas ou que precisem passar por áreas de difícil acesso. Essas tubulações também têm boa resistência química e são mais adequadas para sistemas que operam em temperaturas mais baixas (NORDIN; GRAHAM, 2023).

Apesar de suas vantagens em termos de custo e facilidade de instalação, as tubulações plásticas apresentam limitações significativas em termos de pressão máxima e temperatura. Elas não são indicadas para sistemas de alta pressão ou para ambientes onde a temperatura do ar comprimido seja elevada (SMITH, 2019). A Figura 9 exemplifica a aplicação dessas tubulações em sistemas industriais de menor porte.

Figura 9: Tubulação PEX



Fonte: Hidrodema (s.d.,s.p.).

#### 2.4.5. Aço inoxidável (aço inox)

O aço inoxidável é a escolha ideal para sistemas de ar comprimido em ambientes altamente corrosivos ou onde a pureza do ar comprimido seja uma prioridade. Ele é amplamente utilizado em setores como o alimentício, farmacêutico e químico, onde o risco de contaminação do ar comprimido é elevado. O aço inoxidável oferece alta resistência à corrosão, especialmente em ambientes agressivos ou quando há a presença constante de umidade, e tem uma longa vida útil, o que justifica o custo mais elevado (HENRY, 2020; SMITH, 2019).

Além disso, o aço inoxidável possui excelente resistência à pressão e à temperatura, o que o torna adequado para sistemas de alta performance e que operam em condições extremas. No entanto, o preço do aço inox é significativamente mais alto do que o de outros materiais, o que o torna uma opção menos econômica para sistemas de grande porte que não exigem características tão específicas. A Figura 10 exemplifica a aplicação desse material em instalações industriais exigentes.

Figura 10: Tubulação de inox



Fonte: Atlas Copco (s.d., s.p.).

## 2.5. CONSUMO FINAL DE AR COMPRIMIDO

O consumo final de ar comprimido em equipamentos e ferramentas pneumáticas é um dos componentes mais críticos a serem gerenciados dentro de um sistema industrial. O ar comprimido é uma fonte fundamental de energia para uma variedade de ferramentas industriais, como chaves de impacto, parafusadeiras, martelos pneumáticos, lixadeiras e furadeiras, sendo utilizado para gerar a força ou movimento necessário para a execução de uma ampla gama de tarefas (HENRY, 2020; SMITH, 2019).

A demanda por ar comprimido nessas ferramentas pode variar consideravelmente de acordo com o tipo de equipamento, a aplicação, e, principalmente, as condições operacionais. Essa variabilidade exige um planejamento eficiente para dimensionar corretamente o sistema de ar comprimido e evitar desperdícios de energia, ao mesmo tempo em que se assegura o fornecimento contínuo para todas as operações críticas da planta industrial (ISO 8573-1:2010).

### 2.5.1. Como as ferramentas pneumáticas consomem ar comprimido

Ferramentas pneumáticas funcionam convertendo a energia do ar comprimido em energia mecânica para executar tarefas que variam de corte a aparafusamento, passando por lixamento e perfuração. O consumo de ar comprimido de cada ferramenta é determinado pela vazão (medida em metros cúbicos por minuto –  $m^3/min$ ) e pela pressão (em bares ou psi) necessárias para realizar o trabalho (HENRY, 2020). Ferramentas de maior potência, como martelos pneumáticos ou chaves de impacto, exigem grandes volumes de ar comprimido devido

à alta força ou velocidade de operação necessárias para tarefas pesadas. Ferramentas de menor porte e menos exigentes, como parafusadeiras e lixadeiras, consomem ar de forma mais contínua, porém em volumes menores (SMITH, 2019).

A quantidade de ar comprimido utilizado por essas ferramentas depende de sua demanda energética, que, por sua vez, é influenciada pela pressão necessária para o funcionamento adequado da ferramenta, pelo tempo de operação e pelo tipo de tarefa a ser realizada. Ferramentas como chaves de impacto podem ter picos de consumo em curtos intervalos de tempo, enquanto ferramentas como lixadeiras pneumáticas apresentam um consumo mais constante, mas menos intenso (ISO 8573-1:2010).

### **2.5.2. Fatores críticos que influenciam o consumo de ar**

O consumo de ar comprimido em ferramentas pneumáticas é influenciado por uma série de fatores que impactam diretamente a eficiência e o desempenho do sistema. O tipo e o tamanho da ferramenta são determinantes, pois equipamentos maiores, como martelos pneumáticos e chaves de impacto de alto torque, demandam maior vazão de ar devido à alta potência necessária para suas operações. Já ferramentas menores, como furadeiras e parafusadeiras, requerem volumes menores de ar, sendo mais eficientes em termos de consumo (SMITH, 2019).

Outro fator crucial é a pressão de operação, que define o volume de ar necessário para gerar a potência ou o movimento requerido pela ferramenta. Equipamentos que operam em alta pressão, como chaves de impacto, apresentam consumo elevado, enquanto ajustes inadequados da pressão podem causar desperdícios ou comprometer o desempenho da ferramenta (ISO 8573-1:2010).

Os ciclos de trabalho também desempenham um papel significativo. Ferramentas usadas em operações contínuas, como em linhas de montagem, consomem ar de forma constante durante longos períodos. Por outro lado, ferramentas utilizadas em tarefas esporádicas, como manutenção e reparos, apresentam picos de consumo em intervalos curtos, o que pode gerar variações significativas no volume de ar necessário (HENRY, 2020).

A eficiência e a manutenção das ferramentas são igualmente importantes. Ferramentas bem mantidas, com vedações e mecanismos internos em bom estado, consomem menos ar para realizar as mesmas tarefas, enquanto ferramentas desgastadas ou com vazamentos demandam volumes maiores, gerando desperdícios desnecessários de energia. A manutenção regular é

fundamental para garantir que as ferramentas funcionem com a máxima eficiência (NORDIN; GRAHAM, 2023).

Por fim, os acessórios e conexões utilizados no sistema de ar comprimido também impactam o consumo. Mangueiras de diâmetro inadequado ou comprimento excessivo podem causar perdas de pressão, obrigando o compressor a operar em maior capacidade para compensar essas perdas. Conexões mal ajustadas ou de baixa qualidade também podem levar a vazamentos, prejudicando a eficiência geral do sistema e aumentando o consumo de ar comprimido (SMITH, 2019).

Portanto, a gestão adequada desses fatores é essencial para otimizar o consumo de ar comprimido, reduzir desperdícios e melhorar a eficiência energética em sistemas pneumáticos.

### **2.5.3. Medição e monitoramento do consumo de ar**

Para gerenciar de maneira eficiente o consumo de ar comprimido em ferramentas pneumáticas, é fundamental realizar medições precisas e monitorar constantemente o fluxo de ar nas linhas de distribuição. A instalação de medidores de vazão ao longo do sistema de distribuição de ar permite que o volume de ar consumido por cada ferramenta ou conjunto de ferramentas seja monitorado em tempo real. Esses medidores fornecem dados essenciais para a análise do consumo de ar, ajudando na identificação de padrões e anomalias no uso do sistema (SMITH, 2019).

Além disso, em ambientes industriais com múltiplas ferramentas, é possível implementar sistemas de monitoramento em tempo real que ajudam a identificar picos de consumo e desperdícios. Tais sistemas permitem a detecção de ineficiências e possibilitam a implementação de ações corretivas antes que se tornem problemas maiores, como falhas no compressor ou aumento desnecessário nos custos operacionais (HENRY, 2020). A instalação de sensores de pressão nas ferramentas também é uma prática recomendada, pois garante que a pressão de operação esteja dentro dos parâmetros ideais, evitando desperdícios de ar comprimido. A pressão inadequada pode resultar em consumo excessivo de ar, comprometendo a eficiência do sistema como um todo (ISO 8573-1:2010).

O uso dessas tecnologias de monitoramento não só contribui para a eficiência do sistema, mas também ajuda a reduzir o desperdício de energia e os custos operacionais a longo prazo, ao garantir que as ferramentas operem dentro de suas especificações ideais (NORDIN; GRAHAM, 2023).

#### **2.5.4. Estratégias para otimizar o consumo de ar nas ferramentas pneumáticas**

A otimização do consumo de ar comprimido nas ferramentas pneumáticas não só contribui para a redução dos custos operacionais, mas também favorece a sustentabilidade e a eficiência energética dentro do ambiente industrial. Algumas das principais estratégias para reduzir o consumo de ar incluem o investimento em ferramentas de alta eficiência, o ajuste adequado da pressão de operação, o treinamento dos operadores e o monitoramento constante para detectar e corrigir vazamentos.

Investir em ferramentas pneumáticas de alta eficiência energética é uma das formas mais eficazes de reduzir o consumo de ar comprimido. Essas ferramentas são projetadas para maximizar o desempenho com o mínimo de consumo de energia, utilizando tecnologias de controle de vazão e reguladores automáticos de pressão. Ferramentas modernas que incorporam sistemas de fluxo otimizado e controle de pressão ajustável permitem uma operação mais eficiente sem comprometer a performance necessária para o processo (HENRY, 2020).

Além disso, o ajuste da pressão de operação é um fator essencial para a otimização do consumo de ar. Utilizar reguladores de pressão tanto nas ferramentas quanto nas linhas de distribuição ajuda a manter a pressão no nível ideal para cada aplicação, evitando desperdícios de ar devido a pressões excessivas e garantindo que as ferramentas funcionem de forma eficiente (ISO 8573-1:2010).

Outra estratégia importante é o treinamento dos operadores, que desempenham um papel crucial na gestão do consumo de ar comprimido. Operadores bem treinados podem reduzir significativamente o desperdício, ajustando corretamente a pressão das ferramentas, desligando-as quando não estão em uso e evitando o uso excessivo de ar para tarefas não essenciais, como a limpeza de áreas de trabalho (SMITH, 2019). Esse tipo de treinamento, além de melhorar a eficiência operacional, também promove um ambiente de trabalho mais sustentável.

Por fim, o monitoramento e a correção de vazamentos são fundamentais para evitar perdas desnecessárias de ar comprimido. A detecção de vazamentos pode ser feita com o auxílio de tecnologias avançadas, como dispositivos ultrassônicos, que identificam pequenas falhas nas linhas de distribuição ou nas ferramentas. Reparos rápidos e eficazes garantem que o ar comprimido seja utilizado de maneira otimizada, sem perdas contínuas que impactem diretamente os custos operacionais (NORDIN; GRAHAM, 2023).

## 2.6. PROBLEMAS COMUNS EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

Os sistemas de ar comprimido são elementos essenciais em muitas indústrias e instalações, servindo como fontes de energia para uma vasta gama de aplicações, desde a automação industrial até o controle de ferramentas pneumáticas e sistemas de climatização. Embora esses sistemas sejam projetados para funcionar de forma eficiente e confiável, uma série de falhas pode ocorrer com o tempo, comprometendo o desempenho e a segurança. A seguir, são descritos os principais problemas que afetam os sistemas de ar comprimido e as práticas recomendadas para sua resolução e prevenção.

### 2.6.1. Vazamentos no sistema

Os vazamentos de ar são, sem dúvida, uma das falhas mais comuns em sistemas de ar comprimido. Eles podem surgir em diferentes pontos do sistema, incluindo conexões, tubulações, válvulas e até nas próprias saídas do compressor. A presença de vazamentos não só reduz a eficiência do sistema, como também aumenta significativamente os custos operacionais, uma vez que o compressor precisa trabalhar mais para manter a pressão desejada. A detecção e reparo de vazamentos devem ser realizadas de forma sistemática e regular, utilizando tecnologia de sensores de ultrassom e equipamentos de teste de pressão (ASHRAE, 2019).

### 2.6.2. Insuficiência de pressão

A perda ou insuficiência de pressão pode ocorrer devido a diversos fatores, como falhas mecânicas no compressor, bloqueios nas tubulações ou falha no controle da válvula de pressão. A insuficiência de pressão afeta diretamente a performance dos equipamentos dependentes do ar comprimido, resultando em falhas operacionais e redução da produtividade. Um monitoramento contínuo e a análise detalhada do sistema de pressão são cruciais para identificar e corrigir esse problema antes que cause impactos mais graves (ISO 8573-1, 2010).

### 2.6.3. Contaminação do ar comprimido

A qualidade do ar comprimido é um fator crítico para o funcionamento adequado de muitos sistemas. A contaminação do ar pode ocorrer por partículas sólidas, água ou óleos presentes nas linhas de ar. A presença de umidade, em particular, pode causar corrosão nas tubulações e nos componentes sensíveis do sistema, além de afetar a qualidade do ar entregue aos equipamentos. Filtros de alta eficiência e secadores de ar são essenciais para evitar esses problemas. Além disso, o controle rigoroso da drenagem de condensados também é

fundamental para garantir que a umidade seja removida antes de atingir os pontos de utilização (SMITH, 2019).

#### **2.6.4. Falhas no compressor**

O compressor é o coração do sistema de ar comprimido e, se não mantido corretamente, pode sofrer desgastes que afetam seu desempenho e eficiência. Problemas comuns incluem falha na lubrificação, desgaste de peças internas, falhas nos controles de temperatura e pressão, e problemas com as correias. A manutenção preventiva regular, que inclui a verificação do nível de óleo, limpeza dos filtros de ar e inspeção das peças móveis, é fundamental para garantir a longevidade do compressor e evitar paradas inesperadas (HENRY, 2020).

#### **2.6.5. Temperatura elevada no sistema**

Durante a compressão, o ar gerado naturalmente aquece. Se o sistema de resfriamento não for adequado ou não funcionar corretamente, o aumento excessivo da temperatura pode comprometer a eficiência do sistema, além de danificar componentes como secadores de ar e válvulas. Manter a temperatura do ar comprimido dentro de faixas operacionais seguras é essencial, e para isso é necessário realizar a limpeza periódica dos sistemas de resfriamento e monitorar constantemente as temperaturas de operação (NORDIN, 2023).

#### **2.6.6. Problemas com secadores de ar**

Os secadores de ar são fundamentais para a remoção da umidade do ar comprimido, evitando a formação de condensado nas linhas e nos equipamentos. No entanto, esses dispositivos podem apresentar falhas devido ao excesso de carga, falhas no controle de temperatura ou até desgaste dos componentes internos. Secadores mal mantidos ou mal dimensionados podem permitir a passagem de água para o sistema, o que resulta em danos aos equipamentos e redução da qualidade do ar comprimido. A substituição de filtros e o monitoramento do desempenho do secador são práticas essenciais para evitar esses problemas (ISO 8573-2, 2010).

