

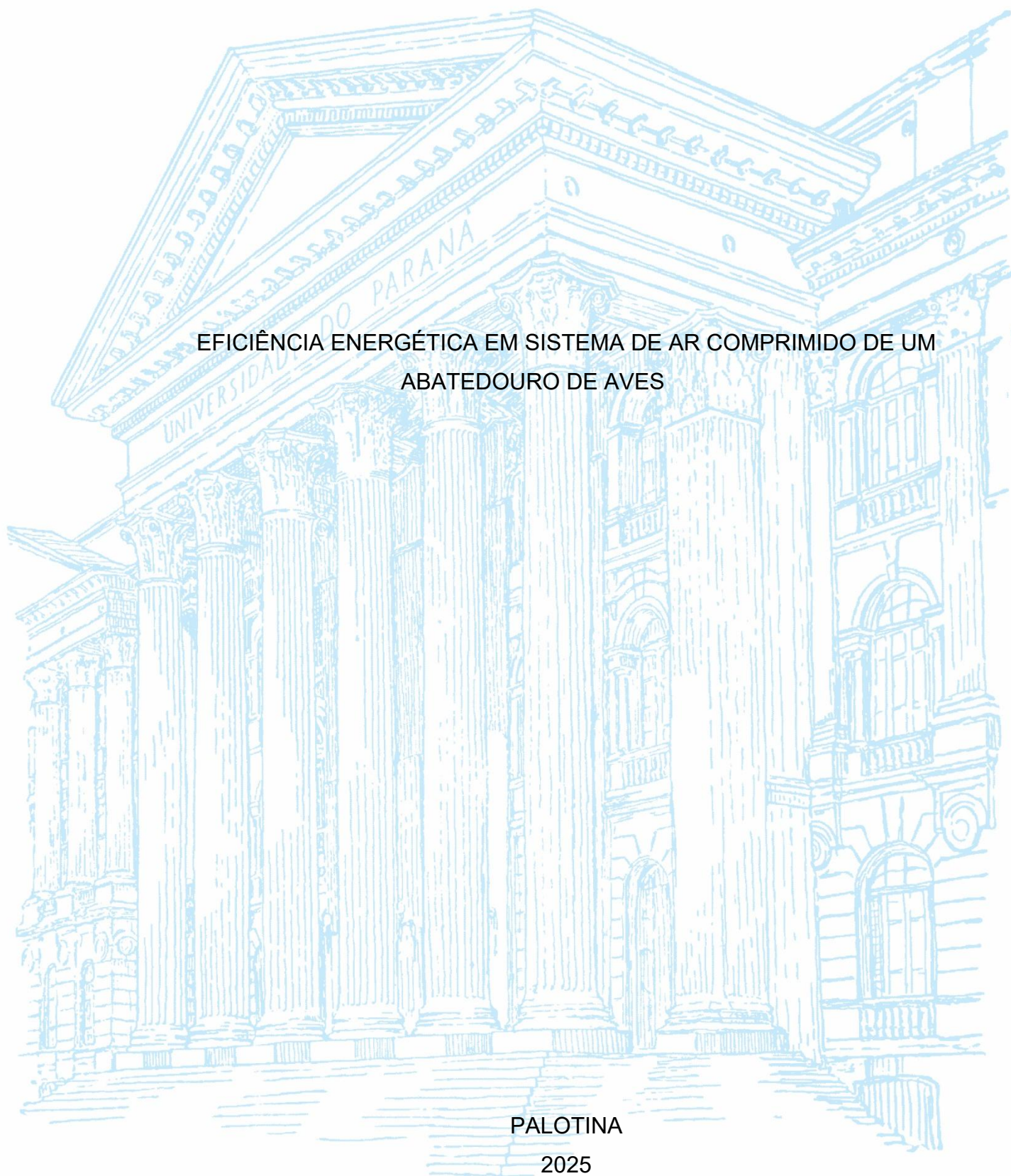
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS MELO ALVES

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO DE UM
ABATEDOURO DE AVES

PALOTINA

2025



Lucas Melo Alves

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO DE UM
ABATEDOURO DE AVES.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito para obtenção de título de Bacharel
em Engenharia de Energia pela Universidade
Federal do Paraná – Setor Palotina.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin

PALOTINA
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

No dia 27/06/2025, das 14h00min às 15h30min, de forma remota via plataforma TEAMS; compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheiro de Energia o aluno **Lucas Melo Alves**, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "*EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO DE UM ABATEDOURO DE AVES*". Constituíram a Banca Examinadora os professores: **Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin (Orientador e Presidente da Banca)**, **Prof. Dr. Mauricio Romani** e o **Engenheiro Altair Marques**. O orientador e Presidente da Banca concedeu a palavra ao discente, para exposição do seu trabalho. A seguir, foi concedida a palavra em ordem sucessiva aos membros da Banca de Exame, os quais passaram a arguir o discente. Ultimada a defesa, que se desenvolveu nos termos normativos, a Banca de Exame, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo atribuído ao discente as seguintes notas: **Prof. Dr. Eduardo Burin, nota: 90 (noventa)**, **Engenheiro Altair Marques Pereira Filho, nota: 90 (noventa)**, e o **Prof. Dr. Mauricio Romani, nota: 90 (noventa)**. A nota final do discente, após a média aritmética dos três membros da banca de exame, foi **90 (noventa)** considerando o discente **APROVADO**. As considerações e sugestões feitas pela Banca de Exame deverão ser atendidas pelo discente sob acompanhamento de seu orientador. Nada mais havendo a tratar foi lavrada a presente ata, que, lida e aprovada, vai por todos assinada eletronicamente.

Link da reunião:

https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3ameeting_MjJkY2RkOGMtYTExYS00ODQyLTkyNDAtYjg4YmViNDUyMTFh%40thread.v2/0?context=%7b%22id%22%3a%22c37b37a3-e9e2-42f9-bc67-4b9b738e1df0%22%2c%22oid%22%3a%22456537a2-fb37-4e17-9b53-83b17956ced4%22%7d



Documento assinado eletronicamente por **EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2025, às 15:28, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **MAURICIO ROMANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2025, às 15:29, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Altair Marques Pereira Filho, Usuário Externo**, em 27/06/2025, às 15:38, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus, cuja presença e orientação não apenas ao longo dos anos universitários, mas em todos os momentos da minha vida, possibilitaram todas essas conquistas.

Agradeço de todo o coração à minha mãe, Deise, pelo amor, incentivo e apoio inabalável ao longo de toda a minha jornada. Seu apoio foi fundamental para eu chegar até aqui. Da mesma forma, desejo expressar profunda gratidão ao meu pai, cujo apoio contínuo, mesmo após sua partida, sempre impulsionou meu sucesso, confiando em Deus em cada passo da minha jornada.

À minha amada família, agradeço imensamente por sua constante motivação, carinho e apoio, essenciais para me encorajar a buscar conhecimento. Sinto-me profundamente grato por todo o suporte, dedicação e orientação que recebi de vocês.

Quero também expressar minha profunda gratidão ao Professor Eduardo Burin, meu orientador, por sua orientação, incentivo e confiança ao longo de todo o processo. Sua vasta experiência e conhecimento foram cruciais para o sucesso desta pesquisa.

Ao Grupo de Estudos em Energia Renováveis e Alternativas (GERA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), agradeço pela oportunidade de adquirir conhecimento e pelo apoio recebido de pessoas qualificadas que me incentivaram ao longo dessa jornada acadêmica.

Um agradecimento especial ao corpo técnico da agroindústria, especialmente ao engenheiro Claudio e ao técnico Paulo, por permitirem meu estágio e contribuírem com dados técnicos essenciais para este trabalho. Sua disponibilidade e expertise foram fundamentais para o progresso e conclusão desta pesquisa.

Aos meus colegas de graduação, sou grato pelo companheirismo e pela troca de experiências ao longo do percurso acadêmico. Nossa colaboração mútua possibilitou meu crescimento pessoal e enriqueceu minha jornada universitária. Por fim, expresso minha gratidão a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Sua influência e apoio foram indispensáveis para seu sucesso.

A jornada de mil milhas começa com o primeiro passo. Não importa o quão lento você vá, desde que não pare. A constância e a determinação transformam esforço em conquista. (Lao Tsé, 2017.)

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo avaliar a eficiência energética do sistema de ar comprimido de um abatedouro de aves localizado no interior do Paraná. O estudo compreendeu um levantamento completa de vazamentos em todo o complexo industrial, bem como a análise detalhada de perdas de carga em duas linhas críticas de distribuição de ar comprimido: a linha do empilhador de gaiolas e a linha da caldeira industrial. A metodologia adotada incluiu inspeções com detector ultrassônico, medições em campo, cálculo das perdas de carga por meio da equação da Atlas Copco e simulações de redimensionamento das tubulações. Durante o levantamento, foram identificados 272 pontos de vazamento, totalizando uma perda estimada de 1.565,7 m³/h de ar comprimido. Isso representou um desperdício energético anual de 1.162.626,19 kWh, com impacto financeiro de aproximadamente R\$ 499.929,26. Após os reparos, foi possível desligar um compressor, gerando uma economia real de R\$ 335.585,14 por ano. Nas duas linhas analisadas, as perdas de carga superaram o limite técnico recomendado de 0,3 bar. Foram, então, propostas melhorias como o redimensionamento de trechos da tubulação, com potencial de economia adicional de R\$ 34.342,26 por ano. Conclui-se que a implementação de ações corretivas e preventivas, como a detecção sistemática de vazamentos e o redimensionamento adequado das tubulações, pode gerar ganhos significativos de eficiência energética e redução de custos operacionais em sistemas pneumáticos industriais.

Palavras-chave: Economia de energia; Eficiência em processos industriais; Vazamento de ar; Perda de carga; Redimensionamento de tubulação.

ABSTRACT

This undergraduate thesis aims to evaluate the energy efficiency of the compressed air system in a poultry processing plant located in the interior of Paraná, Brazil. The study involved a comprehensive leak survey across the entire facility and a detailed pressure loss analysis in two critical distribution lines: the cage stacker line and the boiler supply line. The methodology included ultrasonic leak detection, field measurements, pressure drop calculations using the Atlas Copco equation, and pipe resizing simulations. The leak survey identified 272 leakage points, resulting in an estimated loss of 1,565.7 m³/h of compressed air. This corresponds to an annual energy waste of 1,162,626.19 kWh and a financial impact of approximately R\$ 499,929.26. Following the corrective actions, one compressor was shut down, yielding real annual savings of R\$ 335,585.14. In the two lines analyzed, pressure losses exceeded the recommended limit of 0.3 bar. Improvement measures were proposed, including the resizing of certain pipe sections, with an additional potential savings of R\$ 34,342.26 per year. The study concludes that implementing corrective and preventive actions such as systematic leak detection and proper pipe sizing can significantly improve energy efficiency and reduce operational costs in industrial pneumatic systems.

