

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS,  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SERVIÇO SOCIAL

Alexsandro Lopes Maia

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTRUTURA  
DE AR COMPRIMIDO**

ITUIUTABA  
2024

Alexsandro Lopes Maia

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTRUTURA DE AR  
COMPRIMIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Administração, Ciências Contábeis, Engenharia de Produção e Serviço Social da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Dr. Gleyzer Martins

ITUIUTABA  
2024

# **ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTRUTURA DE AR COMPRIMIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Administração, Ciências Contábeis, Engenharia de Produção e Serviço Social da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção.

Ituiutaba, 10 de outubro de 2024.

Banca Examinadora:

---

Dr. Gleyzer Martins, Universidade Federal de Uberlândia

---

Dr. Luís Fernando Magnanini de Almeida, Universidade Federal de Uberlândia

---

Dr. Eugênio Pacceli Costa, Universidade Federal de Uberlândia

Dedico de modo especial a minha família, pai, mãe, irmão e namorada (futura esposa) que sempre foram meus grandes incentivadores no decorrer da vida e do curso.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo dessa jornada. Aos meus pais, Agno José Maia e Sandra Lopes dos Santos, por todo o amor, compreensão e suporte incondicional em todos os momentos da minha vida. Sem vocês, nada disso seria possível.

Ao meu irmão, Agno Filho pelo apoio e torcida a para que meus objetivos fossem alcançados.

A minha namorada - futura esposa - Hellen Fernanda, pelo apoio e atenção que sempre dedicou a mim, torcendo para que meus sonhos se realizassem.

Aos amigos, em especial Luís Gustavo, que fizeram parte da minha vida acadêmica e que continuaram presentes em minha vida com certeza.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Dr. Gleyzer Martins, pela paciência, orientação e disponibilidade ao longo de todo o processo. Suas sugestões e críticas construtivas foram essenciais para o desenvolvimento e aprimoramento deste trabalho

Por fim, agradeço à UFU e a todos os professores que contribuíram para a minha formação acadêmica, transmitindo seus conhecimentos e me inspirando a seguir adiante com dedicação e persistência.

“A persistência é o caminho do êxito”

Charles Chaplin

## RESUMO

O ar comprimido é essencial para a automação industrial, além de ser considerado ambientalmente sustentável. Entretanto, seus altos custos operacionais exigem um dimensionamento preciso das instalações para otimizar a eficiência energética. Isto posto, este trabalho consiste em um estudo de caso cujo objetivo é demonstrar o potencial de economia de energia elétrica e a viabilidade econômica de estrutura do ar comprimido de uma fábrica de levedura de uma usina sucroalcooleira no interior do estado de Goiás. Logo, realizou-se os cálculos de balanço de massa e de energia na tubulação de ar comprimido determinando através da equação de Darcy as perdas de pressão, podendo assim avaliar a demanda de massa e de pressão de ar comprimido na instalação e a capacidade do compressor. Os resultados demonstram a possibilidade de redução da faixa de pressão mínima, sem afetar a produção, e a análise financeira indica a importância do correto dimensionamento da instalação com o objetivo de reduzir o impacto nos custos de produção de ar comprimido.

**Palavras chaves:** Dimensionamento; Viabilidade Econômica; Análise Financeira.

## **ABSTRACT**

Compressed air is essential for industrial automation and is considered environmentally sustainable. However, its high operating costs require precise sizing of the installations to optimize energy efficiency. Therefore, this work consists of a case study which objective is to demonstrate the potential for saving electrical energy and the economic viability of the compressed air structure of a yeast factory in a sugar and ethanol plant in the interior of the state of Goiás. Therefore, mass and energy balance calculations were performed in the compressed air piping, determining pressure losses through the Darcy equation, thus enabling the evaluation of the mass and pressure demand of compressed air in the installation and the compressor capacity. The results demonstrate the possibility of reducing the minimum pressure range without affecting production, and the financial analysis indicates the importance of correctly sizing the installation in order to reduce the impact on compressed air production costs.

**Keywords:** Sizing; Financial Analysis; Economic viability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Produção, distribuição e tratamento do ar comprimido.....	Página 19
Figura 2	Classificação dos compressores.....	Página 21
Figura 3	Tipos de redes de distribuição.....	Página 22
Figura 4	Instalação da linha de alimentação.....	Página 23
Figura 5	Layout da linha de distribuição.....	Página 28
Figura 6	Fluxograma da rotina computacional.....	Página 29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Gasto total do sistema de ar comprimido.....	Página 31
Tabela 2	Pressões do sistema de ar comprimido.....	Página 32
Tabela 3	Balanço de massa nas tubulações da planta de ar comprimido.....	Página 32
Tabela 4	Distribuição de pressão nas tubulações da planta de ar comprimido.....	Página 33
Tabela 5	Balanço de massa e de pressão nas tubulações da planta de ar comprimido.....	Página 34
Tabela 6	Pressão nominal de trabalho do compressor.....	Página 35
Tabela 7	Cenários dos custos e receita de consumo de energia elétrica.....	Página 36
Tabela 8	VPL do projeto de ar comprimido.....	Página 37