#### **2.6.7. Consumo elevado de energia**

Um sistema de ar comprimido ineficiente é uma das maiores fontes de desperdício energético em muitas indústrias. Vazamentos de ar, pressões inadequadas, funcionamento contínuo de compressores e falta de otimização do sistema de controle podem resultar em um consumo excessivo de energia, elevando os custos operacionais. A adoção de tecnologias de

controle de pressão, sistemas de acionamento variável e a utilização de técnicas de manutenção preditiva são práticas recomendadas para garantir que o sistema opere de maneira otimizada e eficiente, reduzindo o impacto ambiental e os custos energéticos (HAYES, 2021).

#### **2.6.8. Falhas em válvulas e atuadores**

Válvulas e atuadores são componentes críticos no controle do fluxo de ar comprimido. Problemas comuns incluem falhas de vedação, obstrução por partículas ou desgaste, o que pode levar a flutuações de pressão e falhas no controle do processo. A manutenção adequada dessas peças, que inclui a limpeza, lubrificação e substituição de componentes desgastados, é crucial para o bom funcionamento do sistema. A instalação de válvulas de alta qualidade e a utilização de materiais resistentes à abrasão também ajudam a minimizar essas falhas (SANTOS, 2020).

#### **2.6.9. Acúmulo de condensado nas tubulações**

A condensação ocorre quando o ar comprimido resfria e a umidade presente no ar se transforma em água. Se não for removida de maneira eficaz, a água acumulada pode causar corrosão nas tubulações e nas partes internas dos equipamentos. O uso de drenos automáticos e secadores de ar adequados para a aplicação são fundamentais para minimizar os efeitos da condensação, mantendo as linhas de ar limpas e funcionando de forma eficiente (SMITH, 2019).

#### **2.6.10. Dimensionamento inadequado do sistema**

O dimensionamento incorreto de um sistema de ar comprimido pode resultar em uma série de problemas, como baixa eficiência, sobrecarga de componentes e aumento do consumo de energia. Sistemas subdimensionados ou superdimensionados podem causar falhas frequentes e operação ineficiente. Para garantir que o sistema atenda às necessidades de produção sem desperdícios, é essencial realizar um estudo detalhado de demanda, levando em consideração os requisitos de fluxo de ar e pressão em diferentes condições operacionais (MARTIN, 2020).

#### **2.6.11. Presença de óleo no ar comprimido**

Em sistemas de compressão a óleo, uma quantidade mínima de óleo pode ser transportada junto ao ar comprimido. Isso pode afetar a qualidade do ar, danificar equipamentos sensíveis e interferir no funcionamento de ferramentas pneumáticas, por exemplo (ASHRAE, 2019).

## 2.7. ALTA UMIDADE

A umidade é um dos problemas mais desafiadores e impactantes em sistemas de ar comprimido, afetando diretamente sua eficiência, confiabilidade e longevidade. O ar comprimido, ao ser gerado por um compressor, contém uma quantidade de vapor de água que, quando o ar é resfriado durante o processo de distribuição, se condensa. Essa água líquida, chamada de condensado, pode se acumular nas linhas de ar comprimido e causar uma série de problemas em toda a instalação. Quando o condensado não é removido adequadamente, ele pode levar à corrosão das tubulações e dos componentes do sistema, afetando a qualidade do ar comprimido e danificando equipamentos sensíveis. Além disso, o excesso de umidade pode prejudicar o desempenho de ferramentas pneumáticas e outros dispositivos, comprometendo a eficiência operacional e resultando em custos elevados com manutenção e substituição de peças. Para entender a magnitude desse problema e suas soluções, é importante analisar os principais efeitos da umidade e como controlá-la de forma eficaz no sistema (SCHERER, 2017).

### 2.7.1. Formação e efeitos da umidade em sistemas de ar comprimido

A umidade no ar comprimido é gerada durante o processo de compressão, quando o ar comprimido atinge temperaturas elevadas. Após a compressão, o ar aquecido é liberado para o sistema. À medida que se expande e sua temperatura diminui, pode alcançar o ponto de orvalho, momento em que o vapor de água presente no ar se condensa, formando gotas de água que podem se acumular nas linhas e comprometer o funcionamento do sistema (HENRY, 2020).

Esse acúmulo de umidade tem diversos efeitos adversos. Um dos principais é a corrosão das tubulações e equipamentos. A água condensada nas tubulações é altamente corrosiva, podendo causar danos significativos às estruturas metálicas. Esse processo enfraquece as instalações ao longo do tempo e gera ferrugem, que pode se desprender e ser transportada pelo ar comprimido, contaminando ferramentas pneumáticas e outros dispositivos sensíveis (ISO 8573-1:2010).

Além disso, a umidade causa danos diretos aos equipamentos pneumáticos, como válvulas e cilindros. Depósitos de água e ferrugem nas partes móveis dos equipamentos aumentam o atrito e o desgaste, resultando em falhas precoces. Esses problemas também interferem nos processos de lubrificação, agravando o desgaste e comprometendo o desempenho geral do sistema (NORDIN; GRAHAM, 2023).

Outro impacto significativo ocorre nos secadores de ar, que são responsáveis por remover a umidade do ar comprimido antes de seu uso. Quando há excesso de condensado, esses dispositivos podem ser sobrecarregados, especialmente se não forem dimensionados ou mantidos adequadamente. A umidade residual que passa para os pontos de utilização pode comprometer a qualidade do ar e causar falhas nos equipamentos conectados ao sistema (SMITH, 2019).

A eficiência energética do sistema também é prejudicada pela presença de umidade. A água acumulada gera maior resistência ao fluxo de ar, exigindo mais trabalho do compressor para manter a pressão desejada. Isso aumenta o consumo de energia e os custos operacionais, impactando diretamente a sustentabilidade e a eficiência do sistema (HENRY, 2020).

Nos sistemas que utilizam secadores de adsorção, o resfriamento do ar comprimido é uma etapa fundamental para remover a umidade. Contudo, se a quantidade de água for excessiva, pode ocorrer o congelamento nas superfícies internas do secador, o que obstrui o fluxo de ar e reduz a eficiência do processo de secagem. Em ambientes com temperaturas muito baixas, esse problema se torna ainda mais crítico, podendo levar à falha completa do secador e do sistema como um todo (NORDIN; GRAHAM, 2023).

### **2.7.2. Estratégias de controle da umidade em sistemas de ar comprimido**

Controlar a umidade no sistema de ar comprimido é essencial para garantir a eficiência operacional e prolongar a vida útil dos equipamentos. A adoção de estratégias e tecnologias específicas permite gerenciar a umidade de forma eficaz, evitando problemas como corrosão, falhas em equipamentos e perda de eficiência energética (HENRY, 2020).

Uma das principais medidas de controle é a instalação de secadores de ar, que removem a água condensada do ar comprimido e garantem que ele esteja seco o suficiente para ser utilizado. Existem diferentes tipos de secadores, cada um adequado a condições e necessidades específicas. Os secadores refrigerados, por exemplo, resfriam o ar comprimido até que a umidade se condense, permitindo sua drenagem. Eles são eficientes em sistemas de médio porte onde a quantidade de umidade não é excessiva. Já os secadores de adsorção utilizam materiais como sílica gel ou carvão ativado para remover a umidade, sendo indicados para aplicações que exigem níveis extremamente baixos de umidade, como processos industriais sensíveis. Para sistemas menores e portáteis, os secadores de membrana, que usam membranas semipermeáveis para eliminar a umidade, oferecem uma solução eficiente e flexível (ISO 8573-1:2010).

Além dos secadores, o uso de filtros e separadores de água é outra prática eficaz para controlar a umidade. Filtros coalescentes são especialmente eficientes na remoção de água líquida que se condensa durante a compressão, enquanto separadores são utilizados para retirar grandes volumes de condensado diretamente das linhas de ar comprimido. Essa combinação de dispositivos ajuda a proteger os equipamentos e a manter a qualidade do ar em todo o sistema (SMITH, 2019).

A drenagem automática de condensados é uma solução prática para gerenciar a água acumulada nas linhas de ar comprimido. Dispositivos de drenagem automática são projetados para remover o condensado em pontos críticos do sistema, como após os secadores ou filtros. Isso evita que a umidade seja transportada para os equipamentos, assegurando o funcionamento contínuo e eficiente do sistema (NORDIN; GRAHAM, 2023).

Outro aspecto crítico é o controle da temperatura do ar comprimido, uma medida preventiva para evitar a condensação da umidade. Quando o ar comprimido é mantido em temperaturas constantes e dentro de faixas ideais, as chances de atingir o ponto de orvalho são significativamente reduzidas. Em sistemas com grandes variações térmicas, a instalação de trocadores de calor ou sistemas de resfriamento adequados pode ser necessária para estabilizar a temperatura e prevenir a formação de condensado (HENRY, 2020).

Por fim, a manutenção preventiva e o monitoramento contínuo são fundamentais para garantir que os dispositivos de controle de umidade estejam funcionando corretamente. Inspeções regulares, testes de eficiência dos secadores, verificação de filtros e monitoramento do ponto de orvalho ajudam a prevenir problemas relacionados à umidade. Calibrar adequadamente os medidores de ponto de orvalho e monitorar os níveis de umidade são práticas recomendadas para manter o sistema em condições ideais (ISO 8573-1:2010; SMITH, 2019).

## 2.8. PRESSÃO EXCESSIVA

A pressão excessiva em sistemas de ar comprimido é uma questão comum que pode causar sérios impactos tanto na operação quanto na vida útil dos equipamentos. Embora seja indispensável que os sistemas operem dentro de uma faixa de pressão adequada para assegurar eficiência, níveis de pressão superiores ao necessário podem resultar em uma série de problemas. Esses impactos incluem o aumento dos custos operacionais devido ao consumo desnecessário de energia, danos aos equipamentos sensíveis e até mesmo riscos à segurança operacional, como falhas estruturais em tubulações e componentes do sistema (HENRY, 2020).

Manter a pressão dentro dos parâmetros corretos não apenas previne o desperdício energético, mas também promove maior durabilidade e confiabilidade do sistema, contribuindo para uma operação segura e econômica (NORDIN; GRAHAM, 2023).

### **2.8.1. Efeitos da pressão excessiva**

A pressão excessiva em sistemas de ar comprimido gera impactos significativos na eficiência, segurança e nos custos operacionais. O efeito mais direto é o aumento no consumo de energia. Quando o compressor opera com pressões superiores às necessárias, a energia exigida para comprimir o ar é significativamente maior, elevando os custos de operação. Esse problema é agravado em sistemas que mantêm altas pressões constantes sem necessidade, sobrecarregando o compressor e resultando em desperdício energético sem um benefício real para o processo (HENRY, 2020).

Outro impacto relevante é o desgaste prematuro de componentes do sistema. Pressões acima do especificado pelos fabricantes criam um estresse adicional em válvulas, tubulações e conexões, reduzindo sua vida útil. Peças essenciais, como pistões, anéis de vedação e válvulas, podem sofrer danos ou falhas precoces, aumentando a necessidade de manutenções corretivas e os custos associados (SMITH, 2019).

Além disso, a pressão excessiva representa um risco significativo para ferramentas e dispositivos pneumáticos. Equipamentos como parafusadeiras, martelos pneumáticos e cilindros são projetados para operar dentro de faixas específicas de pressão. A exposição a níveis acima do recomendado pode causar danos irreversíveis a essas ferramentas, prejudicando sua eficiência e resultando em falhas inesperadas que interrompem processos produtivos (ISO 8573-1:2010).

A eficiência operacional do sistema também é comprometida. Componentes como secadores de ar, filtros e reguladores são otimizados para uma faixa de pressão específica. Pressões excessivas podem interferir nesses processos, prejudicando a qualidade do ar comprimido e reduzindo a confiabilidade e precisão dos processos industriais (NORDIN; GRAHAM, 2023).

Por fim, a segurança do sistema é uma preocupação crítica. Componentes que não foram projetados para suportar altas pressões podem falhar, causando rupturas ou explosões em casos extremos. Esses eventos ameaçam a integridade do sistema, gerando riscos de acidentes, danos

materiais e possíveis lesões aos operadores. A manutenção de válvulas de alívio de pressão e reguladores adequados é fundamental para evitar esses cenários (HENRY, 2020).

### **2.8.2. Causas comuns de pressão excessiva**

A pressão excessiva em sistemas de ar comprimido pode ser causada por diversos fatores, sendo a falha nos reguladores de pressão uma das razões mais comuns. Esses dispositivos, fundamentais para manter o controle da pressão dentro dos limites desejados, podem apresentar falhas devido ao desgaste ou à acumulação de sujeira, permitindo que a pressão aumente além do necessário (HENRY, 2020). Além disso, configurações inadequadas do compressor também podem contribuir para o problema. Quando o compressor é dimensionado para uma demanda de ar superior à real necessidade, ele frequentemente opera com pressão acima do ideal, resultando em desperdício de energia e sobrecarga do sistema (SMITH, 2019).

Causa recorrente é a falta de monitoramento e controle adequados. Sem sistemas de medição confiáveis ou reguladores automáticos de pressão, a elevação da pressão pode passar despercebida, causando danos progressivos ao sistema (NORDIN; GRAHAM, 2023). A ausência de manutenção preventiva, como ajustes regulares nas válvulas de alívio de pressão, também pode ser um fator agravante. Caso essas válvulas estejam desreguladas ou apresentem defeitos, elas não conseguem liberar a pressão extra acumulada, potencializando os riscos associados à pressão excessiva (ISO 8573-1:2010).

### **2.8.3. Soluções para controlar a pressão excessiva**

A prevenção e correção da pressão excessiva em sistemas de ar comprimido requerem uma abordagem sistemática que combine ajustes de componentes fundamentais e a adoção de boas práticas operacionais. Um aspecto essencial desse processo é o ajuste e a calibração adequada dos reguladores de pressão, que devem ser realizados conforme as necessidades específicas do sistema e as características do processo. A calibração regular é indispensável para manter a pressão dentro dos limites ideais e, juntamente com a manutenção preventiva, ajuda a identificar peças desgastadas que necessitem de substituição (HENRY, 2020).

Além disso, o dimensionamento correto do compressor desempenha um papel crucial na eficiência e segurança do sistema. Um compressor superdimensionado pode gerar pressões superiores às necessárias, resultando em desperdício de energia e sobrecarga dos componentes.

Garantir que o dimensionamento seja alinhado à demanda real do sistema não só melhora a eficiência energética, mas também minimiza riscos operacionais (SMITH, 2019).