Keywords: Energy savings; Efficiency in industrial processes; Air leakage; Pressure drop; Pipe resizing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – TIPOS DE COMPRESSORES MAIS COMUNS	21
FIGURA 2 – CIRCUITO ABERTO	27
FIGURA 3 – CIRCUITO FECHADO	28
FIGURA 4 – CIRCUITO COMBINADO	29
FIGURA 5 – DETECTOR ULTRASSÔNICO	32

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – COMPATIVO ENTRE PRESSÃO DE SAÍDA E PRESSÃO DE CHEGADA	35
--	----

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – DADOS DOS COMPRESSORES.....	34
QUADRO 2– CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 9h.....	40
QUADRO 3 – CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 15h.....	40
QUADRO 4 – CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 21h.....	41
QUADRO 5 – CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 9h POS REPAROS DOS VAZAMENTOS	42
QUADRO 6 – CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 15h REPAROS DOS VAZAMENTOS	42
QUADRO 7 – CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 21h POS REPAROS DOS VAZAMENTOS	43

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DADOS DA LINHA DO EMPILHADOR DE GAIOLAS	44
TABELA 2 – DADOS DA LINHA DA CALDEIRA.....	45
TABELA 3 – COMPRIMENTO EQUIVALENTE DA LINHA DO EMPILHADOR DE GAIOLAS	46
TABELA 4 – COMPRIMENTO EQUIVALENTE DAS CONEXOES DA LINHA DA CALDEIRA	47

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABPA	- Associação Brasileira de Proteína Animal
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
ISO	- International Organization for Standardization
FRL	- Filtro Regulador Lubrificado
PROCEL	- Programa Nacional de Conservação de Energia
m.c.a.	Elétrica- Metro de coluna de água

LISTA DE SÍMBOLOS

Δp - Variação de pressão

D- Diâmetro interno da tubulação (m)

L - Comprimento da tubulação (m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA	17
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 HISTÓRICO DE LEIS, DECRETOS E RESOLUÇÕES.....	19
2.2 AVICULTURA.....	19
2.3 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	20
2.4 TIPOS DE COMPRESSORES	21
2.4.1 Compressores dinâmicos	22
2.4.2 Compressores de deslocamento positivo	22
2.5 SECADORES.....	23
2.5.1 Secador por refrigeração.....	23
2.5.2 Sobrepressão	24
2.5.3 Membranas	24
2.5.4 Secagem por absorção	24
2.5.5 Adsorção	24
2.6 FILTROS	25
2.7 RESERVATÓRIO	25
2.8 REDE DE DISTRIBUIÇÃO	26
2.8.1 Circuito aberto	27
2.8.2 Circuito fechado	28
2.8.3 Circuito combinado.....	28
2.9 VAZAMENTOS.....	29
2.9.1 Queda de pressão do ar comprimido	30
2.10 DETECTOR ULTRASSÔNICO	31
2.11 QUEDA DE PRESSÃO DO AR COMPRIMIDO	33
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 LOCAL DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA	34
3.2 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO ANALISADAS.....	34

3.3 MONITORAMENTO OPERACIONAL DOS COMPRESSORES	35
3.4 LEVANTAMENTO DE VAZAMENTOS	35
3.5 CÁLCULO DE CONSUMO ESPECÍFICO E CUSTO ANUAL DE VAZAMENTOS	
36	
3.6 ANÁLISE DA PERDAS DE CARGA NAS LINHAS	38
3.7 CÁLCULO DA PERDA DE PRESSÃO	38
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	40
4.1 VAZAMENTOS NO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO	40
4.2 PERDA DE CARGA	43
4.2.1 Cálculo do comprimento equivalente	45
4.2.1.1 Linha do Empilhador de Gaiolas	46
4.2.1.2 linha da caldeira	46
4.2.2 Cálculo da queda de pressão do Empilhador de Gaiolas	48
4.2.3 Cálculo da Perda de Pressão – Linha da Caldeira (Setorizado)	49
4.2.4 Análise e Proposta de Melhoria	52
4.2.4.1 Melhorias Propostas:	53
4.2.4.2 Resultados das Simulações com o Novo Dimensionamento	53
4.2.4.3 Conclusões Parciais da Análise	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

O uso do ar comprimido como fonte de energia tem se consolidado como uma solução versátil e segura na indústria moderna. Sua aplicação é ampla, englobando desde sistemas de automação até equipamentos pneumáticos de transporte e controle. Entretanto, embora amplamente empregado, o sistema de ar comprimido apresenta notórias ineficiências do ponto de vista energético. Segundo a Atlas Copco (2015), apenas cerca de 10% da energia elétrica utilizada no processo de compressão é convertida em trabalho útil, sendo o restante dissipado, principalmente, em forma de calor.

Esse baixo rendimento está diretamente associado a fatores como vazamentos ao longo das tubulações, dimensionamento inadequado das linhas de distribuição e perdas de carga excessivas nos circuitos. Essas falhas são frequentemente negligenciadas nas rotinas operacionais, embora representem um custo energético elevado e comprometam a confiabilidade dos sistemas.

No setor agroindustrial, especialmente em abatedouros de aves, o ar comprimido desempenha papel fundamental em processos críticos, como a movimentação de equipamentos pneumáticos, o acionamento de válvulas e o transporte interno automatizado. A combinação entre a alta demanda por ar comprimido, longas distâncias de distribuição e a operação contínua torna esse ambiente particularmente suscetível a desperdícios energéticos relevantes.

Nesse contexto, este trabalho propõe-se a investigar as ineficiências energéticas em um sistema de ar comprimido instalado em um abatedouro de aves localizado no interior do Paraná. A pesquisa concentrou-se na realização de um levantamento completa de vazamentos, no mapeamento técnico da rede de distribuição e na análise das perdas de carga em dois trechos críticos: a linha de suprimento do empilhador de gaiolas e a linha de alimentação da caldeira industrial.

Além da coleta de dados operacionais e medições em campo, foram utilizadas simulações para estimar o potencial de economia energética e financeira com a implementação de melhorias, tais como o redimensionamento das tubulações e a adoção de ações corretivas e preventivas. Ao final, a viabilidade das intervenções foi avaliada sob as perspectivas técnica e econômica, demonstrando o papel estratégico da gestão energética aplicada a sistemas pneumáticos industriais.

1.1 PROBLEMA

Apesar da ampla aplicação dos sistemas de ar comprimido no ambiente industrial, esses sistemas são notoriamente ineficientes em termos de conversão energética. Conforme observado na planta industrial analisada neste estudo, dois trechos da rede de distribuição a linha do empilhador de gaiolas e a linha da caldeira apresentaram perdas de carga superiores aos limites recomendados, implicando diretamente em um maior consumo de energia elétrica pelos compressores.

Essa condição não apenas eleva os custos operacionais da planta, mas também compromete a confiabilidade do sistema e sua sustentabilidade a longo prazo. A ausência de um dimensionamento técnico adequado das tubulações, aliada à operação contínua do sistema e à carência de manutenção preventiva, tende a amplificar os efeitos dessas ineficiências.

Dessa forma, o presente trabalho se propõe a identificar e quantificar as principais fontes de perda de energia associadas ao sistema de ar comprimido do abatedouro, com o objetivo de propor soluções viáveis sob os aspectos técnico e econômico para mitigação das perdas identificadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar maneiras de reduzir o consumo de energia elétrica no sistema de ar comprimido de um abatedouro de aves.

1.2.2 Objetivos específicos

- Calcular a perda de carga na tubulação de ar comprimido.
- Avaliar as perdas de ar por vazamentos no sistema.
- Com base nessas análises, identificar formas de:
 - Reduzir o consumo de energia elétrica.
 - Melhorar a eficiência do sistema de ar comprimido no abatedouro de aves.

1.3 JUSTIFICATIVA

Considerando os dados mais recentes do Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2024 (BRASIL, 2024), é notável que o consumo anual de energia elétrica no Brasil atingiu 531,872 GWh no ano 2023, refletindo um aumento de 4,40% em relação ao período anterior. Esse crescimento é significativo e demonstra a contínua expansão das atividades econômicas e industriais no país. É importante ressaltar que, dentro desse consumo, cerca de 35,44% foram direcionados para as indústrias, destacando a sua importância como um dos principais consumidores de energia elétrica.

É fundamental reconhecer que, paralelamente ao aumento do consumo de energia, observamos também um crescimento na geração de energia para suprir essa demanda crescente. No entanto, é crucial destacar que esse aumento na geração de energia não pode ser uma solução isolada para enfrentar os desafios energéticos do país. Devemos olhar para além da simples produção e buscar maneiras de otimizar o uso da energia elétrica, tornando os processos mais eficientes e sustentáveis.

É pertinente lembrar as palavras de Procel (2005), que apontam a produção de ar comprimido como um dos processos mais suscetíveis ao desperdício nas fábricas, com vazamentos representando entre 10 e 40% da demanda máxima desse sistema. Diante desse cenário, fica evidente a necessidade de implementar medidas para reduzir essas perdas e otimizar o uso de recursos energéticos.

Além disso, à medida que enfrentamos desafios ambientais cada vez mais urgentes, como as mudanças climáticas, torna-se ainda mais essencial buscar soluções que reduzam o impacto no meio ambiente. Investir na eficiência energética não apenas traz benefícios econômicos, ao permitir a alocação de recursos para novos processos e produtos, mas também contribui para a construção de um futuro mais sustentável.

Portanto, ao adotar medidas proativas para melhorar a eficiência energética em indústrias e em todos os setores da economia, não apenas podemos minimizar o desperdício de recursos preciosos, mas também contribuir significativamente para a construção de um país mais resiliente, competitivo e ecologicamente consciente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 HISTÓRICO DE LEIS, DECRETOS E RESOLUÇÕES

O Brasil é marcado por uma série de iniciativas que visam promover o uso racional de energia e reduzir o desperdício, além de incentivar a adoção de práticas sustentáveis em diversos setores da sociedade. Serão destacadas algumas das principais medidas ao longo do tempo:

Lei nº 9.991/2000: Esta lei estabelece a obrigatoriedade de investimento por parte das concessionárias de energia elétrica em programas de eficiência energética. As concessionárias devem destinar uma parte de sua receita para a realização de projetos que visam a melhoria do consumo e o uso eficiente de energia elétrica.

Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL): Criado em 1985, o PROCEL é uma iniciativa do Governo Federal voltada para promover a eficiência energética no país. O programa desenvolve ações de conscientização, incentivo à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias, além de oferecer certificações de eficiência para equipamentos e edificações.

Programa de Eficiência Energética da ANEEL: A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) implementa programas de eficiência energética em todo o país, com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica e incentivar práticas sustentáveis. Esses programas incluem desde campanhas de conscientização até incentivos financeiros para a realização de projetos de eficiência.

Decreto nº 10.350/2020: Este decreto estabelece diretrizes para a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Ele reforça o compromisso do governo brasileiro com a eficiência energética e estabelece metas e estratégias para promover a conservação de energia em diversos setores da economia.

2.2 AVICULTURA

De acordo com o relatório de 2024 da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA), os Estados Unidos da América se destacaram como o maior produtor global de frango, alcançando a marca de 21,095 milhões de toneladas. Em seguida, o Brasil figura como o segundo maior produtor do mundo, com uma produção de 14,833 milhões de toneladas. Dessa quantidade, aproximadamente 34,65% são

destinadas à exportação, gerando um valor significativo de US\$ 9,7 bilhões em um ano, fortalecendo assim a economia nacional.

Essa produção brasileira é distribuída para 150 países ao redor do mundo, consolidando o país como líder no mercado de exportação de proteína animal.

O estado do Paraná se destaca como o maior produtor do Brasil, respondendo por 39,47% da produção nacional, o que equivale a 2,090 bilhões de toneladas. Além disso, o Paraná também se destaca como o maior exportador, com uma participação de 41,7% de toda a produção nacional, reforçando sua importância no cenário global (ABPA,2024).

Este cenário demonstra o papel fundamental do Brasil, especialmente do estado do Paraná, na produção e exportação de proteína animal, contribuindo significativamente para a economia nacional e para a segurança alimentar mundial.

2.3 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Conforme o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2024, fornecido pela Empresa de Pesquisa Energética, o Brasil, em 2023, demonstra uma significativa predominância de fontes renováveis na matriz elétrica, com 88,5% da energia destinada à geração proveniente dessas fontes. Dentre elas, a energia hidráulica se destaca, contribuindo com 60,2% da capacidade total de geração, que alcança 425.995 GWh. Essa característica coloca o Brasil entre os países líderes no uso de fontes renováveis para a produção de energia, resultando em emissões relativas baixas, estimadas em 55,1 KgCO₂/MWh. Essa cifra revela que o Brasil emite cerca de 88% menos CO₂ para gerar cada MWh em comparação com a China, 78% menos em relação aos Estados Unidos e 69% menos se comparado aos países europeus da OCDE.

Apesar desses avanços, é importante destacar que, no ano de 2021, o Brasil enfrentou uma crise hídrica, o que resultou na necessidade de utilização de fontes não renováveis para a geração de energia, ocasionando um aumento nas emissões de gases poluentes em relação a 2022.