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

UNICA	União da Indústria de Cana de Açúcar.
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento.
DOE	<i>Department of Energy.</i>
VPL	Valor Presente Líquido.
ISO	<i>International Organization for Standardization.</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design.</i>
BCB	Banco Central do Brasil.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	13
1.2	OBJETIVOS DE PESQUISA .....	14
1.2.1	<i>Objetivo geral .....</i>	<i>14</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>15</i>
1.3	JUSTIFICATIVA .....	15
1.4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....	15
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
2.1	AR COMPRIMIDO .....	16
2.2	PNEUMÁTICA .....	16
2.2.1	<i>Contaminação.....</i>	<i>18</i>
2.2.2	<i>Tratamento do Ar Comprimido.....</i>	<i>18</i>
2.3	GERAÇÃO DE AR COMPRIMIDO.....	19
2.3.1	<i>Sala do compressor.....</i>	<i>20</i>
2.3.2	<i>Compressores .....</i>	<i>20</i>
2.3.3	<i>Compressor de parafuso.....</i>	<i>21</i>
2.4	DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO.....	22
2.5	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	24
2.5.1	<i>Aumento da eficiência energética .....</i>	<i>24</i>
2.6	ANÁLISE FINANCEIRA .....	24
2.6.1	<i>Valor presente líquido (VPL) .....</i>	<i>25</i>
2.7	ANÁLISE DO ESCOAMENTO VISCOZO INCOMPRESSÍVEL EM DUTOS.....	26
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA .....	28
3.2	TÉCNICAS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS .....	28
3.3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS - ETAPAS .....	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>31</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA.....	31
4.2	MAPEAMENTO DA REALIDADE EMPRESARIAL .....	31
4.3	APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS E/OU FERRAMENTAS DA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO .....	34
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>38</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O setor sucroalcooleiro brasileiro vem ganhando espaço no mercado nacional e internacional por conta da diversificação e melhoria da sua produtividade. Conforme a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2023), a maior produção de cana-de-açúcar fica a cargo do Brasil, com 8,33 milhões de hectares plantados na safra de 2023/2024, o que significa uma produção de aproximadamente 214 milhões de toneladas de bagaço (CONAB, 2023).

Ainda segundo a UNICA (2023), o Brasil poderá gerar 20.973 GWh de energia elétrica por meio de bagaço da cana-de-açúcar, 14% a mais em relação ao ano anterior, ajudando a minimizar a ameaça sempre presente de escassez de energia.

Rodrigues (2005) realizou simulações e análises técnicas para avaliar o desempenho de uma planta produtora de açúcar e álcool, visando aumentar a feitura do remanescente de energia elétrica. Apresentou diversas configurações para a planta industrial, destacando a utilização de ar comprimido e as principais diferenças, entre os diversos modelos, do potencial de energia excedente que poderia ser utilizado em cada configuração.

No entendimento de Rocha (2005) A pressão de ar comprimido é um potencial de energia, gerada a partir de uma transformação termodinâmica do ar atmosférico, o qual ocorre quando uma máquina térmica, chamada compressor, aplica trabalho mecânico para comprimi-lo.

Em outras palavras, quando o ar do ambiente é comprimido, obtém-se o que chamamos de ar comprimido, que é puro, incolor e inodoro (METALPLAN, 2010).

Assim, destaca-se que a implantação do ar comprimido na área industrial teve como objetivo a otimização de operações, com vistas a expandir a produção baseada na moderação de custos. Dado isso, destaca-se que tal utilização possui, por conseguinte, numerosas vantagens se comparada à utilização de outras fontes energéticas, (PACHECO, 2018).

Nessa linha, quando se tem uma unidade industrial de grandes proporções, há a necessidade de se utilizar uma variada gama de equipamentos nos processos produtivos, dentre os quais se encontra os compressores de ar, considerados essenciais para esses processos produtivos. Trata-se de equipamentos que, como o próprio nome destaca, comprimem gases para atingir diversos objetivos na unidade industrial. Logo, essas máquinas exigem um zelo maior, visto que consomem alto teor de energia para garantir a sua operacionalidade. Nessa

linha, faz-se importante mencionar que vantajosas indústrias do reino norte-americano consomem até 10% da energia total do país, conforme dados da fonte (SENNIAPPAN, 2004)

Convém destacar que a acessibilidade para a obtenção da fonte energética a partir do ar atmosférico é consideravelmente boa, assim como para outras benesses, a exemplo da segurança que a fonte oferece para se evitar sobrecargas em acionadores eletromecânicos, ainda, a resistência dos componentes pneumáticos que tornam-se insensíveis a vibrações. Pode-se, também, contar com a facilidade de operação, a adequação a ambientes hostis, a confiabilidade no quesito de preservação ambiental, bem como quanto à saúde de trabalhadores, visto que, mesmo que haja vazamento de gás, esses não oferecem riscos ao homem e, por último, a pressão moderada que o uso da energia proveniente da compressão de ar oferece (PACHECO, 2018).