O monitoramento contínuo da pressão é outra estratégia eficaz, pois a instalação de manômetros e sensores em pontos críticos permite detectar variações indesejadas com rapidez. Esses dispositivos possibilitam ajustes imediatos, evitando que a pressão excessiva cause danos. Tecnologias automatizadas de controle de pressão também podem ser implementadas para ajustar dinamicamente os níveis de pressão com base nas demandas do processo (ISO 8573-1:2010).

Manutenções preventivas regulares são fundamentais para assegurar o bom funcionamento de todos os componentes do sistema, incluindo as válvulas de alívio de pressão. Essas válvulas devem ser testadas frequentemente para garantir sua eficácia. Caso apresentem falhas ou estejam mal ajustadas, a pressão pode se acumular no sistema, gerando riscos à operação (NORDIN; GRAHAM, 2023).

O treinamento adequado da equipe operacional é indispensável para o sucesso dessas práticas. Operadores capacitados podem identificar sinais de problemas de pressão e agir rapidamente para evitar danos. Isso inclui conhecimentos sobre o ajuste correto da pressão, a verificação de reguladores e válvulas, e a execução de monitoramentos eficientes em todo o sistema (HENRY, 2020).

## 2.9. DIMENSIONAMENTO INADEQUADO

O dimensionamento inadequado de sistemas de ar comprimido é frequentemente responsável por problemas operacionais e custos elevados em ambientes industriais. Este recurso, amplamente utilizado em diversos processos industriais, exige uma abordagem criteriosa na escolha de equipamentos e no planejamento do sistema. Um dimensionamento incorreto pode resultar em desafios significativos, como desperdício de energia, sobrecarga de componentes e redução da vida útil dos equipamentos. Esses problemas impactam diretamente a eficiência energética e a produtividade da empresa, além de aumentar os custos de manutenção e operação (HENRY, 2020; SMITH, 2019).

Para mitigar esses riscos, é fundamental que o dimensionamento do sistema seja realizado com precisão. Isso inclui a análise detalhada das demandas atuais e futuras, considerando possíveis expansões e flutuações na necessidade de ar comprimido ao longo do tempo. Essa abordagem permite que o sistema seja projetado para operar de forma eficiente e

atender às exigências do processo industrial, evitando subdimensionamento ou superdimensionamento, ambos prejudiciais à eficiência do sistema (ISO 8573-1:2010; NORDIN; GRAHAM, 2023).

### **2.9.1. Efeitos do dimensionamento inadequado**

Um sistema de ar comprimido mal dimensionado pode trazer uma série de impactos negativos, tanto operacionais quanto financeiros, para a empresa. Um dos efeitos mais imediatos é o aumento significativo no consumo de energia. Quando o compressor é subdimensionado, ele precisa operar continuamente em regime de sobrecarga para atender à demanda de ar comprimido, o que resulta em um gasto excessivo de energia (HENRY, 2020). Em contrapartida, um compressor superdimensionado opera frequentemente em baixa carga, desperdiçando energia, já que funciona com capacidade maior do que a necessária para o processo. Ambos os cenários geram custos operacionais elevados (SMITH, 2019).

Problema crítico é o desgaste acelerado dos componentes do sistema. Em condições de sobrecarga, peças móveis como pistões e válvulas são submetidas a esforços mecânicos contínuos, o que acelera o desgaste e eleva a necessidade de manutenção. Já em sistemas superdimensionados, os componentes podem operar de forma irregular, com ciclos que não são ideais, o que também leva a falhas e maior frequência de reparos (NORDIN; GRAHAM, 2023).

A falta de dimensionamento adequado pode resultar em flutuações de pressão no sistema. Pressões inconsistentes afetam diretamente o desempenho de ferramentas pneumáticas e outros dispositivos que exigem uma pressão constante para funcionar corretamente. Essas flutuações comprometem a qualidade dos processos industriais, tornando-os menos eficientes e mais propensos a erros (ISO 8573-1:2010).

Impacto significativo é a perda de eficiência em componentes como secadores de ar e filtros. Secadores subdimensionados podem não remover a umidade de forma eficiente, causando problemas como condensação e comprometimento da qualidade do ar comprimido. Por outro lado, o superdimensionamento desses componentes pode gerar custos adicionais sem trazer benefícios proporcionais (SMITH, 2019).

O custo inicial de instalação também pode ser um problema em sistemas superdimensionados. Equipamentos como compressores e tubulações de maior capacidade têm custos significativamente mais altos, representando um investimento inicial elevado que, muitas vezes, não se justifica pela demanda real do sistema (HENRY, 2020).

A qualidade do ar comprimido também pode ser comprometida em sistemas mal dimensionados. Um compressor subdimensionado pode ter dificuldades em manter a pressão adequada, o que pode levar ao aumento da umidade ou até contaminações no ar comprimido. Isso prejudica não apenas a eficiência do sistema, mas também a segurança das operações que dependem de um ar comprimido de alta qualidade (ISO 8573-1:2010; NORDIN; GRAHAM, 2023).

### **2.9.2. Causas do dimensionamento inadequado**

O dimensionamento inadequado de sistemas de ar comprimido pode ser causado por diversos fatores interrelacionados, que muitas vezes comprometem a eficiência e a confiabilidade do sistema. Uma das causas mais frequentes é a falta de conhecimento técnico por parte dos responsáveis pelo projeto. O dimensionamento adequado requer uma análise técnica detalhada das necessidades de ar e das condições operacionais do processo. Quando essa análise não é realizada de forma precisa, a escolha do compressor, das tubulações e de outros componentes pode ser feita de maneira equivocada, resultando em falhas de desempenho (HENRY, 2020).

A subestimação da demanda de ar é outro fator relevante. Engenheiros de projeto que não consideram adequadamente as variações de consumo, como os picos de demanda ou as cargas adicionais em determinados momentos, podem acabar projetando sistemas subdimensionados. Esse tipo de erro leva a um fornecimento insuficiente de ar comprimido, sobrecarregando o compressor e comprometendo os processos industriais (SMITH, 2019).

A falta de planejamento para expansão futura também é uma falha recorrente. Sistemas projetados apenas para atender à demanda atual, sem levar em conta o crescimento da produção ou mudanças nos processos, rapidamente se tornam inadequados. Isso resulta em investimentos adicionais para ajustes e ampliações, que poderiam ter sido evitados com um planejamento estratégico inicial (NORDIN; GRAHAM, 2023).

A escolha inadequada dos componentes do sistema. O dimensionamento de filtros, secadores, válvulas, reservatórios e tubulações deve ser tão cuidadoso quanto a seleção do compressor. Quando esses componentes são selecionados de forma inadequada, a eficiência do sistema é comprometida, aumentando os custos operacionais e reduzindo a confiabilidade (ISO 8573-1:2010).

A ausência de monitoramento contínuo e de ajustes ao longo do tempo é um fator que contribui para a perpetuação de problemas de dimensionamento. Sem um acompanhamento regular das condições operacionais, deficiências no sistema podem passar despercebidas, impedindo a realização de correções necessárias. Essa prática é especialmente relevante em ambientes onde a demanda por ar comprimido pode variar ao longo do tempo devido a mudanças nos processos ou na produção (HENRY, 2020; SMITH, 2019).

### **2.9.3. Como evitar o dimensionamento inadequado**

Para evitar os problemas associados ao dimensionamento inadequado de sistemas de ar comprimido, é essencial adotar práticas recomendadas que assegurem uma operação eficiente e confiável do sistema. O primeiro passo envolve a realização de uma análise detalhada da demanda de ar, considerando tanto o consumo contínuo quanto os picos de demanda. Essa análise deve mapear o uso de ar comprimido em cada etapa do processo produtivo, levando em conta variações diárias e sazonais, além de prever possíveis expansões na produção. Esse cuidado ajuda a evitar o subdimensionamento, que pode levar à sobrecarga dos equipamentos (HENRY, 2020).

A escolha de equipamentos adequados é outro aspecto crucial. O compressor deve ser dimensionado com base na demanda real do sistema, garantindo eficiência energética e evitando o desgaste excessivo de seus componentes. Além disso, é necessário dimensionar corretamente todos os elementos do sistema, como secadores, filtros e tubulações, assegurando que atendam ao fluxo de ar e às condições operacionais específicas (ISO 8573-1:2010).

O planejamento para expansões futuras é igualmente importante. Sempre que possível, o sistema deve ser projetado com flexibilidade para acomodar aumentos na demanda sem a necessidade de uma reestruturação completa. Isso inclui a seleção de componentes que possam suportar volumes maiores de ar comprimido, evitando a necessidade de investimentos adicionais a curto prazo (NORDIN; GRAHAM, 2023).

A manutenção preventiva e o monitoramento contínuo são práticas indispensáveis para o bom funcionamento do sistema ao longo do tempo. Acompanhamento regular da pressão, consumo de energia e qualidade do ar comprimido permite identificar falhas precocemente e ajustar o sistema conforme necessário. Essa abordagem reduz a incidência de problemas e garante a eficiência operacional (SMITH, 2019).

Treinamento adequado das equipes técnicas é essencial para evitar falhas de operação e garantir o melhor desempenho do sistema. Profissionais capacitados compreendem as melhores práticas de operação, manutenção e dimensionamento, minimizando riscos de sobrecarga ou operação inadequada (HENRY, 2020).

### 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada para este estudo de caso será composta por diferentes etapas, a fim de garantir uma análise detalhada e a implementação de melhorias no sistema de ar comprimido da Kepler Weber, conforme Figura 11.

Figura 11: Fluxo do processo



Fonte: Autor

#### 3.1. REALIZAÇÃO DE DIAGNÓSTICO INICIAL DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

A primeira etapa consiste em um diagnóstico detalhado e mapeamento completo da infraestrutura de ar comprimido da Kepler Weber. Este levantamento deve incluir a identificação dos pontos críticos de vazamento, análise do estado atual das instalações e avaliação dos componentes mais suscetíveis a falhas, como compressores, válvulas e conexões. Essa fase é fundamental para compreender as vulnerabilidades do sistema e traçar um plano de ação assertivo, alinhado às melhores práticas de eficiência energética e sustentabilidade (KAESER COMPRESSORES, 2024).

A abordagem integrada do diagnóstico permite identificar perdas invisíveis a olho nu e definir ações corretivas e preventivas que garantam a eficiência do sistema. Segundo Atlas Copco (2024), um levantamento bem estruturado pode reduzir desperdícios de energia em até 30%, além de prolongar a vida útil dos componentes. Assim, o mapeamento inicial é um passo essencial para o sucesso das intervenções planejadas (ENERGY STAR, 2024). consiste em um diagnóstico detalhado e mapeamento completo da infraestrutura de ar comprimido da Kepler Weber. Este levantamento deve incluir a identificação dos pontos críticos de vazamento, análise do estado atual das instalações e avaliação dos componentes mais suscetíveis a falhas (compressores, válvulas, conexões, etc.). Esta fase é fundamental para entender as vulnerabilidades do sistema e traçar um plano de ação assertivo.

Essa equação 2 é uma ferramenta eficaz para identificar os custos de energia elétrica de acordo com o uso real, consumida por um compressor em um sistema industrial. Ela leva em consideração a potência consumida pelo equipamento, o tempo de operação e o custo da energia elétrica. A fórmula é representada como:

$$C_{Anual} = P \times h \times d \times k \quad (2)$$

A equação, (C) Anual representa o custo anual de energia elétrica, expresso em reais (R\$), ou seja, o valor total gasto em energia elétrica para operar o compressor durante um ano. (P) refere-se à potência consumida pelo compressor, medida em kilowatt-hora (kWh), indicando a quantidade de energia elétrica utilizada pelo equipamento em uma hora de funcionamento. (h) é o número de horas de operação do compressor por dia, um parâmetro essencial para determinar a utilização diária do equipamento. (d) é a quantidade de dias que o compressor opera ao longo do ano, considerando a frequência de uso, que pode variar conforme a rotina operacional. Por fim, (k) representa o custo da energia elétrica por kWh, geralmente expresso em reais (R\$/kWh), dependendo da tarifa de energia aplicada na região onde o sistema está localizado.

A equação calcula o custo anual de operação do compressor multiplicando todos os fatores que contribuem para o consumo de energia: a potência consumida (P), o tempo de operação diário (h), os dias de funcionamento por ano (d) e o custo unitário da energia (k). Essa equação é amplamente utilizada para avaliar os custos operacionais de sistemas que utilizam compressores de ar, permitindo identificar oportunidades de economia de energia. Por exemplo, ao ajustar os tempos de operação (h) ou otimizar a eficiência do compressor (P), pode-se reduzir significativamente o custo anual de energia elétrica (C Anual).

A equação 3 apresentada tem como objetivo conhecer o custo ajustado da manutenção preventiva de um sistema com base na carga atual em operação. Isso permite que os custos sejam proporcionalmente ajustados conforme o nível de utilização do sistema, refletindo de forma mais precisa a necessidade de manutenção preventiva.

O custo ajustado da manutenção preventiva é dado por:

$$C_{\text{Manutenção Ajustado}} = \frac{C_{\text{Manutenção Total}} \times C_{\text{Carga atual}}}{100} \quad (3)$$

Neste cálculo, o custo ajustado da manutenção preventiva (C Manutenção Ajustado) é obtido multiplicando o custo total da manutenção preventiva (C Manutenção Total) pela fração que representa a porcentagem da carga em operação (Carga Atual / 100).

O conceito principal é que, quando a carga atual em operação é menor do que 100%, o custo da manutenção preventiva também é reduzido proporcionalmente, já que o desgaste e a necessidade de manutenção são menores.

Quando a carga atual está próxima de 100%, o custo ajustado se aproxima do custo total da manutenção, pois o sistema está operando em sua capacidade máxima. Em contrapartida, cargas menores reduzem proporcionalmente os custos, refletindo a menor utilização do sistema.

### 3.2. DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS VAZAMENTOS EXISTENTES

A detecção precisa dos vazamentos é uma etapa crítica para a otimização do sistema. Utilizando ferramentas especializadas, como sensores ultrassônicos e câmeras termográficas, será possível localizar com precisão os vazamentos no sistema. Além disso, será necessário quantificar o impacto desses vazamentos no consumo de energia, utilizando medidores de vazão e pressão para avaliar a magnitude do problema e priorizar as intervenções (CEJN, 2024; KAESER COMPRESSORES, 2024).