A indústria figura como o maior consumidor de energia no Brasil, utilizando 35,4% do total de energia consumida, alcançando um consumo de 188.476 GWh em 2023. Em comparação com o ano anterior, houve um aumento de 2,2% no consumo

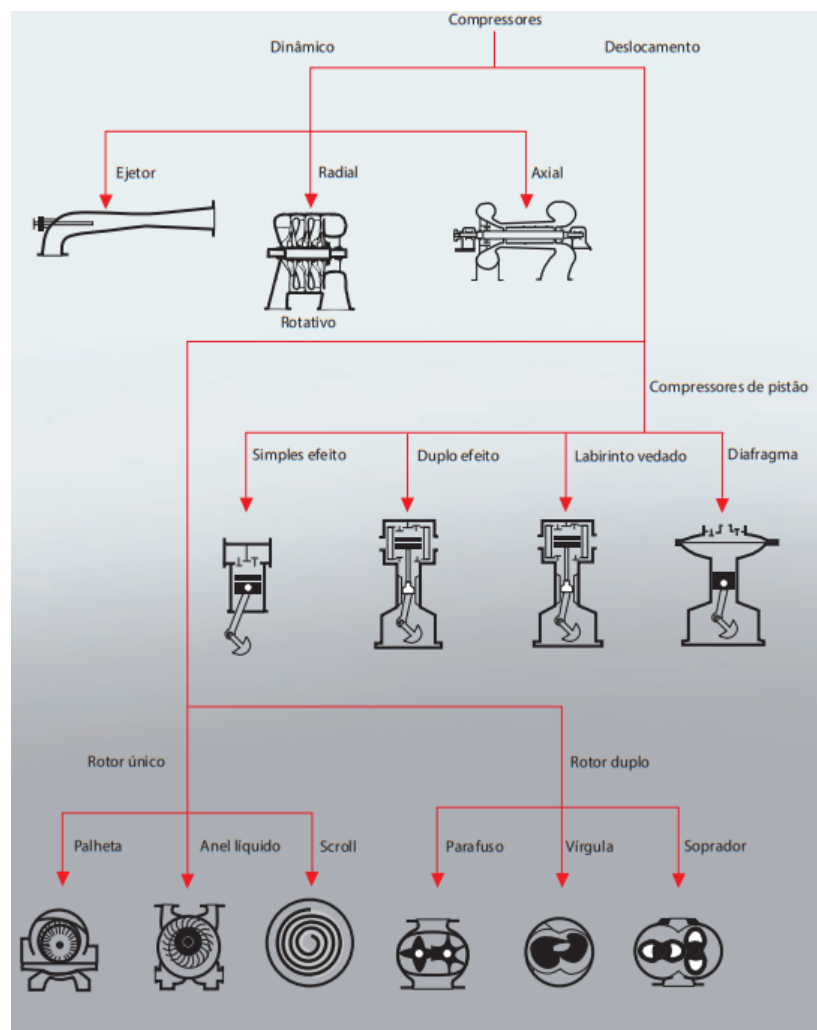
destinado à indústria. Dentre os setores industriais, 13,8% da energia é direcionada para a produção de alimentos, totalizando um consumo de 25.533 GWh.

Esses dados evidenciam a importância de medidas de eficiência energética, mesmo em um país com uma matriz energética majoritariamente renovável como o Brasil, especialmente diante das oscilações climáticas e suas consequências na disponibilidade de recursos hídricos.

2.4 TIPOS DE COMPRESSORES

Existem dois tipos de compressores amplamente utilizados: os compressores de deslocamento positivo e os compressores dinâmicos. A partir desses tipos, há variações na construção, conforme ilustrado na Figura 1.

FIGURA 1 – TIPOS DE COMPRESSORES MAIS COMUNS



FONTE: Atlas copco (2015).

2.4.1 Compressores dinâmicos

Nos compressores dinâmicos, a compressão é alcançada por meio da conversão da energia cinética em energia potencial, ou seja, em pressão do ar comprimido. Esse processo ocorre ao se acelerar a massa de gás até altas velocidades em um impulsor e, em seguida, forçá-la a desacelerar ao ser expandida no difusor. Segundo a Metalplan (2025), os compressores dinâmicos operam com turbinas ou rotores que aumentam a velocidade do gás, transformando posteriormente essa energia em pressão, sem a redução direta de volume como ocorre nos compressores volumétricos.

Esses compressores podem ser classificados em dois principais tipos: centrífugos e axiais. Os centrífugos são os mais comuns na indústria, amplamente utilizados em aplicações que requerem operação contínua e manutenção reduzida. Já os compressores axiais, por serem mais compactos e leves, são ideais para situações que exigem vazões elevadas e constantes, com a vantagem adicional de operarem em rotações significativamente maiores que os centrífugos equivalentes. Assim, os compressores dinâmicos se mostram particularmente eficazes para aplicações que demandam grandes volumes de ar sob pressões moderadas (METALPLAN, 2025).

2.4.2 Compressores de deslocamento positivo

Um compressor de deslocamento positivo funciona a partir da aspiração do ar para uma ou mais câmaras de compressão, que são fechadas após a entrada. Em seguida, o volume dessas câmaras é gradualmente reduzido por meio do movimento de componentes móveis, o que resulta no aumento da pressão interna. Quando essa pressão atinge o valor de projeto, uma válvula é aberta, permitindo a descarga do ar comprimido no sistema de saída (Atlas Copco, 2015).

Segundo Freitas (2017), os compressores podem ser divididos em dois tipos: alternativos e rotativos. Os compressores alternativos são caracterizados por três tecnologias distintas: pistão simples, pistão duplo ou diafragma. Na indústria, é comum encontrar grandes compressores volumétricos alternativos do tipo pistão duplo, os quais são refrigerados a água. Apesar de oferecerem a maior eficiência entre os tipos disponíveis, esses compressores tendem a ser maiores, mais ruidosos e mais caros em comparação com os compressores volumétricos rotativos.

Por outro lado, os compressores rotativos apresentam uma ampla variedade de tecnologias de compressão, incluindo espiral, palhetas, anel líquido, parafuso (lubrificado ou isento de lubrificação), roots ou dentes. Devido ao custo inicial mais baixo, facilidade de manutenção e design compacto, os compressores de parafuso são a tecnologia mais comumente encontrada entre os compressores volumétricos rotativos, podendo ser resfriados a ar ou a água.

2.5 SECADORES

Conforme destacado pela Atlas Copco (2020), o ar atmosférico, naturalmente, contém vapor de água, com maior concentração em altas temperaturas e menor em baixas temperaturas. Contudo, ao ser comprimido, essa concentração de água aumenta significativamente. Por exemplo, um compressor operando a uma pressão de 7 bar e com capacidade de 200 litros por segundo, ao comprimir o ar a 20°C com uma umidade relativa de 80%, pode liberar até 10 litros de água por hora na linha de ar comprimido.

Para evitar problemas decorrentes da precipitação de água nos tubos e equipamentos conectados, é essencial que o ar comprimido seja seco. Para isso, existem cinco técnicas principais para remover a umidade do ar comprimido:

2.5.1 Secador por refrigeração

Envolve o resfriamento do ar comprimido até atingir o ponto de orvalho, provocando a condensação da umidade, que é então separada do sistema por meio de um separador de água. Esse processo se baseia na redução da capacidade do ar de reter vapor d'água à medida que sua temperatura diminui. Quando o ar comprimido é resfriado entre 3 °C e 5 °C, a umidade excedente condensa e pode ser removida por filtros e drenos. Essa técnica é eficaz para remover grandes quantidades de umidade, sendo amplamente utilizada em aplicações industriais. No entanto, pode apresentar limitações em ambientes com temperaturas muito baixas, pois há risco de congelamento da água condensada, comprometendo o funcionamento do sistema (HIPRESS, 2025).

2.5.2 Sobrepressão

A técnica de sobrepressão consiste em elevar a pressão do ar comprimido, o que resulta em uma redução da sua temperatura e promove a condensação do vapor d'água presente. A umidade condensada é então separada do ar por meios mecânicos. Esse processo é semelhante ao resfriamento convencional, com a diferença de que a pressão adicional contribui para a maior eficiência do resfriamento e separação da água (HIPRESS, 2025).

2.5.3 Membranas

Os secadores por membrana funcionam com base na diferença de permeabilidade de gases através de uma membrana polimérica semipermeável. O vapor d'água difunde-se mais rapidamente do que o ar comprimido, permitindo sua remoção eficiente em baixas vazões e pontos de consumo isolados. No entanto, essa tecnologia apresenta menor desempenho em ambientes com alta umidade relativa ou demanda elevada de vazão (PUMA, 2023).

2.5.4 Secagem por absorção

Na secagem por absorção, um material químico absorvente (como o cloreto de lítio ou gel de sílica) reage com a umidade do ar comprimido, fixando a água em sua estrutura interna. Esse processo é simples e silencioso, mas o absorvente se torna inutilizável após a saturação, exigindo substituição periódica, o que pode gerar custo adicional (ATLAS COPCO, 2024).

2.5.5 Adsorção

A secagem por adsorção utiliza materiais adsorventes, como alumina ativada ou carvão ativado, que retêm a umidade na superfície dos seus poros. Esse tipo de secador é regenerável: após saturação, o material adsorvente pode ser reativado por meio de calor ou vácuo. Essa tecnologia é indicada para aplicações que exigem ponto de orvalho muito baixo, como ambientes críticos e salas limpas (METEPLAN, 2023).

2.6 FILTROS

A qualidade do ar comprimido depende fortemente do sistema de filtração. Os filtros industriais são projetados para remover partículas sólidas, vapor d'água e óleo, e funcionam por diferentes mecanismos físicos. Partículas maiores que 1 mm são retidas mecanicamente (peneiramento), enquanto partículas menores são capturadas por impactação inercial, interceptação e difusão, dependendo de seu tamanho e comportamento no fluxo de ar (ATLAS COPCO, 2024).

A eficiência do filtro depende do material filtrante, da distribuição das fibras, da velocidade do ar e da carga de partículas no sistema. A filtração, no entanto, causa perda de carga, o que pode comprometer o desempenho energético e demandar trocas frequentes do elemento filtrante (HIPRESS, 2025).

Além disso, a norma ISO 8573-1 define os níveis aceitáveis de contaminantes no ar comprimido, estabelecendo classes de qualidade para partículas sólidas, umidade e óleo. Para aplicações críticas, como nas indústrias alimentícia, farmacêutica ou eletrônica, recomenda-se o uso de ar comprimido de Classe 0, que representa o nível mais alto de pureza (PUMA, 2023).

2.7 RESERVATÓRIO

Os reservatórios de ar comprimido desempenham um papel essencial nas instalações pneumáticas, garantindo a estabilidade e a eficiência do sistema. Além de armazenar o ar comprimido para suprir demandas instantâneas, flutuações e picos de carga, eles também contribuem para a coleta de condensado, melhorando a qualidade do ar e a vida útil dos equipamentos.

De acordo com a Atlas Copco (2015), um reservatório de ar atua como um amortecedor, equilibrando as variações de pressão geradas pelo compressor, auxiliando no resfriamento do ar e facilitando a remoção da umidade condensada. Além disso, os reservatórios permitem que os compressores operem de forma mais eficiente, reduzindo ciclos de acionamento e desligamento, o que otimiza o consumo de energia e prolonga a vida útil do equipamento.

A Ar Comprimido (2022) destaca que os reservatórios de ar comprimido desempenham diversas funções, como:

- Regular as variações de pressão do sistema, evitando oscilações prejudiciais;

- Armazenar ar comprimido para equilibrar a demanda e o consumo;
- Atuar na troca de calor, reduzindo a temperatura do ar comprimido;
- Aumentar os intervalos entre ciclos de carga e alívio do compressor;
- Facilitar a remoção do condensado acumulado após a compressão.

Além disso, os reservatórios auxiliam na dissipação do calor gerado durante a compressão do ar. Esse calor é transferido para o ambiente ao redor do reservatório, resfriando o ar interno e favorecendo a condensação da umidade presente. Para garantir o desempenho ideal do sistema, é essencial realizar a drenagem contínua do condensado, prevenindo o acúmulo de umidade nas tubulações e evitando danos aos equipamentos pneumáticos.

Em instalações mais complexas, onde há grandes variações de demanda, pode ser necessário utilizar múltiplos reservatórios estrategicamente posicionados. Recomenda-se instalá-los em locais frescos, onde a precipitação de condensado seja mais eficiente, reduzindo a necessidade de equipamentos adicionais para remoção da umidade.