O crescimento das usinas sucroalcooleiras e a evolução de seus produtos, traduzem-se em incentivo como a construção de tubulações mais adaptáveis para os projetos de ar comprimido, conseqüentemente, sua eficiência energética. Diante disso, torna-se necessário estabelecer uma meta de consumo, a qual possibilite planejar, com maior precisão, a demanda e a quantidade de fornecimento nos ambientes que irão utilizar a referida fonte energética, conforme mencionado por Mckane (2003).

Assim, é a partir das mensurações confiáveis, pode-se otimizar os seguintes parâmetros operacionais: movimento dos motores, ajuste da velocidade, sistema de controle, inibição de calor, processo de resfriamento, além de outros (MCKANE, 2003).

Desse modo, é somente pelo viés de medições confiáveis que se torna capaz de otimizar parâmetros operacionais, a exemplo de movimentação de motores, ajuste de velocidade, sistema de controle, repulsão de calor, regulação de resfriamento, além de outros parâmetros. (MCKANE, 2003).

## **1.2 Objetivos de pesquisa**

### ***1.2.1 Objetivo geral***

O objetivo do trabalho é avaliar os potenciais de melhoria energética de uma instalação de ar comprimido de uma fábrica de levedura para uma usina sucroalcooleira buscando atender as demandas de pressão e fluxos de massa nos pontos de consumo. Foi realizado também a análise do impacto econômico dos potenciais de melhorias por meio do exame do Valor

Presente Líquido – VPL, possibilitando assim, o conceito de uma instalação mais eficiente do ponto de vista energético e também financeiro.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

Para o desenvolvimento do trabalho foram também realizados a simulação do consumo de ar comprimido e das perdas de pressão nos diferentes ramais da instalação; a análise de diferentes configurações de demanda da instalação: condição para atender a demanda e a máxima capacidade e finalmente a análise financeira da instalação com a finalidade de definir um valor de ar-comprimido que contabilizem os efeitos do dimensionamento e uso da instalação.

### **1.3 Justificativa**

O uso do ar comprimido nas indústrias sucroalcooleiras é muito importante para os processos de automação industrial, promovendo a movimentação de produtos, o acionamento de válvulas e o controle pneumático do processo. Entretanto, a geração e a distribuição de ar comprimido apresentam custos elevados, o que motivam os estudos da eficiência energética nessas instalações, seja na identificação e controle de perdas, ou seja na análise da geração e distribuição do ar comprimido.

### **1.4 Delimitação do trabalho**

O trabalho consistiu no estudo e na identificação de oportunidades de aprimoramento da eficiência energética na rede de distribuição de ar comprimido para o acionamento de válvulas pneumáticas de uma usina sucroalcooleira na fábrica de levedura.

### **1.5 Estrutura do trabalho**

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que oferece as bases conceituais e teóricas dos equipamentos de geração e de distribuição de ar comprimido, da análise do escoamento viscoso e dos estudos de viabilidade econômica e eficiência energética.

O capítulo 3 mostra a metodologia empregada de coleta e análise de dados da pesquisa, assim como o fluxograma do código de análise da rede de distribuição de vapor.

O capítulo 4 apresenta inicialmente a empresa estudada, os principais resultados alcançados na pesquisa e a análise econômica da eficiência energética desenvolvida para instalação de ar comprimido.

O capítulo 5 delimita os principais resultados e análise alcançados pelo estudo.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Ar comprimido**

Quando algum ar estiver com uma pressão maior que a atmosférica, poderá realizar trabalho e uma forma para obter ar industrial e dotá-lo de muita energia consistente é comprimi-lo, assim ele ficara dotado de energia e pressão e estará qualificado para realizar trabalho. A área da engenharia que se ocupa do ar comprimido é dominada de pneumática e estuda o controle da pressão e da energia potencial no ar. Desde que este ar esteja fluindo dentro de uma tubulação, uma parte dessa energia potencial se transforma em energia cinética, logo o ar irá se deslocar para outros locais.