### 3.3. DESENVOLVIMENTO DE ROTAS DE INSPEÇÃO

Com base nas características do sistema, será criada uma rotina de inspeções e monitoramentos periódicos, com a definição de pontos de controle e intervalos de tempo para verificação do sistema de ar comprimido. As rotas de inspeção também incluirão a verificação de componentes críticos como filtros, válvulas e compressores, para garantir que os vazamentos sejam identificados e corrigidos rapidamente (ABNT, 2024; METALPLAN, 2024).

### 3.4. ANÁLISE DE CAUSA RAIZ E ELABORAÇÃO DE PLANOS DE AÇÃO CORRETIVOS

Após a detecção dos vazamentos, será realizada uma análise de causa raiz (RCA) para identificar as razões subjacentes dos vazamentos, como falhas no dimensionamento, instalação inadequada ou desgaste dos componentes. Com base nesse diagnóstico, serão elaborados planos de ação corretivos que visem a substituição de peças danificadas, ajustes nos parâmetros de operação do sistema e até modificações no layout da rede de ar comprimido, visando aumentar sua confiabilidade e eficiência (CEJN, 2024; ENERGY STAR, 2024).

### 3.5. DESENVOLVIMENTO DE PLANO PREVENTIVO DE MANUTENÇÃO PARA REDES E EQUIPAMENTOS

Será elaborado um plano de manutenção preventiva para os sistemas de ar comprimido e equipamentos industriais da Kepler Weber, com foco em componentes críticos que estão mais sujeitos a vazamentos. O plano incluirá a definição de intervalos de manutenção, a inspeção regular de conexões, válvulas, filtros, compressores e outras partes da infraestrutura, além de ajustes necessários para otimizar o desempenho. A adoção de manutenção preditiva, por meio do uso de dados de monitoramento em tempo real, também será um componente chave para antecipar falhas antes que se tornem críticas (KAESER COMPRESSORES, 2024; METALPLAN, 2024).

### 3.6. CAPACITAÇÃO E TREINAMENTO DA EQUIPE TÉCNICA DE MANUTENÇÃO

O sucesso na implementação do plano de inspeção e manutenção depende diretamente da capacitação da equipe de manutenção. Serão realizados treinamentos especializados para capacitar os operadores e técnicos da Kepler Weber no uso das ferramentas de monitoramento, na identificação precoce de vazamentos e na execução das práticas de manutenção preventiva. O treinamento contínuo da equipe também garantirá que as boas práticas sejam seguidas de forma consistente e eficaz (ABNT, 2024; ATLAS COPCO, 2024).

### 3.7. IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Após a aplicação das medidas corretivas e preventivas, será necessário estabelecer um sistema contínuo de monitoramento para avaliar a eficácia das ações implementadas. A coleta de dados sobre a pressão, fluxo e consumo de energia será essencial para verificar se os

vazamentos foram efetivamente eliminados e se a eficiência do sistema foi otimizada. A avaliação periódica dos resultados permitirá ajustes nas rotas de inspeção e nas estratégias de manutenção (ABNT, 2024; KAESER COMPRESSORES, 2024).

A abordagem proposta para sanar os vazamentos e otimizar o sistema de ar comprimido na empresa é baseada em uma análise técnica minuciosa, desde o diagnóstico inicial até a implementação de um plano preventivo robusto, utilizando ferramentas de monitoramento avançadas e tecnologias de ponta. O objetivo é não só eliminar vazamentos existentes, mas também prevenir sua recorrência, melhorando a eficiência energética, reduzindo os custos operacionais e aumentando a sustentabilidade das operações industriais. A abordagem integrada, incluindo diagnóstico, monitoramento em tempo real, manutenção preventiva e treinamento contínuo da equipe, garantirá um sistema mais eficiente e sustentável (ATLAS COPCO, 2024; METALPLAN, 2024).

A equação 4 apresentada, para monitoramento e avaliação dos resultados é utilizada para calcular as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) associadas ao consumo de eletricidade em um sistema ou processo. Essa métrica é fundamental para avaliar o impacto ambiental das operações em relação às emissões de gases de efeito estufa.

$$ECO_2 = C_{Eletricidade} \times F_{Emiss\tilde{a}o} \quad (4)$$

A equação considera dois componentes principais. O primeiro é (C) Eletricidade, que representa o consumo total de eletricidade utilizado pelo sistema, medido em quilowatt-hora (kWh). Este valor reflete a energia elétrica consumida em um determinado período. O segundo componente, (F) Emissão, é o fator de emissão de CO<sub>2</sub>, medido em quilogramas de CO<sub>2</sub> por quilowatt-hora (kgCO<sub>2</sub>/kWh). Este fator pode variar entre valores altos e baixos, dependendo da matriz energética da região. Em regiões que utilizam fontes de energia limpa, como solar ou eólica, o fator de emissão é baixo, refletindo um impacto ambiental reduzido. Por outro lado, em regiões dependentes de fontes fósseis, como carvão ou petróleo, o fator de emissão é alto, indicando um impacto ambiental maior.

Essa equação é amplamente utilizada para estimar o impacto ambiental de um sistema, permitindo que se avaliem as emissões de CO<sub>2</sub> geradas pelo consumo de energia elétrica. Além disso, é uma ferramenta importante para monitorar emissões, identificar oportunidades de redução e cumprir metas de sustentabilidade ambiental, considerando o impacto das diferentes matrizes energéticas.

A equação 5 para calcular o custo total do sistema operacionais de ar comprimido, assim podendo monitorar os custos de vazamentos, depreciação dos equipamentos e a manutenção dos mesmos dada por:

$$C_{Total} = C_{Vazamentos} + C_{Depreciação} + C_{Manutenção} \quad (5)$$

O custo total anual do sistema de ar comprimido ( $C_{Total}$ ) é a soma de três componentes principais: o custo associado aos vazamentos de ar, o custo de depreciação dos equipamentos e o custo com a manutenção do sistema.

O primeiro componente, ( $C_{Vazamentos}$ ), refere-se ao custo da energia desperdiçada por vazamentos no sistema. Quando há vazamentos de ar comprimido, o compressor precisa trabalhar mais para manter a pressão necessária no sistema, o que resulta em um aumento no consumo de energia. Isso pode ser uma das maiores fontes de desperdício de energia em sistemas de ar comprimido, pois até mesmo vazamentos pequenos podem gerar grandes perdas financeiras ao longo do tempo.

O segundo componente, ( $C_{Depreciação}$ ), trata do custo relacionado à depreciação dos equipamentos do sistema. Com o tempo, os equipamentos como compressores, tubulações, filtros e secadores perdem seu valor devido ao desgaste e à obsolescência. Esse custo de depreciação reflete a perda de valor dos equipamentos à medida que envelhecem, o que pode afetar a eficiência do sistema, pois peças mais antigas tendem a ser menos eficientes e podem necessitar de substituição mais frequente.

Por fim, o ( $C_{Manutenção}$ ), que corresponde ao custo de manutenção preventiva ou corretiva, envolve as despesas necessárias para garantir que o sistema de ar comprimido continue funcionando de forma eficiente. A manutenção preventiva inclui ações regulares como a troca de filtros e a revisão periódica dos equipamentos, enquanto a manutenção corretiva lida com reparos quando ocorrem falhas no sistema. O custo com manutenção pode variar dependendo da idade e da complexidade do sistema.

Essa equação é útil para empresas que utilizam sistemas de ar comprimido, pois permite calcular de forma clara e detalhada todos os custos operacionais envolvidos. Ao analisar esses custos, é possível identificar áreas onde é possível reduzir gastos, como eliminando vazamentos, otimizando os processos de manutenção ou planejando melhor a substituição de equipamentos. Essa abordagem pode contribuir para uma gestão mais eficiente do sistema,

ajudando a reduzir os gastos com energia e melhorando a eficiência operacional geral da empresa.

## 4. DIAGNÓSTICO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO DA INDÚSTRIA

O diagnóstico do sistema de ar comprimido de uma indústria ou instalação é uma tarefa crucial para garantir a eficiência operacional e a redução de custos com manutenção e energia. O ar comprimido é utilizado em uma variedade de processos industriais, como automação, controle de máquinas, transporte de materiais, entre outros. Portanto, um sistema bem gerido e mantido é essencial para o bom funcionamento da produção (ATLAS COPCO, 2024). A Figura 12 apresenta, equipamentos instalados na planta, e parte do sistema de ar comprimido.

Figura 12: Planta de Panambi/RS



Fonte: Autor (2024).

O problema em questão, que foi diagnosticado ao analisar os dados operacionais dos compressores da empresa, se revelou multifacetado, envolvendo desde a ineficiência energética até a degradação da capacidade de operação dos equipamentos. A principal questão está na combinação de vazamentos excessivos, alto consumo de energia e custos de manutenção elevados, o que gera um ciclo vicioso de ineficiência e impacto ambiental.

### 3.8. VAZAMENTOS EXCESSIVOS

A taxa de vazamentos nos compressores é uma das maiores preocupações identificadas. Em unidades como o CPA011, os vazamentos atingem impressionantes 52% da potência total do equipamento, o que é uma evidência clara de que esses equipamentos não estão operando

com a eficiência esperada. Vazamentos em sistemas pneumáticos ou de compressores resultam não apenas na perda de ar comprimido, mas também em aumento no consumo de energia, pois o sistema precisa trabalhar mais para compensar as perdas. Isso implica em custos operacionais maiores e maior emissão de CO<sub>2</sub>, uma vez que a energia adicional necessária para manter a pressão e a produção de ar comprimido implica em mais queima de energia elétrica.

No geral, os vazamentos são um reflexo de um problema de manutenção que, se não for resolvido, pode se expandir para uma falha total do sistema. Além disso, o aumento do consumo de energia decorrente dos vazamentos eleva diretamente as emissões de gases poluentes, agravando ainda mais o impacto ambiental da operação.

A coleta de dados foi realizada com a planta da empresa em estado de inatividade, acionando-se os compressores de cada área e monitorando suas cargas de forma individual até a estabilização. Dessa maneira, foi possível identificar a carga de cada equipamento, evidenciando o consumo de ar comprimido atribuído a vazamentos em tubulações e equipamentos, uma vez que a planta estava parada, garantindo uma análise precisa das perdas no sistema.

As Figura 13 e Figura 17, ilustram os principais compressores que compõem o sistema de ar comprimido analisado, destacando suas capacidades, pressões de operação e níveis de carga, fatores essenciais para compreender a eficiência e o desempenho do sistema. A Figura 13 apresenta o compressor modelo CPA011, de 55 kW, que opera com uma pressão de 6,6 bar e uma carga de 52%, de vazamentos no sistema que alimenta, configurando-se como um equipamento de média capacidade, ideal para demandas intermediárias. Na Figura 14, observa-se o CPA015, também de 55 kW, que mantém uma operação a 6,5 bar com 32% de carga, indicando uma reserva de capacidade potencial para ajustes operacionais.

Já a

Figura 15 detalha o CPA018, um compressor de 26 kW, operando em uma faixa de alta pressão, 10,2 bar, com 29% de carga, evidenciando sua aplicação em processos que exigem pressões mais elevadas. A Figura 16 exibe o CPA020, de 18 kW, trabalhando a uma pressão de 6,5 bar e com uma carga de 34%, um perfil típico para aplicações leves e moderadas. Por fim, a Figura 17 apresenta o CPA021, o equipamento de maior capacidade no conjunto, com 90 kW, operando a 6,5 bar e 35% de carga, evidenciando sua robustez e eficiência em suportar demandas industriais mais elevadas.

Essa análise dos compressores demonstra a complexidade do sistema e ressalta a importância de sua gestão eficiente.

Figura 13: (CPA011) Compressor 55 kW



Fonte: Autor 2024

Figura 14: (CPA015) Compressor 55 kW



Fonte: Autor 2024

Figura 15: (CPA018) Compressor 26 kW



Fonte: Autor 2024

Figura 16: (CPA020) Compressor 18 kW



Fonte: Autor 2024

Figura 17: (CPA021) Compressor 90 kW



Fonte: Autor 2024

### 3.9. INEFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A análise revelou também um problema significativo de ineficiência energética nos compressores, que consomem mais energia do que o necessário. Por exemplo, o compressor CPA021, que tem uma vazão de 1051,56 m<sup>3</sup>/h, consome 31,5 kWh de energia por hora, resultando em um custo anual de R\$ 98.280,00 apenas com eletricidade. Esse consumo elevado não é isolado. O CPA011, com uma demanda energética de 28,6 kWh por hora, também apresenta um impacto negativo considerável no custo operacional anual (R\$ 89.232,00), conforme a equação 2 o custo anual total de vazamentos é de R\$ 285.043,00.

A energia consumida por cada compressor é proporcional ao seu desempenho e capacidade, mas a falta de manutenção adequada, como a vedação de vazamentos ou a falha no controle de eficiência, faz com que a máquina funcione de maneira subótima. Isso significa que, embora os compressores estejam sendo operados de forma contínua, eles não estão aproveitando todo o seu potencial de produção de ar comprimido, mas sim desperdiçando energia.

Gráfico 1: Vazamentos por local x custos



Fonte: Autor (2024).

O gráfico de barras apresentado no Gráfico 1 mostra a distribuição dos custos relacionados aos vazamentos em diferentes áreas da fábrica, com um custo total de vazamentos de R\$ 285.043,00. A seguir, detalho cada uma das categorias e seus respectivos custos e percentuais:

(CPA018) LASER FÁBRICA CENTRAL: Esta categoria representa 29% do custo total de vazamentos na

- Figura 15, com um valor de R\$ 23.525,00.
- (CPA015) PINTURA + LOGÍSTICA: Com 32% do total de vazamentos Figura 14, esta área possui um custo de R\$ 54.912,00.
- (CPA020) LASER SILOS: O custo de vazamentos nesta área é de R\$ 19.094,00, correspondendo a 34% do total Figura 16.
- (CPA021) FÁBRICA CENTRAL: Esta categoria apresenta o maior custo individual, com R\$ 98.280,00, o que representa 35% do total de vazamentos Figura 17.
- (CPA011) SILOS: Com 52% do custo total de vazamentos Figura 13, a área de silos é a que mais contribui para o valor total, com um custo de R\$ 89.232,00.
- O custo total de vazamentos é de R\$ 285.043,00, e o Gráfico 1 ilustra como esse valor está distribuído entre as diferentes áreas da fábrica.

Em termos gerais, a área SILOS (CPA011) é a que apresenta o maior custo de vazamentos, representando mais da metade (52%) do total. As áreas de FÁBRICA CENTRAL (CPA021) e PINTURA + LOGÍSTICA (CPA015) também têm uma participação significativa, com 35% e 32%, respectivamente. Já as categorias LASER FÁBRICA CENTRAL (CPA018) e LASER SILOS (CPA020) apresentam os menores custos, com 29% e 34% do total.