Portanto, um sistema bem projetado, com reservatórios adequadamente dimensionados e posicionados, é fundamental para garantir eficiência energética, segurança operacional e maior longevidade dos componentes pneumáticos.

2.8 REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Num contexto industrial, a rede de ar comprimido desempenha um papel crucial no transporte do ar gerado, seja de uma unidade central ou de gerações isoladas, através das instalações. Essa rede engloba todas as tubulações que conectam os compressores, passando pelos secadores e reservatórios, e se interligam para conduzir o ar comprimido aos pontos individuais de uso.

Essa infraestrutura cumpre duas funções principais:

- Estabelecer a ligação entre a fonte de geração e os equipamentos consumidores.
- Servir como reservatório para atender às demandas locais.

De acordo com as diretrizes do Atlas Copco (2015), a concepção de uma rede de distribuição de ar comprimido deve priorizar três aspectos:

- Manter uma queda de pressão reduzida entre o compressor e o ponto de consumo.

- Minimizar vazamentos nas tubulações de distribuição.
- Garantir uma eficaz separação de condensado, especialmente se não houver um secador de ar comprimido instalado.

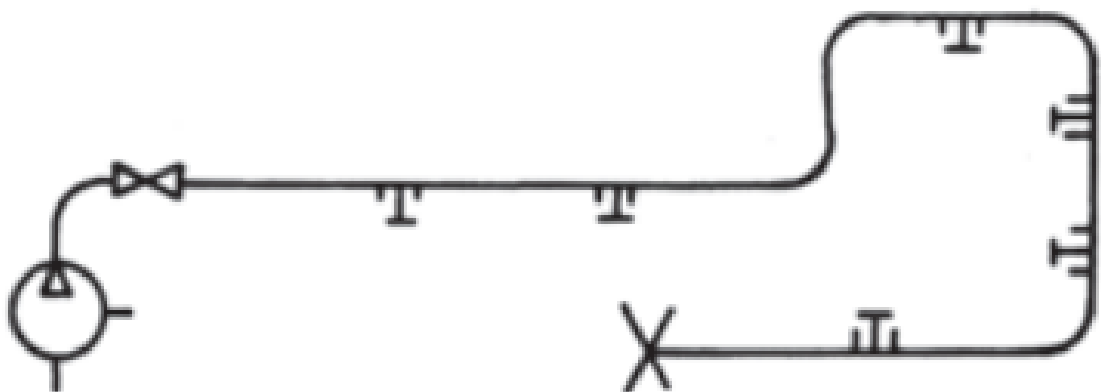
Esses requisitos são cruciais para garantir a eficiência, a confiabilidade e a segurança do sistema de ar comprimido, além de otimizar o desempenho dos equipamentos consumidores e diminuir os custos operacionais (ALVES, 2018; ZAPPELINI, 2008).

Quanto ao design da rede de ar comprimido, existem três configurações principais: circuito fechado, circuito aberto e circuito combinado.

2.8.1 Circuito aberto

Nesse tipo de configuração, o ar é produzido centralmente em uma unidade de compressão e distribuído diretamente aos pontos de uso, sem retorno ao ponto de origem, conforme ilustrado na figura 2. Esse sistema é geralmente mais simples e econômico de instalar, pois requer menos componentes de controle e tubulação. No entanto, os circuitos abertos podem apresentar maiores perdas de pressão em longas distâncias devido à dissipação de energia ao longo do percurso (PROCEL, 2009).

FIGURA 2 – CIRCUITO ABERTO



FONTE: PROCEL (2009)

2.8.2 Circuito fechado

O sistema de circuito fechado na distribuição de ar comprimido é caracterizado pela recirculação do ar exaurido de volta à unidade de compressão, formando um ciclo contínuo, conforme ilustrado na Figura 3. Essa abordagem oferece vantagens significativas em termos de eficiência energética, reduzindo as perdas de pressão ao reutilizar o ar comprimido. Além disso, permite a integração de sistemas de recuperação de calor, nos quais o calor gerado durante a compressão pode ser reaproveitado para aquecimento ou outras aplicações industriais. No entanto, a implementação de circuitos fechados exige um investimento inicial mais elevado, devido à necessidade de equipamentos adicionais, como válvulas de controle e sistemas de filtragem, que garantem a qualidade do ar reaproveitado (ZAPPELINI, 2008).

FIGURA 3 – CIRCUITO FECHADO

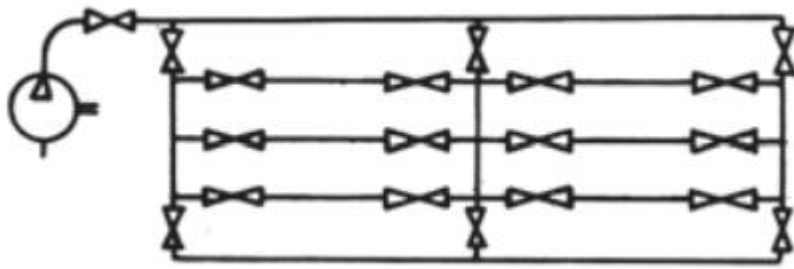


FONTE: PROCEL (2009)

2.8.3 Circuito combinado

Um sistema de rede de distribuição de ar comprimido combinado combina características de circuitos abertos e fechados como ilustrado na Figura 4, para otimizar a eficiência e a funcionalidade. Nesse tipo de configuração, algumas linhas de distribuição podem operar em circuito aberto, enquanto outras operam em circuito fechado, dependendo dos requisitos específicos de cada área ou aplicação. Isso permite uma maior flexibilidade e adaptação às necessidades variadas de diferentes processos industriais. No entanto, a implementação de um sistema combinado pode ser mais complexa e requer um planejamento cuidadoso para garantir a eficiência e a operação confiável (ALVES, 2018; TELES DE OLIVEIRA et al., 2020).

FIGURA 4 – CIRCUITO COMBINADO



FONTE: PROCEL (2009)

2.9 VAZAMENTOS

Os vazamentos de ar comprimido representam um desafio significativo em sistemas industriais, podendo constituir uma parcela considerável da demanda total de ar comprimido, variando de 10% a 40% (METALPLAN, 2020). Essas perdas são influenciadas pela configuração do sistema e pelos cuidados de manutenção adotados (OLESKO, 2013). O desgaste dos equipamentos e o mau uso do ar comprimido são as principais causas dessas perdas (METALPLAN, 2020).

Os sistemas de distribuição de ar comprimido podem ser configurados de diversas formas, geralmente utilizando conexões roscadas, flangeadas ou soldadas. As conexões roscadas e flangeadas são propensas a vazamentos ao longo do tempo devido à perda gradual de vedação, embora as perdas nos acoplamentos finais sejam mais significativas (OLESKO, 2013).

A corrosão também pode contribuir para vazamentos, tornando a substituição de tubos corroídos uma medida recomendável em termos de segurança e eficiência energética (METALPLAN, 2020). O uso de materiais ou montagens inadequados nas mangueiras também pode gerar vazamentos (OLESKO, 2013).

Os vazamentos são frequentemente observados nos acoplamentos entre equipamentos e tubulações. Todos os acessórios são conectados por meio de juntas de vedação, que, com o tempo, podem permitir escapamento de ar. Além disso, mangueiras podem furar ou trincar devido ao envelhecimento, enquanto conjuntos de filtro-regulador-lubrificador ou separadores de líquido podem apresentar vazamentos em várias partes (FREITAS, 2017).

Embora os vazamentos possam ocorrer em qualquer parte do sistema, áreas como acoplamentos, mangueiras, tubos, engates rápidos, FRLs, purgadores de condensado, válvulas e dispositivos de uso final são locais comuns de vazamento (FREITAS, 2017).

Os vazamentos de ar comprimido podem prejudicar as operações do sistema e aumentar os custos operacionais. A quantidade de ar perdido é influenciada pela pressão do sistema e pelo diâmetro do furo, sendo proporcional ao quadrado do diâmetro (METALPLAN, 2020). A falta de verificação e manutenção periódica das linhas de distribuição pode agravar ainda mais esses problemas (OLESKO, 2013).

Os manuais dos fabricantes oferecem orientações sobre os percentuais de vazamentos toleráveis com base na idade e conservação das instalações. Vazamentos de até 5% podem ser tolerados (ATLAS COPCO, 2020), mas é essencial implementar medidas de detecção e prevenção de vazamentos, como o uso de aparelhos de ultrassom e a inspeção visual com substâncias tensoativas (OLESKO, 2013).

2.9.1 Queda de pressão do ar comprimido

No contexto dos sistemas pneumáticos, a perda de pressão é uma preocupação fundamental, pois afeta diretamente o desempenho e a eficiência das ferramentas e equipamentos que dependem do ar comprimido (METALPLAN, 2020). Essa perda de energia ocorre devido à fricção do ar comprimido com as superfícies internas dos elementos do sistema, como tubulações, conexões e equipamentos (ATLAS COPCO, 2020).

A queda de pressão ao longo do circuito pneumático é um parâmetro crítico no dimensionamento do sistema e depende de diversos fatores, como o diâmetro e comprimento da tubulação, tipos de engates e conexões, e a quantidade e tipos de equipamentos instalados (OLESKO, 2013). É importante ressaltar que a queda de pressão não deve exceder limites específicos para garantir o funcionamento adequado do sistema. Por exemplo, em linhas com pressão nominal de 8 bar ou mais, a queda de pressão não deve ser superior a 0,1 bar. Para pressões nominais inferiores

a 8 bar, a queda de pressão admissível deve ser menor ou igual a 1,5% da pressão máxima do sistema (ATLAS COPCO, 2020).

As consequências da perda de pressão são significativas, especialmente para ferramentas pneumáticas e equipamentos industriais. Uma diminuição na pressão de alimentação pode reduzir drasticamente a eficiência desses equipamentos, afetando a produtividade e aumentando os custos de produção. Por exemplo, uma queda de pressão de 6 para 5 bar pode diminuir a potência da ferramenta em 25%, enquanto uma queda para 4 bar pode reduzir a potência em 49% (METALPLAN, 2020).

Existem várias causas para a perda de pressão em sistemas pneumáticos, incluindo vazamentos, filtros entupidos, válvulas quebradas e condensado obstruindo as linhas (FREITAS, 2017). Vazamentos e filtros entupidos podem ser resolvidos com manutenção regular e inspeções periódicas do sistema (OLESKO, 2013). No entanto, o subdimensionamento das linhas de distribuição ou aumentos na demanda podem ser causas mais complexas e exigem uma análise mais detalhada do sistema para solucionar o problema (OLESKO, 2013).

2.10 DETECTOR ULTRASSÔNICO

A detecção de vazamentos em sistemas de ar comprimido pode ser realizada com o uso de equipamentos baseados em tecnologia ultrassônica. Esses dispositivos operam emitindo ondas sonoras de alta frequência (acima de 20 kHz), que são inaudíveis ao ouvido humano, direcionadas para os componentes do sistema, como tubulações, válvulas, conexões e outros pontos críticos.

Segundo o manual do equipamento Locator, tais dispositivos operam com uma “frequência da resposta de 20 a 100 kHz” (LOCATOR, [s.d.], p. 1). Quando as ondas ultrassônicas encontram um vazamento, ocorre uma turbulência no fluxo de ar, que por sua vez gera vibrações nas superfícies próximas ao ponto de escape. Um sensor altamente sensível capta essas vibrações e as converte em sinais elétricos. Esses sinais são amplificados e processados para facilitar a interpretação pelo operador.

A fim de garantir precisão na detecção, o equipamento possui filtros eletrônicos que eliminam ruídos de fundo e outras interferências externas. Isso permite ao sistema

focar apenas nas frequências características dos vazamentos, aumentando a confiabilidade do processo de identificação.

A Figura 5 ilustra um modelo típico de detector ultrassônico de vazamentos utilizado na inspeção de sistemas de ar comprimido.

FIGURA 5 – DETECTOR ULTRASSÔNICO



FONTE: Jorc (2024)

Após o processamento, o equipamento fornece ao operador indicações visuais ou sonoras sobre a presença e a intensidade do vazamento. De acordo com o fabricante, o equipamento oferece “indicação visual e sonora de fugas de ar audível a grande distância (aprox. 10 metros)” (LOCATOR, [s.d.], p. 1).

Além disso, alguns modelos avançados têm a capacidade de estimar a taxa de vazamento com base na intensidade dos sinais ultrassônicos detectados, o que contribui para um diagnóstico mais detalhado e para a priorização de ações corretivas no sistema.

2.11 QUEDA DE PRESSÃO DO AR COMPRIMIDO

No contexto dos sistemas pneumáticos, a perda de pressão é uma preocupação fundamental, pois afeta diretamente o desempenho e a eficiência das ferramentas e equipamentos que dependem do ar comprimido (METALPLAN, 2020). Essa perda de energia ocorre devido à fricção do ar comprimido com as superfícies internas dos elementos do sistema, como tubulações, conexões e equipamentos (ATLAS COPCO, 2020).

A queda de pressão ao longo do circuito pneumático é um parâmetro crítico no dimensionamento do sistema e depende de diversos fatores, como o diâmetro e comprimento da tubulação, tipos de engates e conexões, e a quantidade e tipos de equipamentos instalados (OLESKO, 2013). É importante ressaltar que a queda de pressão não deve exceder limites específicos para garantir o funcionamento adequado do sistema. Por exemplo, em linhas com pressão nominal de 8 bar ou mais, a queda de pressão não deve ser superior a 0,1 bar. Para pressões nominais inferiores a 8 bar, a queda de pressão admissível deve ser menor ou igual a 1,5% da pressão máxima do sistema (ATLAS COPCO, 2020).

As consequências da perda de pressão são significativas, especialmente para ferramentas pneumáticas e equipamentos industriais. Uma diminuição na pressão de alimentação pode reduzir drasticamente a eficiência desses equipamentos, afetando a produtividade e aumentando os custos de produção. Por exemplo, uma queda de pressão de 6 para 5 bar pode diminuir a potência da ferramenta em 25%, enquanto uma queda para 4 bar pode reduzir a potência em 49% (METALPLAN, 2020).

Existem várias causas para a perda de pressão em sistemas pneumáticos, incluindo vazamentos, filtros entupidos, válvulas quebradas e condensado obstruindo as linhas (FREITAS, 2017). Vazamentos e filtros entupidos podem ser resolvidos com manutenção regular e inspeções periódicas do sistema (OLESKO, 2013). No entanto, o subdimensionamento das linhas de distribuição ou aumentos na demanda podem ser causas mais complexas e exigem uma análise mais detalhada do sistema para solucionar o problema (OLESKO, 2013).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAL DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

O experimento foi realizado em um abatedouro de aves localizado no oeste do Paraná. A planta conta com cinco linhas de distribuição de ar comprimido que atendem a todo o complexo industrial. Todas essas linhas operam em um sistema de circuito aberto.

Atualmente, o sistema é composto por sete compressores todos são de deslocamento positivo, cujas informações como modelo, potência e pressão máxima de operação estão descritas no Quadro 1. Juntos, esses compressores fornecem uma capacidade total de aproximadamente 18 m³/min de ar comprimido.

QUADRO 1 – DADOS DOS COMPRESSORES

EQUIPAMENTO	POTÊNCIA	CAPACIDADE	PRESSAO MAXIMA
1 - ATLAS COPCO GA-90 VSD FF175	125 CV	1051 m ³ /h	12 Bar
2 – ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100 CV	819 m ³ /h	8.9 Bar
3 – ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100 CV	819 m ³ /h	7.2 Bar
4 – ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100 CV	765 m ³ /h	7.2 Bar
5 – ATLAS COPCO GA- 75 VSD A FF	100 CV	880 m ³ /h	12 Bar
6 – ATLAS COPCO GA 160 A FF 380V	200 CV	1600 m ³ /h	12 Bar
7 – ATLAS COPCO GA-90 FF125	125 CV	961 m ³ /h	8,9 Bar

FONTE:O Autor (2025)

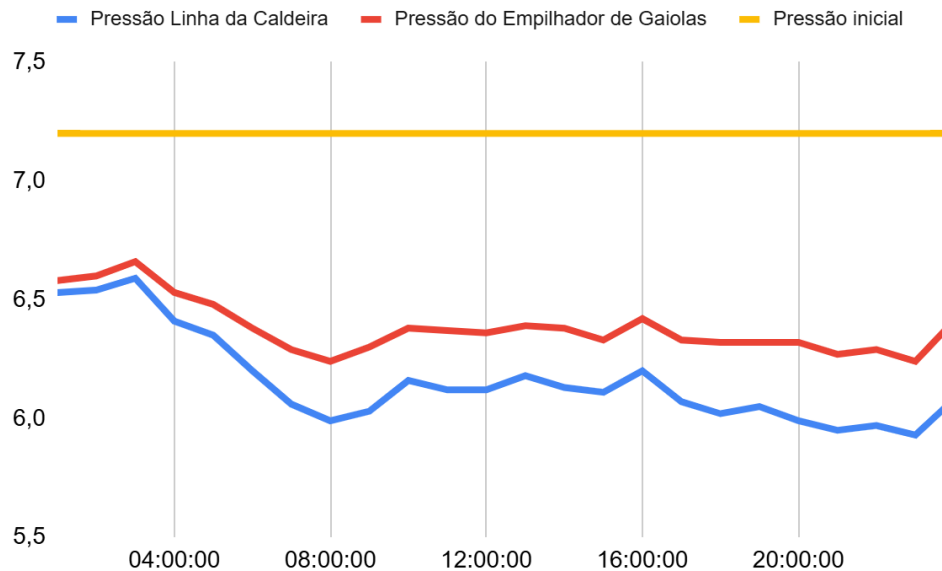
3.2 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO ANALISADAS

A análise de vazamentos foi realizada em toda a planta industrial, abrangendo todos os setores alimentados pelo sistema de ar comprimido. No entanto, para a análise detalhada das perdas de carga, foram selecionadas duas linhas críticas de distribuição, com base na relevância operacional e nos indícios de maior queda de pressão identificados nas medições preliminares:

- **Linha 1:** Abastecimento do empilhador de gaiolas responsável pelo fornecimento de ar comprimido para movimentação pneumática no setor de carga de aves.
- **Linha 2:** Alimentação da caldeira industrial utilizada para acionamento de válvulas e sistemas de automação no setor térmico.

A escolha dessas linhas se baseou nos dados obtidos no Gráfico 1, que apontou quedas de pressão superiores a 1,0 bar nesses trechos valor acima do limite recomendado pela Atlas Copco para sistemas operando a 7,2 bar.

GRÁFICO 1 – COMPATIVO ENTRE PRESSÃO DE SAÍDA E PRESSÃO DE CHEGADA



FONTE: O Autor (2025)

3.3 MONITORAMENTO OPERACIONAL DOS COMPRESSORES

Para entender a dinâmica de funcionamento do sistema, foi realizado o monitoramento do desempenho dos compressores durante um período de 15 dias úteis. As coletas de dados ocorreram em três horários distintos: 9h, 15h e 21h. Foram registrados os compressores em operação e suas respectivas cargas. O objetivo foi verificar variações na demanda de ar comprimido ao longo do dia e comparar os resultados antes e depois da implementação das ações corretivas.

3.4 LEVANTAMENTO DE VAZAMENTOS

O levantamento de vazamentos foi conduzido durante os finais de semana, quando a planta estava fora de operação produtiva. O sistema foi mantido pressurizado a 7,2 bar para que fosse possível identificar vazamentos com precisão. Utilizou-se o detector ultrassônico Locator da marca Jorc, que capta frequências acústicas geradas pela turbulência do ar comprimido em pontos de fuga.

O levantamento foi feito setor por setor. A partir dos sinais detectados, o software do equipamento estimou a vazão perdida em m³/h para cada vazamento identificado. Esses dados permitiram o planejamento das intervenções corretivas, que incluíram:

- Troca de mangueiras danificadas;
- Substituição de conexões e engates rápidos;
- Reparo ou troca de reguladores de pressão e filtros.

3.5 CÁLCULO DE CONSUMO ESPECÍFICO E CUSTO ANUAL DE VAZAMENTOS

Foi utilizado como referência o compressor GA-75 VSD+ FF da Atlas Copco, que possui potência nominal de 75 kW e vazão de 880 m³/h. Assim, o consumo específico foi calculado como:

Equação 1 – Consumo específico de energia

$$\text{Consumo Específico} = \frac{\text{Potência (kW)}}{\text{Vazão (m}^3/\text{h)}} = \frac{75}{880} \approx 0,085 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

A energia anual desperdiçada foi estimada com base na vazão total de vazamentos, multiplicada pelo número de horas anuais de operação. Considerou-se uma operação contínua de 24 horas por dia, durante 365 dias por ano (totalizando 8.760 horas/ano)

Equação 2 – Cálculo da energia anual desperdiçada

$$\text{Energia (kWh)} = \text{Vazão (m}^3/\text{h)} \times \text{Consumo Específico (kWh/m}^3) \times \text{hora} \times \text{Dia}$$

O custo anual foi calculado multiplicando-se a energia perdida pelo valor da tarifa de energia elétrica local (R\$ 0,43/kWh):

Equação 3 – Cálculo do custo anual com desperdício de energia

$$\text{Custo (/ano)} = \text{Energia (kWh/ano)} \times \text{Preço do kWh}$$

Além disso, para os trechos da rede que não são abastecidos por compressores dedicados, adotou-se um modelo de potência proporcional. Essa potência foi estimada por meio de uma regra de três baseada na vazão da linha analisada em relação à vazão total de um compressor de 100 cv (equivalente a

aproximadamente 880 m³/h), conforme definido na Equação 4 – Potência proporcional estimada:

Equação 4 – Potência proporcional estimada

$$P_{Comp} = \frac{Q_{Setor}}{Q_{total}} \times P_{total} =$$

- P_{Comp} : Potência proporcional estimada (kW)
- Q_{Setor} : Vazão da linha específica (m³/h)
- Q_{total} : Vazão total do compressor (m³/h)
- P_{Total} : Potência total do compressor (kW)

Com a potência proporcional estimada, o consumo energético anual de cada setor foi calculado conforme a Equação 5 – Consumo anual de energia elétrica:

Equação 5 – Consumo anual de energia elétrica:

$$E_{Total} = P_{Comp} \times h \times d =$$

- E_{Total} : Energia anual (kWh/ano)
- P_{Comp} : Potência proporcional (kW)
- h: Horas operação
- d: dias de operação

Por fim, estimou-se a energia desperdiçada pela perda de carga com base na razão entre a perda de pressão em um trecho e a pressão de operação do sistema, conforme a Equação 6 – Energia desperdiçada devido à perda de carga:

Equação 6 – Energia desperdiçada devido à perda de carga:

$$E_{perdida} = E_{Total} \times \frac{\Delta p}{p} =$$

- $E_{perdida}$: Energia desperdiçada (kWh/ano)
- Δp : Perda de pressão (bar)
- p: Pressão de operação do sistema (bar)

3.6 ANÁLISE DA PERDAS DE CARGA NAS LINHAS

Foram utilizados manômetros digitais instalados nas extremidades das duas linhas para mensuração da pressão. A pressão de saída da sala de compressores foi de 7,2 bar. As perdas de carga foram obtidas pela diferença entre essa pressão de saída e a pressão medida nos pontos de uso de cada linha.

3.7 CÁLCULO DA PERDA DE PRESSÃO

A perda de carga foi calculada com base na equação empírica fornecida pela empresa Atlas Copco. Essa equação foi utilizada para determinar a perda de pressão ao longo de um sistema de tubulação, levando em consideração o a vazão volumétrica de ar, o comprimento e o diâmetro interno do tubo, a pressão inicial e a quebra de pressão.

Equação 7 – Cálculo da perda de carga (Atlas Copco)

$$\Delta p = 450 \cdot \frac{q_c^{1,85} \cdot l}{d^5 \cdot p}$$

Aonde

q_c =Fluxo de ar [l/s]

l =Comprimento de tubo [m]

d = Diâmetro interno do tubo [mm]

p =Pressão absoluta inicial [bar]

Δp = Quebra de pressão [bar]

Além do comprimento real da tubulação, foi considerado o comprimento equivalente gerado por conexões como curvas, válvulas e tês, que também causam perdas. Esses valores foram obtidos a partir de uma tabela de componentes e somados ao comprimento físico da linha.