Para calcular o custo energético dos compressores e os custos relacionados a vazamentos, foi considerando que os compressores operam 24 horas por dia, 5 dias por semana, durante todo o ano. O valor da energia elétrica foi fixado em R\$ 0,50 por kWh, e os cálculos foram realizados para um cenário de operação anual.

### 3.10. CUSTOS DE MANUTENÇÃO ELEVADOS

Além dos custos com eletricidade, outro fator que pesa no bolso da empresa são os custos de manutenção. Compressores como o CPA011 (GA55VSD), que já é um modelo de grande porte e capacidade, geram custos elevados devido à necessidade de manutenção regular. O custo de manutenção deste compressor, por exemplo, é de R\$ 8.513,85 a cada ciclo de manutenção preventiva, o que se torna um gasto recorrente. Embora as manutenções sejam fundamentais para garantir a continuidade da operação e evitar falhas críticas, o valor investido em manutenção de um equipamento com vazamentos e ineficiência torna-se um custo que poderia ser muito melhor alocado.

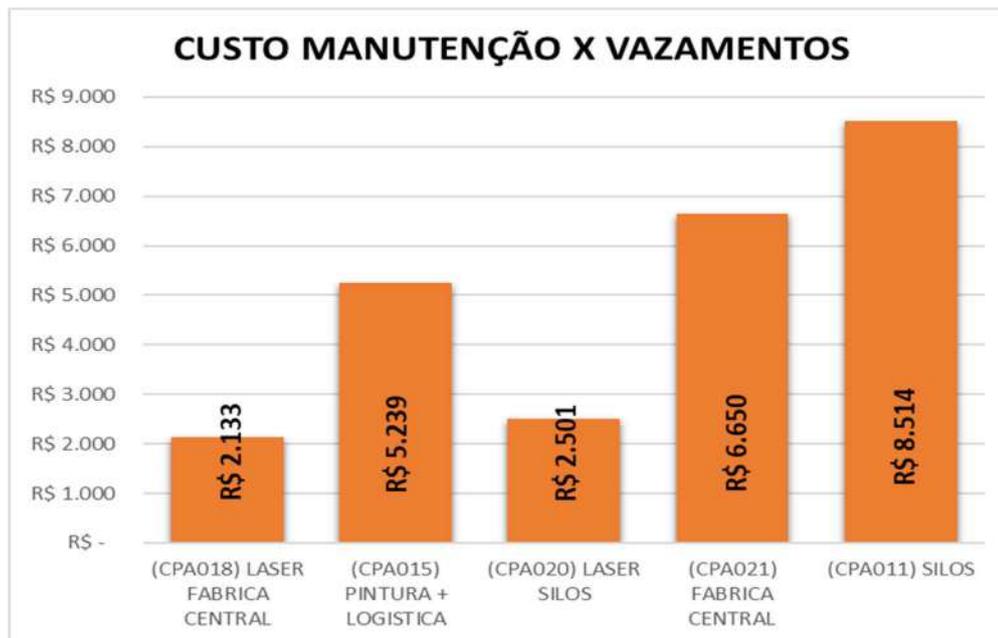
O cálculo da manutenção preventiva dos compressores é ajustado considerando a carga efetiva de operação, apresentado através da fórmula 3, representa um custo anual de manutenção, no valor de R\$ 25.037,00.

Como a manutenção é inicialmente planejada para um ciclo de 8000 horas com o equipamento operando a 100% de sua capacidade, o ajuste leva em conta a carga real em que o compressor está operando, variando conforme o modelo específico e o valor da manutenção preventiva correspondente.

Equipamentos com custos de manutenção elevados, especialmente quando combinados com altos índices de vazamento e ineficiência energética, geram um problema financeiro adicional: a empresa está pagando mais para manter os equipamentos funcionando do que seria necessário se o problema dos vazamentos e da manutenção preventiva fosse tratado de forma proativa.

O gráfico de barras apresentado através do Gráfico 2, mostra a distribuição dos custos de manutenção em diferentes áreas de uma fábrica.

Gráfico 2: Custo manutenção x vazamentos



Fonte: Autor (2024).

A seguir, os custos de manutenção para cada categoria:

- (CPA018) LASER FÁBRICA CENTRAL: O custo de manutenção nesta área é de R\$ 2.133,00, representando uma parte menor do custo total.
- (CPA015) PINTURA + LOGÍSTICA: Esta categoria tem um custo de R\$ 5.239,00, correspondendo a uma parte significativa, mas ainda abaixo de outras áreas.
- (CPA020) LASER SILOS: O custo de manutenção nesta área é de R\$ 2.501,00, uma parte considerável, mas também inferior a outras categorias em termos de valor.
- (CPA021) FÁBRICA CENTRAL: O custo de manutenção nesta área é de R\$ 6.650,00, um valor intermediário entre as categorias.
- (CPA011) SILOS: Esta área apresenta o maior custo de manutenção, com R\$ 8.514,00, o que indica que os silos são os mais exigentes em termos de manutenção.

O custo total de manutenção é de R\$ 25.037,00, considerando todas as áreas. O gráfico de barras, Gráfico 2, provavelmente ilustra esses valores de forma visual, onde a altura de cada barra representa o valor do custo de manutenção de cada área.

Em termos de custo, SILOS (CPA011) é a área que demanda maior investimento em manutenção, com R\$ 8.514,00, seguida pela FÁBRICA CENTRAL (CPA021) com R\$ 6.650,00. As outras áreas, como PINTURA + LOGÍSTICA (CPA015) e LASER SILOS (CPA020), têm custos menores, de R\$ 5.239,00 e R\$ 2.501,00, respectivamente. A área com o menor custo de manutenção é LASER FÁBRICA CENTRAL (CPA018), com apenas R\$ 2.133,00.

Essas informações ajudam a identificar quais áreas da fábrica geram maiores custos de manutenção, o que pode ser útil para direcionar esforços de otimização e melhorar a eficiência. O custo mais alto nas áreas de Silos e Fábrica Central sugere que essas áreas podem necessitar de mais atenção, seja por meio de manutenção preventiva, substituição de equipamentos ou revisão de processos.

### 3.11. IMPACTO AMBIENTAL E EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

O impacto ambiental, outro ponto crítico, está intimamente ligado ao consumo de energia. O funcionamento ineficiente dos compressores, especialmente os maiores, resulta em emissões excessivas de CO<sub>2</sub>. Por exemplo, o CPA021, que consome mais energia do que seria necessário para a produção de ar comprimido, emite 176.904 kg de CO<sub>2</sub> por ano. O CPA011, por sua vez, emite 160.617 kg de CO<sub>2</sub> por ano, tornando-se um dos maiores emissores de gases poluentes da planta. Essas emissões são diretamente proporcionais ao consumo energético, que por sua vez é elevado devido aos vazamentos e à baixa eficiência operacional.

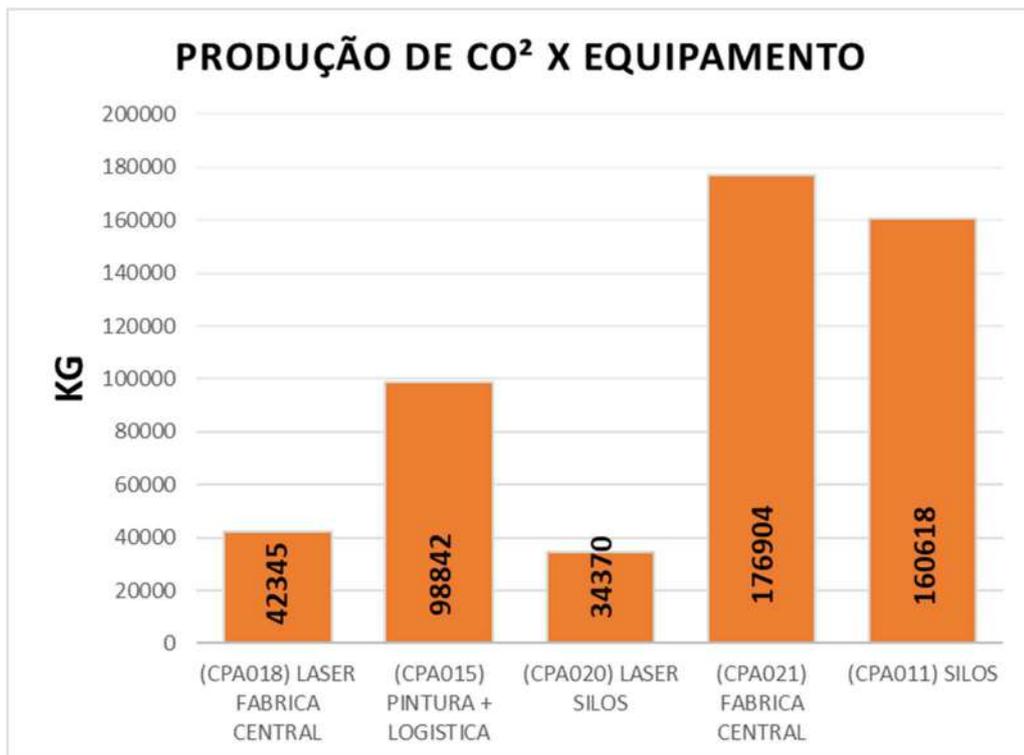
Esse cenário é uma preocupação crescente, especialmente considerando a crescente pressão sobre as empresas para reduzir suas emissões de carbono e adotar práticas mais sustentáveis. A falta de uma estratégia clara para reduzir as perdas de ar comprimido, melhorar a eficiência energética e otimizar a manutenção está gerando impactos ambientais e financeiros que poderiam ser evitados com ações corretivas mais eficazes.

O cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> a partir do consumo de eletricidade considera o consumo energético (kWh) e o fator de emissão de carbono da matriz energética local. Regiões com fontes renováveis têm fatores mais baixos (0,4 kg CO<sub>2</sub>/kWh), enquanto áreas dependentes de combustíveis fósseis apresentam fatores mais altos (0,9 kg CO<sub>2</sub>/kWh). Multiplicando o

consumo de eletricidade pelo fator de emissão, é possível estimar o impacto ambiental em termos de emissões de CO<sub>2</sub> utilizando a fórmula 4, assim contabilizando total de CO<sub>2</sub> produzido ao longo do ano de 513.078 kg.

O Gráfico 3 apresentado a seguir, mostra a distribuição da produção anual de CO<sub>2</sub> em quilogramas (kg) por diferentes áreas de uma fábrica

Gráfico 3: Produção de CO<sub>2</sub> x equipamento



Fonte: Autor (2024).

A seguir, os valores de emissão de CO<sub>2</sub> para cada área:

- (CPA018) LASER FÁBRICA CENTRAL: Esta área gerou 42.345 kg de CO<sub>2</sub>, representando uma parte menor do total de emissões.
- (CPA015) PINTURA + LOGÍSTICA: A produção de CO<sub>2</sub> nesta categoria foi de 98.842 kg, um valor considerável, superior à emissão da área de Laser Fábrica Central.
- (CPA020) LASER SILOS: A produção de CO<sub>2</sub> em Laser Silos foi de 34.370 kg, a menor entre as áreas listadas, indicando um impacto ambiental menor.
- (CPA021) FÁBRICA CENTRAL: Esta área foi a maior responsável pela emissão de CO<sub>2</sub>, com 176.904 kg, o que representa uma parcela significativa do total.

- (CPA011) SILOS: A área de Silos gerou 160.618 kg de CO<sub>2</sub>, uma quantidade muito próxima à da Fábrica Central, sendo também uma grande responsável pelas emissões.

O total de CO<sub>2</sub> produzido ao longo do ano pelas diferentes áreas é de 513.078 kg. O gráfico de barras provavelmente exibe essas informações de forma visual, onde a altura de cada barra reflete a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por cada área.

Em termos de emissões, a Fábrica Central (CPA021) é a área com a maior contribuição, com 176.904 kg de CO<sub>2</sub>, seguida de perto pela área de Silos (CPA011), com 160.618 kg. Juntas, essas duas áreas representam uma grande parte do total de emissões de CO<sub>2</sub>. As outras áreas, como Pintura + Logística (CPA015) e Laser Fábrica Central (CPA018), têm uma produção de CO<sub>2</sub> mais moderada, com 98.842 kg e 42.345 kg, respectivamente. Já Laser Silos (CPA020) é a área com a menor produção de CO<sub>2</sub>, com 34.370 kg.

Esse gráfico oferece uma visão clara das emissões de CO<sub>2</sub> nas diferentes áreas da fábrica, permitindo identificar quais setores são os maiores responsáveis pelo impacto ambiental. Com base nessa informação, é possível direcionar esforços para reduzir as emissões, principalmente nas áreas que mais contribuem para o total, como a Fábrica Central e Silos.

### 3.12. CICLO DE INEFICIÊNCIA

O problema encontrado não é isolado nem pontual. Trata-se de um ciclo vicioso de ineficiência. Vazamentos e falhas na manutenção resultam em maior consumo de energia, o que, por sua vez, eleva os custos e as emissões de CO<sub>2</sub>. A longo prazo, esse ciclo apenas tende a piorar, pois a deterioração dos equipamentos leva a mais falhas, mais custos de manutenção e mais desperdício de energia.

Esse ciclo não afeta apenas os custos operacionais e a sustentabilidade ambiental, mas também a competitividade da empresa. Empresas que não são capazes de operar seus sistemas de forma eficiente correm o risco de serem ultrapassadas por concorrentes que adotam tecnologias mais modernas e eficientes, além de estarem cada vez mais sob a mira de regulamentações ambientais que exigem ações concretas para reduzir o impacto ecológico das suas operações.

Portanto, o problema encontrado é complexo e exige uma abordagem integrada que envolva manutenção corretiva e preventiva, investimentos em tecnologias mais eficientes e

controle rigoroso de vazamentos. Sem uma ação imediata para corrigir esses pontos críticos, a empresa continuará a enfrentar altos custos operacionais, impactos ambientais negativos e uma degradação da sua competitividade no mercado.

O cálculo dos custos operacionais do sistema de ar comprimido é dividido em três componentes principais, (conforme formula 5): energia desperdiçada em vazamentos (R\$ 285.043,20), depreciação dos equipamentos (R\$ 5.411,13) e manutenção preventiva (R\$ 25.037,42). O total geral dos custos é de R\$ 315.491,74, refletindo o impacto financeiro combinado do desperdício de energia, da perda de valor dos ativos e das manutenções necessárias ao longo do ano.