Equação 8 – Comprimento total da tubulação com perdas localizadas

$$L_{total} = L_{fisico} + \sum L_{eq}$$

Onde:

L_{fisico} = Comprimento real da tubulação (m)

ΣL_{eq} = Soma dos comprimentos equivalentes de todos os acessórios (m)

A Figura 6 ilustra os comprimentos equivalentes adotados para cada tipo de acessório. O valor final de L_{total} foi utilizado nos cálculos de perda de carga de cada trecho da rede.

FIGURA 6 - COMPRIMENTO DE TUBO EQUIVALENTE

CONEXÃO		Diâmetro nominal X Equivalência em metros de canalização									
		MATERIAL	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"
Curva 90°		PVC	0,5	0,6	0,7	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,9
		Metál	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,3	1,6	2,1
Curva 45°		PVC	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
		Metál	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
Joelho 90°		PVC	1,2	1,5	2,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,3	4,9
		Metál	0,7	0,8	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	3,4	4,2
Joelho 45°		PVC	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	2,5
		Metál	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,2	1,5	1,9
Tê de passagem direta		PVC	0,8	0,9	1,5	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	3,3
		Metál	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	2,1	2,7
Tê de saída lateral		PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
		Metál	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
Tê de saída bilateral		PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
		Metál	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
União		PVC	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,25
		Metál	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
Saída de canalização		PVC	0,9	1,3	1,4	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,9
		Metál	0,5	0,7	0,9	1,0	1,5	1,9	2,2	3,2	4,0
Luva de redução (")		PVC	0,3	0,2	0,15	0,4	0,7	0,8	0,85	0,95	1,2
		Aço	0,29	0,16	0,12	0,38	0,64	0,71	0,78	0,9	1,07
Registro de gaveta ou esfera aberto		PVC	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1
		Metál	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9
Registro de globo aberto		Metál	6,7	8,2	11,3	13,4	17,4	21,0	26,0	34,0	43,0
Registro de ângulo aberto		Metál	3,6	4,6	5,6	6,7	8,5	10,0	13,0	17,0	21,0
Válvula de pé com crivo		PVC	9,5	13,3	15,3	18,3	23,7	25,0	26,8	28,8	37,4
		Metál	5,6	7,3	10,0	11,6	14,0	17,0	22,0	23,0	30,0
Válvula de Retenção	Horizontal 	Metál	1,6	2,1	2,7	3,2	4,2	5,2	6,3	6,4	10,4
	Vertical 	Metál	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4	8,1	9,7	12,9	16,1

Fonte: Schneider (2006)

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 VAZAMENTOS NO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

Conforme descrito na metodologia, foi realizado um levantamento do consumo de ar comprimido com base na capacidade volumétrica (em m³/h) utilizada em três horários distintos previamente definidos: 9h, 15h e 21h. Os dados coletados, referentes ao ano de 2021, estão organizados nos Quadros 1, 2 e 3. O Quadro 1 – Consumo estimado de ar comprimido às 9h apresenta os dados referentes ao início da jornada de trabalho, quando o consumo começa a se elevar. Já o Quadro 2 – Consumo estimado de ar comprimido às 15h mostra o comportamento do sistema no período da tarde, que geralmente representa o pico de produção. Por fim, o Quadro 3 – Consumo estimado de ar comprimido às 21h evidencia a demanda no final do turno, quando o consumo tende a se estabilizar ou reduzir.

QUADRO 2– CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 9h

Compressores	P (CV)	m³/h	Data															
			15/08	16/08	17/08	18/08	19/08	22/08	23/08	24/08	25/08	26/08	29/08	30/08	31/08	01/09	02/09	
1 - ATLAS COPCO GA-90 VSD FF175	125	1051	80%	100%	100%	80%	80%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90%	90%	
2 - ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	
3- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	
4- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	765	100%	80%	80%	90%	100%	90%	80%	80%	90%	95%	100%	100%	100%	90%	90%	
5 - ATLAS COPCO GA- 75 VSD A FF	100	880	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
6 - ATLAS COPCO GA 160 A FF	200	1600	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
7 - ATLAS COPCO GA-90 FF125	125	961	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

FONTE:O Autor (2025)

QUADRO 3 – CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 15h

Compressores	P (CV)	m³/h	Data															
			15/08	16/08	17/08	18/08	19/08	22/08	23/08	24/08	25/08	26/08	29/08	30/08	31/08	01/09	02/09	
1 - ATLAS COPCO GA-90 VSD FF175	125	1051	80%	100%	100%	80%	80%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90%	90%	
2 - ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
3- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
4- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	765	100%	80%	80%	90%	100%	90%	80%	80%	90%	95%	100%	100%	100%	90%	90%	
5 - ATLAS COPCO GA- 75 VSD A FF	100	880	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
6 - ATLAS COPCO GA 160 A FF	200	1600	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
7 - ATLAS COPCO GA-90 FF125	125	961	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

FONTE:O Autor (2025)

QUADRO 4 – CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 21h

Compressores	P (CV)	m³/h	Data															
			15/08	16/08	17/08	18/08	19/08	22/08	23/08	24/08	25/08	26/08	29/08	30/08	31/08	01/09	02/09	
1 - ATLAS COPCO GA-90 VSD FF175	125	1051	80%	100%	100%	80%	80%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90%	90%	
2 - ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	
3- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	
4- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	765	100%	80%	80%	90%	100%	90%	80%	80%	90%	95%	100%	100%	100%	90%	90%	
5 - ATLAS COPCO GA- 75 VSD A FF	100	880	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
6 - ATLAS COPCO GA 160 A FF	200	1600	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
7 - ATLAS COPCO GA-90 FF125	125	961	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

FONTE:O Autor (2025)

Após essa etapa, foi iniciada uma análise técnica de detecção de vazamentos na rede de ar comprimido, que identificou um número expressivo de 272 pontos de vazamento em diversas áreas do abatedouro de aves. Os dados revelaram que esses vazamentos geravam um desperdício de aproximadamente 1.565,7 m³/h de ar comprimido, representando um impacto significativo na eficiência do sistema.

O Quadro 5 apresenta os dados organizados por setor, com estimativas do volume de ar perdido, da energia elétrica consumida inutilmente para gerar esse ar, e do custo financeiro anual associado ao desperdício. Os setores Linha 2, Paletização e Sangria/Evisceração concentraram os maiores volumes de perda.

QUADRO 5 – QUANTIFICAÇÃO DE VAZAMENTOS IMPACTO ENERGÉTICO POR SETOR

SETOR	QUANTIDADE VAZAMENTO	VOLUME (m³/h)	Energia (kWh)	Custo (kwh/ano)
Sala do robô/ Antessala robô	9	37,57	27.897,98	R\$ 11.996,13
Pendura	30	148,33	110.143,92	R\$ 47.361,89
Sangria/ Evisceração	31	226,78	168.397,76	R\$ 72.411,04
Fábrica de subproduto	10	74,97	55.669,72	R\$ 23.937,98
Caldeira	15	84,66	62.865,13	R\$ 27.032,01
Paletização	78	437,49	324.862,57	R\$ 139.690,91
Linha 1	18	96,56	71.701,59	R\$ 30.831,69
Linha 2	81	459,34	341.087,51	R\$ 146.667,63
TOTAL	272	1565,7	1.162.626,19	R\$ 499.929,26

FONTE:O Autor (2025)

Esse desperdício representa uma ineficiência energética crítica, não apenas pelo custo financeiro direto, mas também pelos impactos indiretos, como o desgaste acelerado dos compressores e a maior exigência operacional sobre o sistema.

Após a execução dos reparos, que incluíram a troca de mangueiras, conexões e reguladores, um dos compressores (modelo GA-90, com capacidade de 1.051 m³/h) pôde ser desligado sem comprometer o desempenho da rede. Essa melhoria é evidenciada nos dados apresentados no Quadro 5 – Comparativo do consumo de ar comprimido antes e depois das melhorias às 9h, que demonstra a redução da demanda logo no início da jornada de trabalho. O Quadro 6 – Comparativo do consumo de ar comprimido às 15h mostra o impacto das intervenções durante o horário de pico operacional, enquanto a Quadro 7– Comparativo do consumo às 21h ilustra os resultados no período noturno, com tendência à estabilização do consumo. Esses comparativos reforçam a efetividade das ações implementadas e a possibilidade de desligamento de um dos compressores sem prejuízo à operação.

QUADRO 5 – CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 9h POS REPAROS DOS VAZAMENTOS

Compressores	P (CV)	m³/h	Data															
			15/08	16/08	17/08	18/08	19/08	22/08	23/08	24/08	25/08	26/08	29/08	30/08	31/08	01/09	02/09	
1 - ATLAS COPCO GA-90 VSD FF175	125	1051	90%	100%	100%	90%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	90%	
2 - ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
3- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
4- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	765	100%	90%	90%	90%	100%	90%	90%	90%	90%	95%	100%	100%	100%	95%	90%	
5 - ATLAS COPCO GA- 75 VSD A FF	100	880	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
6 - ATLAS COPCO GA 160 A FF	200	1600	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
7 - ATLAS COPCO GA-90 FF125	125	961	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

FONTE:O Autor (2025)

QUADRO 6 – CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 15h REPAROS DOS VAZAMENTOS

Compressores	P (CV)	m³/h	Data															
			15/08	16/08	17/08	18/08	19/08	22/08	23/08	24/08	25/08	26/08	29/08	30/08	31/08	01/09	02/09	
1 - ATLAS COPCO GA-90 VSD FF175	125	1051	95%	100%	100%	95%	95%	100%	100%	95%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	100%	
2 - ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
3- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
4- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	765	100%	95%	95%	100%	100%	90%	90%	100%	90%	95%	100%	100%	100%	95%	100%	
5 - ATLAS COPCO GA- 75 VSD A FF	100	880	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
6 - ATLAS COPCO GA 160 A FF	200	1600	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
7 - ATLAS COPCO GA-90 FF125	125	961	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

FONTE:O Autor (2025)

QUADRO 7 – CARGA DOS COMPRESSORES ÀS 21h POS REPAROS DOS VAZAMENTOS

Compressores	P (CV)	m³/h	Data															
			15/08	16/08	17/08	18/08	19/08	22/08	23/08	24/08	25/08	26/08	29/08	30/08	31/08	01/09	02/09	
1 - ATLAS COPCO GA-90 VSD FF175	125	1051	100%	100%	100%	95%	95%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	100%	
2 - ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
3- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	819	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
4- ATLAS COPCO GA-75 125 FF	100	765	100%	95%	95%	95%	100%	95%	100%	95%	95%	95%	100%	100%	100%	100%	100%	
5 - ATLAS COPCO GA- 75 VSD A FF	100	880	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
6 - ATLAS COPCO GA 160 A FF	200	1600	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
7 - ATLAS COPCO GA-90 FF125	125	961	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

FONTE:O Autor (2025)

Com a retirada de operação do compressor de 1.051 m³/h, estimou-se uma economia energética anual real de R\$ 335.585,14.

O investimento total no projeto foi de R\$ 41.044,80, considerando:

R\$ 14.000,00 pelo levantamento de vazamentos (6 dias a R\$ 2.333,33/dia);

R\$ 5.000,00 com mão de obra especializada para os reparos;

R\$ 22.044,80 em materiais (mangueiras, conexões, filtros, reguladores etc.).

Embora o ganho real tenha sido inferior à estimativa inicial apresentada na Quadro 5 (R\$ 499.929,26), tal diferença deve-se à impossibilidade de reparo de todos os vazamentos identificados. Fatores como indisponibilidade de peças ou impossibilidade de parada de equipamentos limitaram as ações.

Além da economia de energia, destaca-se o impacto positivo na confiabilidade operacional, uma vez que anteriormente a planta contava com apenas um compressor de reserva. Com a redução dos vazamentos, o sistema passou a operar com maior estabilidade e segurança.

A maioria dos vazamentos estava concentrada em mangueiras e engates rápidos componentes de baixo custo que, sem manutenção preventiva, tendem a se deteriorar rapidamente. A substituição desses elementos mostrou-se essencial para o sucesso do projeto, reforçando a importância da criação de um programa contínuo de inspeção e manutenção preventiva do sistema pneumático industrial.

4.2 PERDA DE CARGA

A análise das perdas de carga concentrou-se em duas linhas críticas da planta: a linha que abastece o empilhador de gaiolas e a que atende à caldeira industrial.

Diante desse cenário, foi realizado um levantamento técnico detalhado das duas tubulações, contemplando informações como o comprimento total, os diâmetros

nominais e os tipos de conexões utilizadas. Esses dados estão organizados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

TABELA 1 – DADOS DA LINHA DO EMPILHADOR DE GAIOLAS

Item	quantidade/valor	Unidade
Cotovelo 90°	13	Unidade
Redução 2" para ¾"	4	Unidade
Registro Globo	4	Unidade
Comprimento Físico	179,5	metros
Diâmetro	50,8	milímetros
Vazão	630	m³/h
Pressão média na chegada	6,13	bar

FONTE:O Autor (2025)

TABELA 2 – DADOS DA LINHA DA CALDEIRA

Categoria	Descrição	Valor	Unidade
Tubulação – Trecho 1	Comprimento	126,65	metros
	Diâmetro	50,8	mm
	Vazão	819	m³/h
Tubulação – Trecho 2	Comprimento	40,52	metros
	Diâmetro	25,4	mm
	Vazão	90	m³/h
Tubulação – Trecho 3	Comprimento	125,00	metros
	Diâmetro	19	mm
	Vazão	30	m³/h
Pressões	Pressão de saída da sala de máquinas	7,2	bar
	Pressão média de chegada à caldeira	5,6	bar
Conexões (50,8 mm)	Cotovelo 90°	2	unidades
	Luva de redução	7	unidades
	Registro Globo	1	unidades
	Tê de saída bilateral	9	unidades
Conexões (25,4 mm)	Cotovelo 90°	1	unidade
	Registro Globo	1	unidade
	Tê de saída bilateral	1	unidade
	Luva de redução	1	unidade
Conexões (19 mm)	Cotovelo 90°	2	unidades
	Registro Globo	1	unidade
	Tê de saída bilateral	1	unidade

FONTE: O Autor (2025)

4.2.1 Cálculo do comprimento equivalente

Para a análise da perda de carga nas linhas de ar comprimido, foi calculado o comprimento total equivalente das tubulações, considerando tanto o comprimento

físico quanto os efeitos das conexões, com base nos valores de perdas localizadas apresentados na Figura 6.

4.2.1.1 Linha do Empilhador de Gaiolas

Com base nos dados levantados e nas conexões presentes na linha, foi determinado o comprimento equivalente de cada componente conforme a Tabela 3.

TABELA 3 – COMPRIMENTO EQUIVALENTE DA LINHA DO EMPILHADOR DE GAIOLAS

Item	Quantidade	Comprimento Equivalente	Comprimento Equivalente Total
Cotovelo 90°	13	3 m	39 m
Luva de Redução	4	0,64 m	2,56 m
Registro Globo	4	17,4	69,6 m
Total			111,16 m

FONTE:O Autor (2025)

A partir desses dados, foi aplicado o cálculo descrito na Equação 5 – Comprimento total da tubulação com perdas localizadas. obteve-se o comprimento total equivalente da tubulação que abastece o empilhador de gaiolas:

Equação 7 – Comprimento total da tubulação com perdas localizadas

$$L_{total} = 179,5 + 111,16$$

$$L_{total} = 290,66 \text{ m}$$

Esse valor foi utilizado nas equações de perda de carga para quantificar o impacto da resistência ao escoamento ao longo da linha. Vale destacar que a elevada contribuição dos registros globo, que sozinhos adicionam mais de 69 metros equivalentes, demonstra a importância de avaliar criticamente a escolha dos dispositivos instalados no sistema.

4.2.1.2 linha da caldeira

Inicialmente, identificaram-se os diferentes tipos de conexões presentes em cada trecho da linha, classificando-as de acordo com o diâmetro nominal das tubulações neste caso, 50,8 mm (2"), 25,4 mm (1") e 19 mm (3/4").

A seguir, foram atribuídos os respectivos valores de comprimento equivalente para cada tipo de conexão, conforme os dados de perda de carga localizada apresentados na Figura 6. Os produtos entre a quantidade de cada conexão e seu respectivo valor de comprimento equivalente estão detalhados na Tabela 4, que apresenta a soma das contribuições individuais para cada diâmetro:

TABELA 4 – COMPRIMENTO EQUIVALENTE DAS CONEXOES DA LINHA DA CALDEIRA

	Item	Quantidade	Comprimento Equivalente	Comprimento Equivalente Total
Conexões (50,8 mm)	Curva 90°	2	0,9	1,8
	Luva de redução	7	0,64	4,48
	Registro Globo	1	17,4	17,4
	Tê saída bilateral	9	3,5	31,5
Conexões (25,4 mm)	Curva 90°	1	0,5	0,5
	Tê saída bilateral	1	1,7	1,7
	Registro Globo	1	8,2	8,2
	Luva de redução	1	0,16	0,16
Conexões (19 mm)	curva 90°	2	0,5	1
	Registro Globo	1	6,7	6,7
	Tê saída bilateral	1	1,4	1,4

FONTE:O Autor (2025)

Com base nos valores apresentados na Tabela 4, foram calculados os comprimentos equivalentes totais para cada trecho. Para isso, aplicou-se a Equação 5, que considera as perdas localizadas na tubulação.

Equação 7 – Comprimento total da tubulação com perdas localizadas

Setor 1:

$$L_{total} = 126,65 + 55,18$$

$$L_{total} = 181,83 \text{ m}$$

Setor 2:

$$L_{total} = 40,52 + 10,56$$

$$L_{total} = 51,08 \text{ m}$$

Setor 3:

$$L_{total} = 125,00 + 10,56$$

$$L_{total} = 134,1 \text{ m}$$

4.2.2 Cálculo da queda de pressão do Empilhador de Gaiolas

Com base nos dados apresentados na Tabela 1, a linha de ar comprimido do empilhador de gaiolas apresenta uma vazão de 630 m³/h, equivalente a 175 L/s. A tubulação possui diâmetro interno de 50,8 mm, com comprimento equivalente de 290,66 m e opera sob uma pressão média de 7,2 bar.

Substituindo esses dados na Equação da Atlas Copco (já apresentada na seção de Metodologia), obtém-se uma perda de carga de:

$$\Delta p = 0,758 \text{ bar}$$

Considerando que, na prática industrial, o sistema de ar comprimido não é alimentado exclusivamente por um compressor dedicado a essa única linha, utilizou-se como referência um compressor com potência nominal de 100 cv (cavalos-vapor), capaz de gerar aproximadamente 880 m³/h de ar comprimido. Por meio de uma regra de três simples, estimou-se a potência proporcional necessária para atender à linha analisada, que consome 630 m³/h conforme a Equação 4 – Potência proporcional estimada

Equação 4 – Potência proporcional estimada:

$$P_{Comp} = \frac{630}{880} \times 100 = 71,59 \text{ CV} = 52,64 \text{ kW}$$

Considerando um regime de operação contínuo, com funcionamento 24 horas por dia durante 364 dias por ano, a energia elétrica total consumida anualmente pelo compressor pode ser estimada pela Equação 5 – Consumo anual de energia elétrica:

Equação 5 – Consumo anual de energia elétrica:

$$E_{Total} = 53 \times 364 \times 24 = 463.008 \text{ kWh/ano}$$

A partir desse valor, calcula-se o desperdício energético anual decorrente da perda de carga, utilizando-se a Equação 6 – Energia desperdiçada devido à perda de carga:

Equação 6 – Energia desperdiçada devido à perda de carga:

$$E_{perdida} = 463.008 \times \frac{0,758}{7,2} = 48.744,45 \text{ kWh/ano}$$

Considerando um custo médio da energia elétrica de R\$ 0,43/kWh, o prejuízo econômico anual associado a esse desperdício energético pode ser calculado pela Equação 3 – Custo anual com desperdício de energia:

Equação 3 – Custo anual com desperdício de energia:

$$C_{perda} = 48.744,45 \times 0,43 = \text{R\$ } 20.960,11 \text{ por ano}$$

4.2.3 Cálculo da Perda de Pressão – Linha da Caldeira (Setorizado)

A linha de alimentação de ar comprimido da caldeira industrial é constituída por três trechos distintos, cada um com características específicas de diâmetro, vazão e comprimento equivalente. Para avaliar a eficiência do sistema, foram calculadas as perdas de carga em cada setor da tubulação, seguidas da quantificação do desperdício energético e da análise do impacto econômico associado.

A estimativa da perda de carga foi realizada com base na Equação 4– Cálculo da perda de carga em sistemas de ar comprimido, amplamente aplicada em análises de sistemas pneumáticos:

Setor 1:

- Vazão: $819 \text{ m}^3/\text{h} = 227,5 \text{ L/s}$
- Diâmetro: 50,8 mm (2")
- Comprimento equivalente: 181,83 m

- Pressão média: 7,2 bar

$$\Delta p_1 = 450 \cdot \frac{227,5^{1,85} \cdot 181,83}{50,8^5 \cdot 7,2} = 0,77 \text{ bar}$$

Setor 2:

- Vazão: 90 m³/h = 25 L/s
- Diâmetro: 25,4 mm (1")
- Comprimento equivalente: 40,52 m
- Pressão média: 7,2 bar

$$\Delta p_2 = 450 \cdot \frac{25^{1,85} \cdot 51,08}{25,4^5 \cdot 7,2} = 0,118 \text{ bar}$$

Setor 3:

- Vazão: 30 m³/h = 8,33 L/s
- Diâmetro: 19 mm (3/4")
- Comprimento equivalente: 125,0 m
- Pressão média: 7,2 bar

$$\Delta p_3 = 450 \cdot \frac{8,33^{1,85} \cdot 134,1}{19^5 \cdot 7,2} = 0,170 \text{ bar}$$

Com os valores das perdas de carga previamente calculados, foi possível estimar o desperdício energético associado ao esforço adicional do compressor para vencer tais resistências. Considerou-se um compressor com potência nominal de 74 kW, responsável por fornecer uma vazão total de 880 m³/h. Com base na vazão de cada setor, a potência proporcional foi estimada pela Equação 4 – Estimativa da Potência Proporcional por Setor, como segue:

- **Setor 1:** Vazão de 819 m³/h → Potência proporcional:

$$P_{\text{Comp1}} = \frac{819}{880} \times 74 = 68,86 \text{ kW}$$

- **Setor 2:** Vazão de 90 m³/h

$$P_{\text{Comp2}} = \frac{90}{880} \times 74 = 7,57 \text{ kW}$$

- **Setor 3:** Vazão de 30 m³/h

$$P_{\text{Comp3}} = \frac{30}{880} \times 74 = 2,52 \text{ kW}$$

Com esses valores, foi possível determinar o consumo energético anual de cada setor, conforme a Equação do Consumo anual de energia elétrica.

- **Setor 1:**

$$E_{\text{Total1}} = 68,86 \times 364 \times 24 = 601.223,04 \text{ kWh/ano}$$

- **Setor 2:**

$$E_{\text{Total2}} = 7,57 \times 364 \times 24 = 66.097,92 \text{ kWh/ano}$$

- **Setor 3:**

$$E_{\text{Total3}} = 2,52 \times 364 \times 24 = 22.055,52 \text{ kWh/ano}$$

A energia desperdiçada em função da perda de carga foi calculada pela Equação 4 – Estimativa da Energia Perdida por Perda de Carga:

- **Setor 1:**

$$E_{\text{perdida1}} = 601.223,04 \times \frac{0,77}{7,2} = 64.297,46 \text{ kWh/ano}$$

- **Setor 2:**

$$E_{\text{perdida2}} = 66.097,92 \times \frac{0,118}{7,2} = 1.083,27 \text{ kWh/ano}$$

- **Setor 3:**

$$E_{\text{perdida3}} = 22.055,52 \times \frac{0,159}{7,2} = 520,75 \text{ kWh/ano}$$

O custo econômico desse desperdício foi obtido a partir da EQUAÇÃO 3 Custo anual do desperdício energético, considerando o valor médio de R\$ 0,43 por kWh:

- **Setor 1:**

$$C_{perda_1} = 64.297,46 \times 0,43 = \text{R\$}27.647,91 \text{ por ano}$$

- **Setor 2:**

$$C_{perda_2} = 1.083,27 \times 0,43 = \text{R\$} 465,80 \text{ por ano}$$

- **Setor 3:**

$$C_{perda_2} = 520,75 \times 0,43 = \text{R\$}223,92 \text{ por ano}$$

4.2.4 Análise e Proposta de Melhoria

A partir dos resultados obtidos nas análises das linhas de ar comprimido, tanto do empilhador de gaiolas quanto da caldeira industrial, foi possível identificar deficiências significativas no sistema atual, que comprometem o desempenho energético e operacional da planta.