Conforme o Gráfico 4, urgência de resolver o problema é clara, tanto do ponto de vista financeiro quanto ambiental. Para isso, é fundamental que a empresa adote uma abordagem estratégica para melhorar a eficiência dos seus compressores, garantindo que a operação não apenas seja mais econômica, mas também mais sustentável a longo prazo.

Gráfico 4: Custo total



Fonte: Autor (2024).

## 4. IMPLEMENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES CORRETIVAS

### 4.1. DIAGNÓSTICO INICIAL DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

O diagnóstico inicial do sistema de ar comprimido da planta envolveu um mapeamento detalhado das áreas atendidas por cada compressor e a avaliação das condições das tubulações associadas. A Figura 18 ilustra a distribuição das áreas alimentadas por cada compressor, proporcionando uma visão clara e organizada do sistema. Essa análise é fundamental para identificar possíveis pontos de falha e otimizar a operação da planta, como destacado por Atlas Copco (2024), que ressalta a importância de monitorar e ajustar o sistema para reduzir perdas e melhorar a eficiência.

Conforme o levantamento, o compressor CPA011 abastece o setor de silos; o CPA015 atende às áreas de pintura líquida e logística; o CPA018 alimenta a área de laser na fábrica central; o CPA020 supre o laser na fábrica de silos; e o CPA 021 é responsável pela fábrica central como um todo. Essas informações permitem uma análise segmentada e direcionada para priorização de intervenções em áreas críticas.

Em relação às tubulações, constatou-se que as linhas que alimentam os sistemas de laser são de alumínio, conferindo maior resistência à corrosão e eficiência ao sistema (KAESER COMPRESSORES, 2024). As tubulações que servem à fábrica de silos também utilizam alumínio, reforçando a durabilidade nesses setores. As demais áreas da planta utilizam tubulações em aço carbono, material tradicional que requer maior atenção em termos de manutenção preventiva devido à suscetibilidade à corrosão. Esse cenário reforça a recomendação de usar materiais como o alumínio, que oferecem maior durabilidade e eficiência energética, conforme destacado por Metalwork (2024).

A análise dessas informações fornece uma base sólida para intervenções assertivas, garantindo a eficiência do sistema de ar comprimido e a redução de desperdícios na operação da planta. A distribuição detalhada, conforme ilustrada na Figura 18, permite uma avaliação segmentada para priorizar ações de melhoria nas áreas mais críticas.

Figura 18: Área alimentada por compressor



Fonte: Autor (2024).

#### 4.2. DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS VAZAMENTOS EXISTENTES

A detecção de vazamentos em sistemas de ar comprimido é fundamental para assegurar a eficiência energética e reduzir desperdícios operacionais. O equipamento ultrassônico destaca-se como a solução mais confiável e eficiente para detectar pequenos vazamentos em sistemas de ar comprimido. Equipamentos como o detector ultrassônico de vazamento de ar comprimido permitem identificar vazamentos minúsculos, mesmo a longas distâncias, adaptando automaticamente a sensibilidade ao ambiente e eliminando ruídos externos com precisão (Sensor Store, 2025). Embora exijam um investimento inicial mais elevado, compensam pela redução de desperdícios e custos operacionais. Métodos tradicionais, como o uso de água com sabão, são alternativas econômicas, porém menos práticas para redes extensas ou locais de difícil acesso. Outras tecnologias, como câmeras termográficas e sistemas de monitoramento em linha, possuem aplicações específicas, mas não atingem a mesma precisão dos sensores ultrassônicos (VCP AUTOMAÇÃO, 2025).

O detector de vazamento ultrassônico opera captando sons de alta frequência gerados pelo escape de ar em alta pressão. Vazamentos em sistemas de ar comprimido produzem turbulências que geram ondas sonoras acima do espectro audível humano. O equipamento utiliza sensores específicos que transformam essas ondas ultrassônicas em sons audíveis ou sinais visuais, permitindo ao operador localizar com precisão a origem do vazamento (SKF, 2024). Em muitos modelos, o equipamento é portátil e inclui fones de ouvido e um visor digital que auxilia na identificação rápida e eficiente (FLUKE, 2024). O uso do detector ultrassônico

é especialmente vantajoso em situações onde os vazamentos são pequenos e de difícil identificação a olho nu ou em locais com acessibilidade limitada. Ele é eficaz em ambientes ruidosos, pois sua tecnologia foca exclusivamente nas frequências geradas pelo vazamento (FLUKE, 2024).

No diagnóstico realizado, vazamentos maiores e mais evidentes foram identificados sem a necessidade do uso do detector ultrassônico, por serem facilmente visíveis ou audíveis. Exemplos incluem vazamentos em mangueiras danificadas, conexões frouxas e válvulas desgastadas, que apresentavam perda de ar significativa perceptível sem o auxílio de equipamentos. Nesses casos, a intervenção foi rápida e direta. No entanto, em situações onde os vazamentos são menores e menos perceptíveis, o detector de vazamento ultrassônico se mostrou indispensável para localizar falhas que poderiam passar despercebidas. Isso reforça a importância de sua utilização como ferramenta complementar em diagnósticos mais detalhados (SKF, 2024).

A Figura 19 apresenta o modelo de detector de vazamento ultrassônico utilizado durante o diagnóstico. Trata-se do modelo LD510 da CS INSTRUMENTOS, conhecido por sua eficiência na detecção de vazamentos em sistemas de ar comprimido. Este dispositivo portátil permite a localização rápida e precisa de vazamentos, mesmo em ambientes industriais barulhentos, por meio de seu sensor de medição de ultrassom (CS INSTRUMENTOS, 2024).

Figura 19: Detector de vazamentos ultrassônico



Fonte: (CS INSTRUMENTOS, 2024).

Durante o diagnóstico dos sistemas de ar comprimido da planta, foram identificados diversos vazamentos de diferentes proporções. No sistema alimentado pelo compressor

CPA011, foram detectados 116 vazamentos; no CPA015, 72 vazamentos; no CPA018, 46 vazamentos; no CPA020, 32 vazamentos; e no CPA021, 77 vazamentos. Esses vazamentos variam em tamanho e impacto, desde pequenas perdas que requerem ferramentas especializadas para detecção até grandes vazamentos perceptíveis visualmente ou por ruídos evidentes. Durante o processo, os pontos de vazamento foram identificados utilizando cartões vermelhos no formato de uma seta, com a palavra "vazamento" escrita, conforme Figura 20, facilitando a marcação e localização para intervenções posteriores. A identificação e correção desses vazamentos são essenciais para melhorar a eficiência energética e reduzir custos operacionais (ACADEMIA.EDU, 2024).

Figura 20: Identificação de vazamento



Fonte: Autor (2024).

A Figura 21 apresenta alguns dos vazamentos encontrados durante o diagnóstico. Os pontos de perda identificados foram marcados com as etiquetas vermelhas em formato de seta, contribuindo para uma visualização clara dos locais que necessitam de reparo. Essa prática auxiliou na organização e priorização das intervenções corretivas.

Figura 21: Exemplos de vazamentos encontrados



Fonte: Autor (2024).

### 4.3. DESENVOLVIMENTO DE ROTAS DE INSPEÇÃO

As rotas de inspeção foram desenvolvidas para otimizar a identificação e correção de vazamentos em cada sistema de compressores da planta, considerando as áreas específicas atendidas por cada equipamento. Essas rotas foram integradas ao sistema SAP da empresa, permitindo automação e garantindo a execução periódica de inspeções preventivas. O sistema SAP gerará automaticamente cada rota de inspeção a cada seis meses, assegurando que todos os pontos críticos sejam regularmente avaliados (ATLAS COPCO, 2024).

Além disso, será coletado mensalmente o volume de ar comprimido consumido em cada sistema durante as paradas programadas da planta. Esses dados servirão como referência para identificar possíveis vazamentos em cada setor alimentado pelos compressores. A análise desse consumo permitirá direcionar as inspeções com maior precisão, priorizando áreas com maiores perdas de ar. Segundo a ABNT (2024), a medição regular do consumo de ar comprimido é fundamental para a detecção de vazamentos e para a eficiência energética dos sistemas (BIBLUS, 2024).

No sistema alimentado pelo CPA011, que atende ao setor de silos, a rota de inspeção contempla as linhas principais de alimentação, conexões em extremidades, válvulas de controle e mangueiras flexíveis conectadas às linhas de distribuição. Essa área requer atenção especial em pontos sujeitos à corrosão e em componentes com maior movimentação.

Para o CPA015, responsável pelas áreas de pintura líquida e logística, a inspeção inclui as tubulações das cabines de pintura, conexões dos sistemas de pistolas e mangueiras de alta pressão, além das linhas utilizadas para movimentação de equipamentos pneumáticos. Nessa rota, há prioridade para áreas de alta vibração, onde o desgaste nas conexões é mais frequente.

No sistema CPA018, que alimenta os equipamentos de corte a laser na fábrica central, a inspeção abrange as linhas de alimentação dos equipamentos, conexões entre compressores e sistemas de distribuição, e tubulações de alumínio, com foco em possíveis micro vazamentos. O ambiente de alta temperatura é considerado, uma vez que pode causar dilatação das tubulações e gerar vazamentos.

Para o CPA020, que abastece o laser na fábrica de silos, a rota inclui as tubulações de alumínio conectadas aos equipamentos de corte, junções entre as linhas e máquinas de precisão, além das mangueiras de alimentação. O monitoramento nessa rota prioriza áreas de movimentação constante de operadores, onde o desgaste é mais recorrente.

No sistema CPA021, que alimenta a fábrica central, a rota de inspeção foca nas linhas principais que abastecem os equipamentos pneumáticos, conexões entre as linhas de distribuição e os equipamentos, além das válvulas de controle e mangueiras utilizadas diretamente pelos operadores. Essas áreas requerem atenção especial devido à frequência de uso.

As rotas de inspeção estão representadas junto a Tabela 2, a qual descreve a frequência da inspeção em cada sistema, bem como o que será verificado e a coleta de volume de cada sistema.

Tabela 2: Rota de inspeção

Sistema Alimentado	Frequência de Inspeção	Pontos de Inspeção	Coleta Mensal de Dados
CPA011 - Setor de Silos	Mensal	Linhas principais, conexões, válvulas de controle, mangueiras	Volume consumido durante a parada da planta no setor de silos.
CPA015 - Pintura Líquida e Logística	Mensal	Tubulações das cabines de pintura, conexões das pistolas, mangueiras de alta pressão.	Volume consumido durante a parada da planta nas áreas de pintura e logística.
CPA018 - Laser na Fábrica Central	Mensal	Linhas de alimentação dos equipamentos a laser, conexões, tubulações de alumínio.	Volume consumido durante a parada da planta na fábrica central para corte a laser.
CPA020 - Laser na Fábrica de Silos	Mensal	Tubulações de alumínio conectadas aos equipamentos de corte, mangueiras de alimentação.	Volume consumido durante a parada da planta no setor de corte a laser da fábrica de silos.
CPA021 - Fábrica Central	Mensal	Linhas principais de equipamentos pneumáticos, conexões, válvulas de controle, mangueiras.	Volume consumido durante a parada da planta nos equipamentos da fábrica central.

Fonte: Autor (2024).

#### 4.4. ANÁLISE DA CAUSA RAIZ

Os vazamentos em sistemas de ar comprimido são problemas recorrentes que impactam diretamente na eficiência energética, aumentam os custos operacionais e reduzem a confiabilidade do sistema. Para identificar as causas raiz desses problemas, foi utilizada a ferramenta de análise *Ishikawa*, também conhecida como espinha de peixe. Essa abordagem estruturada permitiu identificar três principais causas raiz, organizando-as e facilitando a elaboração de ações corretivas e preventivas: desgaste natural, falhas na manutenção e contaminação no sistema.

O Diagrama de *Ishikawa* é escolhido para análise de problemas por sua capacidade de organizar causas de forma clara e lógica, facilitando a identificação da causa raiz. Ele é visual, adaptável a diversos setores, promove trabalho em equipe e detalha tanto causas principais quanto secundárias. Além disso, ajuda a prevenir problemas futuros e melhorar processos, tornando a análise mais eficaz e objetiva (ISHIKAWA, 1985). No caso do desgaste natural, a análise *Ishikawa* revelou que o envelhecimento dos materiais, como mangueiras, vedantes e conexões, é uma das causas mais comuns de vazamentos. Esses componentes, com o tempo, perdem flexibilidade e capacidade de vedação devido ao uso contínuo e às condições operacionais adversas. Além disso, foi identificado que muitas das instalações antigas utilizam

tubulações de aço carbono, que são particularmente suscetíveis à corrosão, especialmente em ambientes com alta umidade. Essa corrosão enfraquece os materiais, aumentando os riscos de rachaduras e vazamentos, especialmente em áreas de alta pressão ou vibração constante. A substituição progressiva dessas tubulações por materiais mais modernos e resistentes, como alumínio ou aço inoxidável, foi recomendada para mitigar esse problema (ABNT, 2024).

As falhas na manutenção também foram identificadas como uma das causas raiz. A ausência de um plano robusto de manutenção preventiva contribui significativamente para o surgimento de vazamentos. Componentes que apresentam pequenos problemas, se não identificados e reparados em tempo, podem evoluir para falhas graves. A substituição inadequada de peças, como mangueiras ou vedantes, por materiais de baixa qualidade ou incompatíveis, também agrava o problema (ATLAS COPCO, 2024).

Por fim, a contaminação no sistema foi a terceira causa raiz identificada. A presença de partículas, umidade e óleo no ar comprimido acelera o desgaste de válvulas, conexões e outros componentes, comprometendo sua eficiência. Filtros inadequados ou negligenciados durante a manutenção permitem que esses contaminantes circulem no sistema, causando obstruções, corrosão interna e falhas em pontos de vedação. Esse problema pode ser mitigado pela implementação de filtros de alta eficiência e pela manutenção regular de equipamentos de tratamento de ar comprimido (METALPLAN, 2024).

A Figura 22, que representa a análise *Ishikawa* do desgaste natural, ilustra como as principais categorias de causas, como envelhecimento dos materiais, corrosão interna e externa, e condições operacionais adversas, estão interligadas e contribuem para os vazamentos no sistema de ar comprimido. Esse modelo visual facilita o entendimento das interdependências entre os fatores e direciona o planejamento de ações corretivas de forma eficiente.

Figura 22: Análise de causa



#### 4.5. PLANO PREVENTIVO DE MANUTENÇÃO PARA REDES E EQUIPAMENTOS

O plano preventivo de manutenção dos sistemas de ar comprimido da Kepler Weber é distinto das rotas de inspeção, pois tem como objetivo a substituição de componentes de acordo com sua vida útil e níveis de saturação, garantindo a manutenção da eficiência do sistema e prevenindo falhas críticas. Além disso, as manutenções preventivas serão cadastradas no sistema SAP, que gerará automaticamente as demandas conforme os prazos programados, assegurando que nenhuma atividade essencial seja negligenciada (ABNT, 2024).

A troca de filtros será realizada anualmente, com o intuito de assegurar que esses componentes operem dentro dos padrões estabelecidos, evitando a contaminação do sistema por partículas, umidade ou óleo. Essas impurezas podem comprometer a eficiência do sistema e acelerar o desgaste dos componentes. Antes da substituição, será feita uma inspeção visual para identificar sinais de saturação ou obstrução. Após a troca, testes de fluxo e eficiência serão realizados para garantir que os novos filtros atendam às especificações técnicas recomendadas pelo fabricante e pelas normas aplicáveis, como a ABNT NBR 11627. Essa ação preventiva não apenas detecta problemas, mas também renova os componentes essenciais para o funcionamento do sistema (ATLAS COPCO, 2024).

Os ajustes das conexões nas redes de alumínio serão realizados semestralmente, com foco em prevenir vazamentos e garantir a estabilidade das junções, que estão sujeitas a dilatações e vibrações frequentes. Diferentemente das inspeções, que identificam problemas visíveis, a manutenção preventiva busca realizar intervenções programadas para garantir a integridade do sistema antes que falhas ocorram. Durante essa atividade, conexões críticas serão

alinhadas e reapertadas com ferramentas específicas para evitar danos, e testes de pressão e fluxo serão executados para assegurar a vedação e o desempenho adequado (METALPLAN, 2024).

Todas as atividades de manutenção preventiva serão cadastradas no sistema SAP, permitindo o acompanhamento detalhado de sua execução e o registro de informações como a data de realização, os componentes substituídos ou ajustados, os resultados das inspeções e qualquer observação relevante sobre o estado dos equipamentos. Com base nesses registros, o sistema SAP gerará automaticamente novas ordens de serviço conforme os prazos programados para cada atividade, garantindo que o plano seja executado de forma consistente e eficiente (ABNT, 2024).

Os técnicos de manutenção serão responsáveis pela execução das trocas e ajustes, bem como pelo registro das atividades no sistema. O analista de manutenção acompanhará os resultados, identificando padrões e problemas recorrentes para ajustar o plano preventivo de forma dinâmica e eficaz.

Diferentemente das rotas de inspeção, que têm como foco a identificação de problemas em tempo real, o plano preventivo visa substituir os componentes de acordo com sua vida útil e níveis de saturação, conforme Tabela 3, assim garantindo a renovação contínua do sistema. Com o suporte do sistema SAP para automação e controle, essa abordagem assegura maior eficiência, redução de custos operacionais e prolongamento da vida útil dos equipamentos, promovendo a sustentabilidade e confiabilidade das operações (ATLAS COPCO, 2024).

Tabela 3: Plano preventivo.

Atividade	Frequência	Responsável	Descrição
Troca de filtros	Anual	Técnico de Manutenção	Substituir os filtros do sistema de ar comprimido para evitar contaminações e saturação.
Ajuste de conexões nas redes de alumínio	Semestral	Técnico de Manutenção	Reapertar e verificar conexões para evitar vazamentos em redes de alumínio.
Inspeção visual de componentes críticos	Trimestral	Lider de Manutenção	Inspeccionar visualmente mangueiras, conexões e válvulas para identificar sinais de desgaste.
Lubrificação de válvulas e conexões	Trimestral	Operador de Manutenção	Lubrificar peças móveis e pontos críticos para evitar desgaste e falhas.
Verificação de vazamentos	Mensal	Equipe Técnica	Realizar inspeção para identificar vazamentos visíveis ou audíveis no sistema.

Fonte: Autor (2024).

#### 4.6. CAPACITAÇÃO E TREINAMENTO DA EQUIPE TÉCNICA E OPERADORES

A capacitação da equipe técnica de manutenção e dos operadores é fundamental para o sucesso do plano de inspeção e manutenção. Além de garantir a eficiência operacional, a formação adequada permitirá que os operadores sejam protagonistas na identificação precoce de vazamentos, reduzindo desperdícios e otimizando os recursos disponíveis (ATLAS COPCO, 2024).

Uma das principais responsabilidades dos operadores será identificar vazamentos durante suas rotinas de trabalho. Para cada vazamento detectado, será necessário abrir um chamado de manutenção diretamente no sistema System Analysis Program Development (SAP). Esse processo automatizado não apenas gera a demanda para que um técnico capacitado realize o reparo, mas também registra detalhadamente o local e a natureza do vazamento. Esse histórico será de extrema importância para futuras consultas e análises, permitindo a identificação de padrões de falhas, melhorias nos processos e planejamento de ações preventivas mais eficazes (METALPLAN, 2024).

O custo associado aos vazamentos em sistemas de ar comprimido é significativo, muitas vezes resultando em perdas financeiras que poderiam ser direcionadas a investimentos em melhorias para os colaboradores. Ao capacitar os operadores para identificar e registrar os vazamentos no SAP, a empresa garante que cada problema seja tratado de maneira rápida e eficiente, reduzindo os custos com energia desperdiçada e prolongando a vida útil dos

componentes do sistema. Esses recursos poupados podem ser redirecionados para programas que beneficiem diretamente os colaboradores, como a modernização de equipamentos, treinamentos adicionais ou iniciativas de bem-estar no ambiente de trabalho (ABNT, 2024).

Os técnicos de manutenção receberão treinamento para reconhecer os sinais visuais e auditivos de vazamentos e utilizar ferramentas como detectores ultrassônicos em suas inspeções de rotina. Após identificar um vazamento, será sua responsabilidade marcá-lo com uma etiqueta de identificação e registrar o chamado no SAP. Esse registro detalhado incluirá informações sobre o local do vazamento, sua gravidade e quaisquer observações relevantes, formando uma base de dados que poderá ser consultada por técnicos e gestores para aprimorar as estratégias de manutenção (ATLAS COPCO, 2024).

A criação de um histórico no sistema SAP permitirá monitorar tendências e planejar ações preventivas com maior precisão. Saber onde e com que frequência os vazamentos ocorrem ajudará a priorizar as áreas que necessitam de atenção especial, evitando que problemas recorrentes impactem a eficiência do sistema. Além disso, esse processo documentado demonstra o compromisso da empresa com a melhoria contínua e a transparência nas operações (METALPLAN, 2024).

Com a integração das atividades dos operadores e técnicos no SAP, reforça a importância da colaboração entre as equipes para alcançar excelência operacional. Esse modelo não apenas minimiza custos e desperdícios, mas também valoriza os colaboradores, permitindo que o impacto das economias geradas beneficie diretamente os profissionais que contribuem para o sucesso do sistema.

Para fortalecer essa integração, foi planejado um calendário de treinamentos específicos, detalhado na Tabela 4, com o objetivo de capacitar operadores e técnicos em práticas fundamentais, como a identificação visual e auditiva de vazamentos, além do uso do detector ultrassônico.

Tabela 4: Calendário de treinamentos.

Treinamento	Objetivo	Data	Duração	Participantes
Identificação Visual de Vazamentos	Ensinar técnicas para identificar vazamentos visualmente, como sinais de desgaste ou corrosão.	04/12/2024	2 horas	Operadores e Técnicos de Manutenção
Identificação por Ruídos (Audível)	Treinar os operadores a reconhecer ruídos típicos de vazamentos em tubulações e conexões.	11/12/2024	2 horas	Operadores e Técnicos de Manutenção
Utilização do Detector Ultrassônico	Capacitar os técnicos no uso do detector ultrassônico para localizar vazamentos pequenos e imperceptíveis visualmente.	18/12/2024	3 horas	Técnicos de Manutenção

Fonte: (Autor, 2024).

#### 4.7. IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A implementação do sistema de monitoramento mensal será acompanhada por um painel de controle detalhado, que servirá como uma ferramenta essencial para visualizar e interpretar os dados coletados. A Figura 23 apresenta o Dashboard Mensal de Monitoramento do Sistema de Ar Comprimido, que reúne as informações mais relevantes para a avaliação do desempenho dos sistemas.

No gráfico superior esquerdo (a), é possível observar os custos de energia associados às diferentes categorias do sistema. No estado inicial, os custos eram significativamente elevados, com destaque para o CPA021 (Fábrica Central), que apresentava o maior valor, R\$ 98.280, reduzido para R\$ 49.701 após as melhorias. Todas as categorias demonstram uma redução expressiva nos custos de energia, refletindo a adoção de medidas para maior eficiência energética. (ATLAS COPCO, 2024).

O gráfico superior direito (b) mostra é mostrada em percentual para cada categoria. O estado atual apresenta melhorias em todas as áreas. Por exemplo, no CPA011 (Silos), a

eficiência aumentou de 52% no estado inicial para 19,2% no estado atual, evidenciando o impacto positivo das intervenções realizadas. (METALPLAN, 2024).

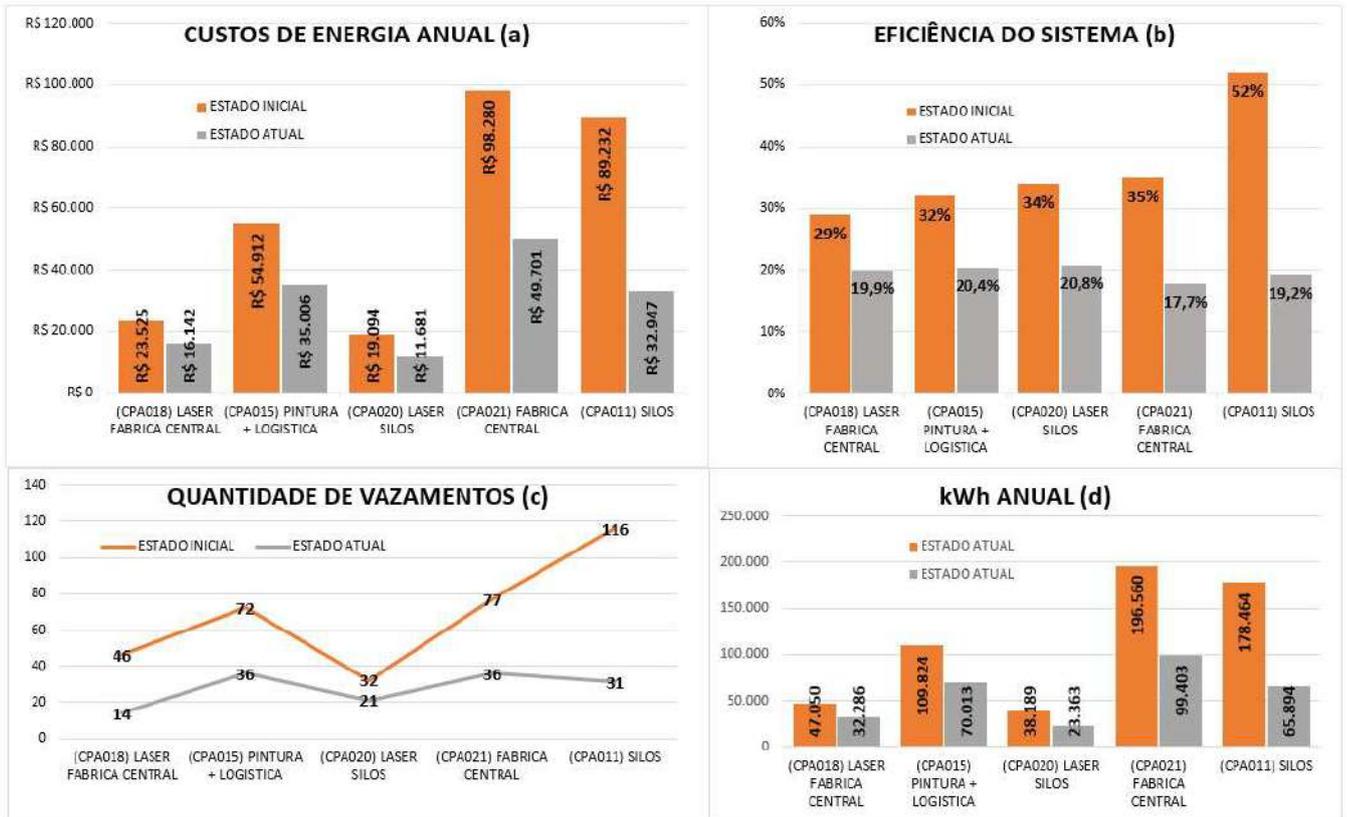
Na parte inferior esquerda (c), o gráfico exibe o número de vazamentos detectados em cada categoria. No estado inicial, o número de vazamentos era muito maior, como no caso do CPA011 (Silos), que apresentava 116 vazamentos, reduzidos para 31 no estado atual. Todas as categorias apresentaram reduções significativas, o que contribui diretamente para a melhora na eficiência do sistema e na redução dos custos. Esse dado é crucial para priorizar ações corretivas e identificar padrões em áreas críticas (ABNT, 2024).

Por fim, o gráfico inferior direito (d) ilustra o consumo de energia anual, qual analisado para cada categoria. Assim como nos custos, o consumo também diminuiu em todas as áreas, no CPA021 (Fábrica Central), houve uma redução considerável de 196.560 kWh no estado inicial para 99.403 kWh no estado atual, representando uma economia significativa no uso de energia.

Com essa abordagem visual, o analista de manutenção poderá monitorar o desempenho de cada sistema individualmente, identificar problemas recorrentes e propor ajustes nas rotas de inspeção e estratégias de manutenção. O dashboard mensal, integrado ao sistema SAP, será uma ferramenta poderosa para garantir a eficiência contínua e a excelência operacional da Kepler Weber (ATLAS COPCO, 2024; METALPLAN, 2024).

Os resultados apresentados, conforme figura 23, demonstram que as ações implementadas no sistema de ar comprimido já estão gerando impactos positivos significativos. A redução nos custos de energia, no consumo anual e na quantidade de vazamentos, combinada com o aumento da eficiência do sistema, evidencia o sucesso das melhorias realizadas. Essas mudanças refletem o comprometimento da equipe em otimizar os recursos e aumentar a sustentabilidade do processo. Continuando com esse trabalho consistente e focado, alcançaremos ainda mais resultados positivos, consolidando o sistema como um modelo de eficiência e economia para a organização.