Segundo a Atlas Copco (2023), em sistemas de distribuição de ar comprimido bem projetados, a perda de pressão não deve ultrapassar 0,30 bar. Valores superiores a esse limite indicam ineficiências que resultam em aumento de consumo de energia, redução da vida útil dos equipamentos e possíveis falhas na operação de máquinas pneumáticas. Com base nos cálculos realizados nas seções anteriores, verificou-se que:

A linha do empilhador de gaiolas apresentou uma perda de pressão de 0,758 bar, superando em mais de 150% o valor recomendado.

A linha da caldeira, por sua vez, apresentou perdas setorizadas de 0,77 bar, 0,118 bar e 0,170 bar, totalizando uma queda de pressão de 1,058 bar ao longo de toda a linha, o que representa um valor mais de três vezes superior ao limite ideal.

Além dos impactos energéticos evidentes, essas perdas de carga excessivas podem gerar problemas operacionais como: queda de pressão nos pontos de uso, funcionamento ineficiente de válvulas e atuadores pneumáticos, e maior desgaste dos compressores, que passam a operar com maior esforço para manter a pressão desejada na rede.

Diante deste cenário, foram elaboradas propostas técnicas de intervenção com o objetivo de mitigar essas perdas e promover maior eficiência energética no sistema.

4.2.4.1 Melhorias Propostas:

1. Linha do Empilhador de Gaiolas:

A principal causa da elevada perda de pressão foi identificada no subdimensionamento do diâmetro da tubulação e na quantidade excessiva de conexões. Para resolver essa limitação, foi proposta a substituição da tubulação atual de 2" (50,8 mm) por uma tubulação de 4" (101,6 mm). Esse redimensionamento permitirá uma redução significativa na velocidade do ar dentro da tubulação, diminuindo a fricção interna e, conseqüentemente, a perda de carga.

2. Linha da Caldeira:

Dada a complexidade e setorização da linha, foram propostas melhorias específicas para cada trecho:

- Trecho 1 (50,8 mm): substituição por tubulação de 4" (101,6 mm)
- Trecho 2 (25,4 mm): substituição por tubulação de 2" (50,8 mm)
- Trecho 3 (19 mm): substituição por tubulação de 1" (25,4 mm)

O redimensionamento foi fundamentado com base nas vazões específicas de cada trecho, visando manter a perda de carga abaixo do limite recomendado de 0,30 bar e compatível com a capacidade dos compressores utilizados.

4.2.4.2 Resultados das Simulações com o Novo Dimensionamento

Após a aplicação das melhorias, os cálculos foram refeitos para refletir a nova configuração das tubulações:

- Linha do empilhador de gaiolas:
 - Nova perda de pressão: 0,149 bar
 - Custo anual estimado do desperdício: R\$ 4.120,13

- Economia anual: R\$ 16.839,98
- Linha da caldeira:
 - Setor 1: perda de 0,014 bar, custo de R\$ 502,70
 - Setor 2: perda de 0,007 bar, custo de R\$ 27,00
 - Setor 3: perda de 0,017 bar, custo de R\$ 22,39
 - Economia total estimada da linha da caldeira: R\$ 27.785,54

O custo total anual com desperdícios caiu de R\$ 49.297,74 (R\$ 20.960,11 + R\$ 28.337,63) para R\$ 552,09 (R\$ 4.120,13 + R\$ 502,70 + R\$ 27,00 + R\$ 22,39), representando uma redução de aproximadamente 98,9% nos custos relacionados à perda de carga.

4.2.4.3 Conclusões Parciais da Análise

Esses resultados demonstram de forma clara a efetividade técnica e econômica das intervenções propostas. Além da economia financeira direta, outras vantagens relevantes incluem:

- Redução do desgaste dos compressores e menor necessidade de manutenção;
- Estabilização da pressão na rede, aumentando a confiabilidade operacional;
- Melhora na performance de equipamentos pneumáticos;
- Possibilidade de expansão da planta sem necessidade de aquisição de novos compressores.

Por fim, as análises reforçam a importância de avaliar periodicamente as perdas de carga nos sistemas de ar comprimido, especialmente em indústrias com grande consumo energético. Investimentos em melhoria de infraestrutura e redimensionamento de tubulações, embora demandem recursos iniciais, apresentam rápido retorno financeiro e promovem ganhos sustentáveis no médio e longo prazo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho energético de trechos específicos do sistema de ar comprimido de um abatedouro de aves, com foco na identificação de perdas de carga excessivas e na quantificação dos impactos energéticos e econômicos associados.

A análise foi conduzida em duas frentes principais: (i) as perdas de carga nas linhas do empilhador de gaiolas e da caldeira industrial, e (ii) as perdas por vazamentos, detectadas por meio de inspeções em campo e estimativas baseadas em metodologias consagradas na literatura.

No caso das perdas de carga, os cálculos demonstraram que as pressões observadas superavam o limite recomendado de 0,30 bar segundo a Atlas Copco (2023), com valores de 0,758 bar na linha do empilhador de gaiolas e 1,021 bar na linha da caldeira. Após o redimensionamento das tubulações, essas perdas foram reduzidas para 0,149 bar e 0,038 bar, respectivamente, resultando em uma economia anual de aproximadamente R\$ 34.342,26, considerando a redução no consumo de energia elétrica.

Além disso, a análise de vazamentos no sistema de ar comprimido revelou um cenário preocupante. Com base nas medições realizadas e na extrapolação de vazamentos típicos para sistemas industriais de médio porte, estimou-se que os vazamentos representam um desperdício energético da ordem de 84.147,84 kWh/ano, o que corresponde a um custo anual de R\$ 335.585,14. Este valor, por si só, supera o desperdício energético por perda de carga, demonstrando que a eliminação ou redução dos vazamentos deve ser tratada como prioridade nas ações de eficiência energética.

De forma consolidada, os dois principais focos de ineficiência do sistema perdas de carga por dimensionamento inadequado e vazamentos ao longo da rede resultavam, antes das intervenções, em um desperdício energético total estimado em 126.141,9 kWh/ano, com custo anual superior a R\$ 56 mil.

A proposta de melhorias técnicas, como o redimensionamento das tubulações e a implementação de ações para controle e eliminação de vazamentos, mostrou-se

viável tanto técnica quanto economicamente. Além disso, contribui para a sustentabilidade operacional da unidade, reduzindo o consumo de energia, os custos com insumos e o impacto ambiental das atividades industriais.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dada a abrangência e a complexidade dos sistemas de ar comprimido, recomenda-se que estudos futuros aprofundem a análise em algumas áreas complementares, como:

- Levantamento de custos e viabilidade econômica da substituição das tubulações, considerando não apenas a economia de energia, mas também os custos com materiais, mão de obra e paradas de manutenção;
- Análise térmica do ambiente de admissão dos compressores, com o objetivo de reduzir a temperatura do ar de entrada. Como o desempenho dos compressores é sensivelmente afetado pela temperatura do ar admitido, a instalação de dutos externos, filtros com isolamento térmico ou sistemas de captação de ar em zonas mais frias pode melhorar a eficiência do processo de compressão;
- Estudo detalhado sobre monitoramento e controle inteligente da rede de ar comprimido, utilizando sensores de pressão e vazão para atuação dinâmica em válvulas e ajustes operacionais;
- Implementação de uma rotina de manutenção preventiva voltada à detecção e eliminação de vazamentos, que complementaria a abordagem de eficiência energética adotada neste estudo;
- Avaliação da influência de reservatórios pulmão e tanques de expansão sobre a estabilidade da rede e a redução da necessidade de ciclos frequentes dos compressores.

Essas propostas visam ampliar o conhecimento técnico sobre os sistemas pneumáticos industriais e fortalecer práticas de gestão energética que sejam economicamente viáveis, ambientalmente responsáveis e tecnicamente sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABPA (Brasil). Associação Brasileira de Proteína Animal. Relatório anual de 2024. São Paulo: Anais, 2024. 77 p.

ALVES, G. R. Eficiência energética em um sistema de ar comprimido. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ATLAS COPCO. Manual do Ar Comprimido. 6. ed. São Paulo: Atlas Copco Brasil, 2015.

ATLAS COPCO. Purificadores e secadores de ar comprimido: Manual técnico. 2024. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors>. Acesso em: 2 jul. 2025.

ARCOMPRESSADO. Função dos reservatórios de ar comprimido: para que servem e como escolher? 2022. Disponível em: <https://www.arcompressado.com.br/funcoes-dos-reservatorios-de-ar-comprimido/>. Acesso em: 2 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000. Dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 jul. 2000.

BRASIL. Decreto nº 10.350, de 18 de maio de 2020. Institui a Conta-Covid destinada a cobrir déficits ou antecipação de receita das concessionárias e permissionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 maio 2020.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia; Ministério da Indústria e do Comércio. Portaria Interministerial nº 1.877, de 30 de dezembro de 1985. Institui o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel). Brasília, DF, 1985.

BRASIL. Carlos Roberto Rocha. Ministério de Minas e Energia. Eficiência Energética em sistemas de ar comprimido. Brasília: MME - Ministério de Minas e Energia, 2005. 87 p.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Anuário estatístico de energia elétrica 2023. Rio de Janeiro: Epe, 2023. 50 p. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

FREITAS, André Mateus Amorim Dias de. Eficiência energética em sistemas de ar comprimido. 2017. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2017.

HIPRESS. O que é secador de ar e como funciona? Disponível em: <https://www.hipress.com.br/o-que-e-secador-de-ar-e-como-funciona/>. Acesso em: 1 jul. 2025.

HIPRESS. O que é secador de ar e como funciona? 2025. Disponível em: <https://www.hipress.com.br/o-que-e-secador-de-ar-e-como-funciona/>. Acesso em: 29 jun. 2025

METALPLAN. Manual do ar comprimido. 7. ed. São Paulo: Metalplan Equipamentos Industriais Ltda., 2020. Disponível em: <https://metalplan.com.br>. Acesso em: 2 jul. 2025.

METEPLAN. Soluções em secagem e filtragem de ar comprimido. 2023. Disponível em: <https://www.meteplan.com.br/produtos/secadores/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

METALPLAN. Qual a diferença entre compressores volumétricos e dinâmicos? Blog Metalplan, 6 jan. 2025. Disponível em: <https://metalplan.com.br/blog/qual-a-diferenca-entre-compressores-volumetricos-e-dinamicos/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

OLESKO, Harding Ducci. Uma proposta de eficiência energética para sistemas de ar comprimido industriais. 2013. Monografia (Especialização em Eficiência Energética na Indústria) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

PROCEL. Guia de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido. Rio de Janeiro: Eletrobrás/Procel, 2009. TELES DE OLIVEIRA, M.; CASTRO, N. D.; FAESARELLA, A. S. Eficiência energética aplicada em sistemas de ar comprimido e luminotécnica. Universidade São Francisco, 2020.

PUMA COMPRESSORES. Tratamento do ar comprimido com membranas, filtros e secadores. 2023. Disponível em: <https://www.puma.com.br>. Acesso em: 1 jul. 2025.

SCHNEIDER MOTOBOMBAS. Manual Técnico. Joinville, SC, 2006.

OLESKO, Harding Ducci. Uma proposta de eficiência energética para sistemas de ar comprimido industriais. 2013. Monografia (Especialização em Eficiência Energética na Indústria) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ZAPPELINI, A. B. Análise de eficiência energética em sistemas de ar comprimido. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.