Figura 23: Dashboard de monitoramento.



Fonte: Autor (2024).

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo refletem uma abordagem técnica detalhada e estruturada para enfrentar os desafios associados ao sistema de ar comprimido. A análise realizada permitiu identificar e tratar questões críticas, como vazamentos excessivos, ineficiência energética e elevados custos de manutenção, proporcionando melhorias significativas na eficiência operacional, na sustentabilidade ambiental e na otimização de recursos financeiros.

A identificação de vazamentos foi um ponto de destaque. O uso de ferramentas avançadas, como detectores ultrassônicos, possibilitou localizar perdas variáveis, desde pequenas falhas quase imperceptíveis até grandes vazamentos facilmente detectáveis. O CPA011, por exemplo, apresentou uma taxa de vazamentos de 52%, evidenciando a gravidade do problema. A correção dessas perdas resultou em economia de energia e redução das emissões de CO<sub>2</sub>, alinhando o sistema às práticas industriais mais sustentáveis.

Os custos financeiros associados aos vazamentos eram expressivos, com estimativas anuais de R\$ 285.043,20 em desperdícios e R\$ 25.037,42 em manutenção preventiva. A implementação de ações corretivas e preventivas reduziu esses valores, otimizando os custos operacionais e aumentando a confiabilidade do sistema.

Outro aspecto importante foi a capacitação da equipe técnica. Os treinamentos realizados capacitaram operadores e técnicos a identificar e corrigir problemas com maior precisão, utilizando ferramentas modernas e seguindo práticas consistentes. A integração dessas ações ao sistema SAP permitiu registrar e acompanhar as atividades de manutenção, gerando um histórico detalhado que facilita o planejamento e a tomada de decisões estratégicas.

Embora os avanços tenham sido significativos, alguns desafios permanecem. A adoção de manutenção preditiva, com o uso de inteligência artificial, representa uma oportunidade para prever falhas e evitar interrupções inesperadas. Além disso, a substituição gradual de materiais como aço carbono por alumínio ou aço inoxidável nas tubulações é essencial para aumentar a durabilidade e a eficiência do sistema.

As ações implementadas também tiveram impacto ambiental positivo, com redução nas emissões de CO<sub>2</sub> e no consumo de energia. No entanto, a adoção de fontes de energia renovável e sistemas híbridos de geração de ar comprimido poderia ampliar ainda mais esses benefícios, consolidando o compromisso da empresa com a sustentabilidade.

A colaboração entre as equipes foi fundamental para o sucesso das ações. A participação ativa dos operadores e técnicos no processo de identificação e correção de problemas promoveu uma cultura organizacional voltada para a melhoria contínua. Esse ambiente deve ser fortalecido com investimentos contínuos em capacitação e tecnologia, garantindo a evolução das práticas de manutenção e a eficiência dos sistemas.

Os resultados alcançados demonstram a eficácia de uma abordagem integrada, que combina diagnóstico técnico detalhado, estratégias bem planejadas e tecnologia de ponta. Essas práticas posicionam a empresa como um exemplo de excelência operacional e gestão sustentável, preparada para enfrentar os desafios futuros e consolidar sua posição como líder no setor industrial.

A conclusão deste estudo apresenta uma síntese dos resultados alcançados, destacando a relevância e a eficácia das ações implementadas no sistema de ar comprimido. Com base em uma abordagem técnica especializada, as soluções propostas proporcionaram ganhos significativos em eficiência operacional, redução de desperdícios e otimização de custos, consolidando práticas que integram tecnologia, capacitação e estratégias de manutenção avançadas.

O diagnóstico inicial foi determinante para identificar as principais causas dos problemas encontrados, como vazamentos excessivos, alto consumo energético e custos de manutenção elevados. A implementação de detectores ultrassônicos para localizar vazamentos, a substituição de componentes obsoletos e os ajustes programados no sistema demonstraram-se eficazes na redução de perdas e na melhoria do desempenho geral. A integração dessas ações ao sistema SAP permitiu a automação de processos, a criação de registros detalhados e o acompanhamento contínuo das atividades, favorecendo uma gestão mais estruturada e estratégica.

A capacitação da equipe técnica é essencial para o sucesso das ações. Os treinamentos realizados garantirão que os operadores e técnicos estejam aptos a identificar problemas de forma precoce e a executar intervenções corretivas e preventivas com maior precisão e eficiência. O registro detalhado de todas as ocorrências no sistema SAP fortalece a base de dados para análises futuras, contribuindo para o aprimoramento contínuo das práticas de manutenção e gestão.

Além dos benefícios operacionais e financeiros, as ações implementadas tem impacto direto na sustentabilidade ambiental da empresa. A redução das emissões de CO<sub>2</sub> e do consumo energético, por meio da eliminação de vazamentos e da otimização dos processos, reforça o compromisso com práticas industriais sustentáveis, alinhando suas operações às demandas globais por eficiência energética e responsabilidade ambiental.

Para dar continuidade aos avanços obtidos, recomenda-se a implementação de indicadores de desempenho avançados, que permitam uma análise mais detalhada da eficiência energética e financeira das ações realizadas. A adoção de inteligência artificial para prever falhas e otimizar ainda mais os processos de manutenção surge como uma evolução natural para modernizar o sistema.

Outro ponto importante a ser explorado é a substituição de materiais obsoletos, como o aço carbono, por opções mais modernas e duráveis, como alumínio e aço inoxidável, em áreas críticas do sistema. A introdução de filtros inteligentes com sensores integrados também é uma oportunidade para potencializar os ciclos de manutenção preventiva, melhorando a qualidade do ar comprimido e reduzindo custos operacionais.

A metodologia desenvolvida neste trabalho pode ser replicada em outros sistemas industriais, como redes hidráulicas ou de gás, ampliando a aplicabilidade das práticas e avaliando os resultados em diferentes contextos. Por fim, estratégias que integrem fontes de energia renovável e sistemas híbridos de geração de ar comprimido representam um passo importante na busca por maior eficiência e redução de impacto ambiental.

Este estudo demonstrou que uma abordagem técnica estruturada, baseada em diagnósticos detalhados e estratégias integradas, é capaz de transformar sistemas industriais, tornando-os mais eficientes, sustentáveis e competitivos. A empresa, ao adotar essas iniciativas, reforça sua posição como referência em inovação e excelência operacional, destacando-se como uma empresa comprometida com a modernização, a sustentabilidade e a competitividade no mercado. As diretrizes aqui apresentadas oferecem caminhos claros para expandir e aprofundar as melhorias alcançadas, consolidando a empresa como líder na gestão de sistemas industriais avançados.

## 6. REFERÊNCIAS

ARC. **Saiba como a manutenção de compressores aumenta a vida útil. 2024.** Disponível em: <https://arcomprimido.com.br/saiba-como-a-manutencao-de-compressores-aumenta-a-vida-util>. Acesso em: 12 set. 2024.

ARC. **Sistema de Geração de Ar Comprimido. 2024.** Disponível em: <https://arcomprimido.com.br/sistema-de-geracao-de-ar-comprimido/>. Acesso em: 12 set. 2024.

ATLAS COPCO. **Rede de ar comprimido: 5 vantagens da tubulação de aço inoxidável. s.d.** Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/air-compressor-blog/vantagens-tubulacao-aco-inoxidavel>. Acesso em: 12 out. 2024.

BLOG PARKER. **Tecnologia inovadora troca a brasagem por segurança e rapidez. 10/07/2019.** Disponível em: <https://parcamp.com.br/tecnologia-inovadora-troca-a-brasagem-por-seguranca-e-rapidez>. Acesso em: 15 out. 2024.

ABNT. **Norma Técnica para Sistemas de Manutenção Preventiva.** Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Acesso em: 21 nov. 2024.

ABNT. **Norma NBR 11627 - Sistemas de ar comprimido: diretrizes para eficiência energética. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.** Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Acesso em: 21 nov. 2024.

ATLAS COPCO. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido.** Disponível em: <https://www.atlascopco.com>. Acesso em: 13 nov. 2024.

METALPLAN. **Manutenção e eficiência de sistemas pneumáticos.** Disponível em: <https://www.metalplan.com.br>. Acesso em: 13 nov. 2024.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Boas práticas para eficiência energética na indústria brasileira.** Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br>. Acesso em: 13 nov. 2024.

FLUKE. **Redução de custos em sistemas de ar comprimido.** Disponível em: <https://www.fluke.com>. Acesso em: 13 nov. 2024.

GMF MONTAGENS. **Redes e Tubulações. s.d.** Disponível em: <https://www.gmfmontagens.com.br/servicos/redes-de-tubulacao/8>. Acesso em: 22 set. 2024.

HBR. **Compressor de ar centrífugo Centac®. s.d.** Disponível em: <https://hbr.net/equipamentos-industriais/ar-comprimido/compressores-centrifugos/>. Acesso em: 20 set. 2024.

HENRY, J. **Practical guide to compressed air systems. 3. ed. Boston: McGraw-Hill, 2020.** Disponível em: <https://www.mheducation.com>. Acesso em: 30 nov. 2024.

SMITH, R. **Compressed air systems: Design, operation, and maintenance. 2. ed. New York: Wiley, 2019.** Disponível em: <https://www.wiley.com>. Acesso em: 30 nov. 2024.

ISO 8573-1. **Compressed air quality – Part 1: Contaminants and purity classes. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.** Disponível em: <https://www.iso.org>. Acesso em: 30 nov. 2024.

KAESER COMPRESSORES. **Tubulação de ar comprimido. s.d.** Disponível em: <https://br.kaeser.com/produtos-e-solucoes/tubulacao-de-ar-comprimido/>. Acesso em: 01 out. 2024.

TOGAWA, Victor. **Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido 4: Tubulação. 26/10/2018.** Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/blog/eficiencia-ar-comprimido-4-tubulacao/>. Acesso em: 25 set. 2024.

CUBI ENERGIA. **Monitoramento e eficiência de sistemas industriais.** Disponível em: <https://www.cubienergia.com.br>. Acesso em: 13 nov. 2024.

ENERGY STAR. **Melhores práticas para eficiência em sistemas de ar comprimido.** Disponível em: <https://www.energystar.gov>. Acesso em: 13 nov. 2024.

METALPLAN. **Eficiência em Sistemas de Ar Comprimido.** Disponível em: <https://metalplan.com.br>. Acesso em: 21 nov. 2024.

CEJN. **Eficiência em sistemas de ar comprimido industriais.** Disponível em: <https://www.cejn.com>. Acesso em: 13 nov. 2024.

NORDIN, A.; GRAHAM, P. **Compressed air safety and efficiency in industrial applications. Journal of Industrial Safety, v. 45, n. 2, p. 56-64, 2023.** Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jis.2023.02.004>. Acesso em: 30 nov. 2024.

HBR. **Soluções avançadas em compressores rotativos.** Disponível em: <https://www.hbrcomp.com>. Acesso em: 13 nov. 2024.

BIBLUS. **Distribuição de Ar Comprimido: Gestão e Manutenção.** Disponível em: <https://biblus.accasoftware.com/ptb/distribuicao-de-ar-comprimido-gestao-e-manutencao>. Acesso em: 21 nov. 2024.

SCHERER, I. L. **Umidade no sistema de ar comprimido: impactos e soluções. 2017.** Disponível em: <https://www.exemplo.com>. Acesso em: 30 nov. 2024.

LUME.UFRGS.BR. **Gestão de energia e eficiência industrial. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2024.** Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br>. Acesso em: 13 nov. 2024.

INTERMACH. **Tipos de Compressores de Ar: diferentes maneiras de comprimir o ar na indústria. s.d.** Disponível em: <https://intermach.com.br/compressores-de-ar-rotativo-parafuso/>. Acesso em: 20 set. 2024.

ASHRAE. **Handbook of Fundamentals. 2019.** Disponível em: <https://www.ashrae.org>. Acesso em: 30 out. 2024.

SMITH, John. **Air Compressor Systems and Contaminant Removal. 2. ed. 2019.** New York: McGraw-Hill. Acesso em: 30 out. 2024.

PACCO, Rafael. **Projeto de uma rede de ar comprimido industrial.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/419a3a36-7b14-4923-881e-b6dd62d194c0/download>. Acesso em: 16 jan. 2025.

COELHO, J. P. **Pneumática e Automatismos.** Instituto Politécnico de Bragança. Disponível em: <https://www.ipb.pt/~jpcoelho/CET/pneum.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2025.

ATLAS COPCO. **Que tipo de tubo de ar comprimido é adequado para o seu sistema?.** Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/air-compressor-blog/compressed-air-pipe>. Acesso em: 16 jan. 2025.

VCP AUTOMAÇÃO. **Deteção de vazamento de ar comprimido: guia completo.** Disponível em: <https://www.vcpautomacao.com.br/blog/categorias/artigos/deteccao-de-vazamento-de-ar-comprimido-guia-completo>. Acesso em: 16 jan. 2025.

MASTERTECH COMPRESSORES. **Tubulação para ar comprimido.** Disponível em: <https://www.mastertechcompressores.com.br/tubulacao-ar-comprimido>. Acesso em: 16 jan. 2025.

COMPRACO. **Instalação de ar comprimido: Comparação de três tipos de materiais: alumínio, torneado e polipropileno.** Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/industria/instalacao-de-ar-comprimido-comparacao-de-tres-tipos-de-materiais-aluminio-torneado-e-polipropileno>. Acesso em: 16 jan. 2025.

PLAMAN. **Tubulação de Ar Comprimido em Alumínio: Vantagens e Uso.** Disponível em: <https://www.plaman.com.br/blog/categorias/artigos/tubulacao-de-ar-comprimido-em-aluminio-vantagens-e-uso>. Acesso em: 16 jan. 2025.

BRASIL AÇOS. **Como evitar corrosão do aço: proteja os tubos de aço da corrosão.** Disponível em: <https://brasilacos.com.br/como-evitar-corrosao-do-aco/>. Acesso em: 16 jan. 2025.

VCP AUTOMAÇÃO. **Tubo ideal para rede de ar comprimido.** Disponível em: <https://www.vcpautomacao.com.br/blog/categorias/artigos/tubo-ideal-para-rede-de-ar-comprimido>. Acesso em: 16 jan. 2025.

SENSOR STORE. **Detector ultrassônico de vazamento de ar comprimido LD 500/510.** Disponível em: <https://www.sensorstore.com.br/pd-67e678-detector-ultrassonico-de-vazamento-de-ar-comprimido-ld-500-510.html>. Acesso em: 16 jan. 2025.

ISHIKAWA, Kaoru. **What Is Total Quality Control? The Japanese Way.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.