Desse modo, define-se o ar comprimido, como o próprio nome indica, é o resultado de uma compressão do ar ambiente como resultado de uma mistura de oxigênio e de outros fluidos de relativa raridade. Nessa linha, o equivalente a 5 bilhões de toneladas de ar costumam ser comprimidos, em um intervalo anual, no mundo todo. Isso leva ao uso de 400 bilhões de kWh, o que equivale ao dispêndio de 20 bilhões de dólares, segundo a seguinte fonte (METALPLAN, 2010).

Para Karmouche (2009) muitas indústrias, de portes diversos, contam com algum respaldo de ar comprimido, para o uso em ferramentas pneumáticas e doutras funções. Sendo assim, ressalta-se que nos múltiplos processos industriais, esse processo de ar comprimido representa relevante significado na cadeia produtiva, o que significa a cobertura de uma quantidade vultosa de numerário com energia em uma central industrial.

### **2.2 Pneumática**

A definição dada por Linsingen (1989) para sistemas hidráulicos é válida também para o sistema pneumático. A palavra vem do grego "pneuma", que significa "respiração", "sopro" ou "ar" (FIALHO, 2011). O termo reflete a relação direta entre o ar comprimido (sopro) que

movimenta e controla componentes mecânicos (cilindros, motores e válvulas), trazendo eficiência em muitas operações industriais e tecnológicas (TRAINING, 2006).

Assim, o uso do ar comprimido enquanto canal de transmissão de energia possui várias utilizações no campo industrial, de modo que, por motivos econômicos e construtivos, torna-se indicado. Nessa perspectiva, seguem algumas das vantagens trazidas pela pneumática:

- Bosch (2008) assevera que a disponibilidade que se tem do ar faz da pneumática uma alternativa de bastante frutuosidade.
- Também, de acordo com Fialho (2011) o fato de o ar comprimido ser fluido é vantajosa para as indústrias que o utilizam, pois, assim, possuem um ambiente mais limpo e, mesmo que ocorra algum vazamento, esse não traz prejuízo ambiental.
- O ar comprimido é também utilizado no transporte, sendo conduzido através de tubulações por longas distâncias, sem a necessidade de uma linha de retorno, sendo o ar liberado diretamente no ambiente após sua exaustão (BOSCH, 2008).
- O uso do ar comprimido não apresenta riscos de incêndios ou explosões, isso porque a pressão utilizada em sistemas pneumáticos é relativamente baixa (entre 6 e 12 bar), o que minimiza os possíveis danos mesmo quando ocorre alguma falha nos componentes. Em contrapartida, nos sistemas hidráulicos, as pressões são significativamente mais elevadas, chegando a cerca de 350 bar, conforme mencionado por Fialho (2011).
- Para (BOSCH, 2008), há, também, a vantagem de se armazenar o ar comprimido em reservatórios, levando em conta que esses devem possuir critério de pressão em disponibilidade por um determinado tempo, suficiente para a realização de um trabalho, ainda que o compressor não esteja em funcionamento.
- Conforme (FIALHO, 2011), é importante destacar os benefícios da pneumática, pois uma vez que a dimensão dos elementos de comando e de ação oferecida com a pneumática são mais leves, ela proporciona vantagem na velocidade de deslocamento, além de segurança contra sobrecarga, de modo que essa não passa por efeito danoso e, no processo da carga, caso a resistência pare de funcionar, tal carga se efetiva normalmente.

Em contrapartida, necessário se faz a atenção às desvantagens trazidas com a pneumática:

- De acordo com Silva (2002), o ar comprimido contém vapor de água e isso é uma desvantagem, pois pode causar problemas, como a corrosão e o desgaste prematuro dos componentes do sistema. Isso acontece porque o ar ao percorrer as tubulações pode se

condensar, dependendo das condições de temperatura e da pressão no sistema pneumático. Para evitar esses danos, é necessário implementar um sistema que elimine o líquido acumulado, para evitar danos no sistema pneumático.

- Entende-se que como outros gases, o ar está sujeito à compressão, o que é um impedimento para que a pneumática possa uniformizar a velocidade e a constância durante o andamento do uso do sistema (FIALHO, 2011).
- Silva (2002) também explica que a baixa gomosidade do ar comprimido pode fazer com que este ar escape com mais facilidade, ocasionando vazamentos nos sistemas pneumáticos e, conseqüentemente comprometendo sua eficiência. Para minimizar esse problema sugere uma boa vedação e manutenções preventivas regulares.
- Necessário se faz ressaltar o capital empreendido pelas indústrias, relacionado ao consumo de energia elétrica, especialmente, quando ocorre deficiência de seu sistema, por conta disso, sistemas de ar comprimido representam um desafio para as indústrias de transformação, visto que essas devem mantê-lo sob supervisão, para que não haja dissabores (KARMOUCHE, 2009).

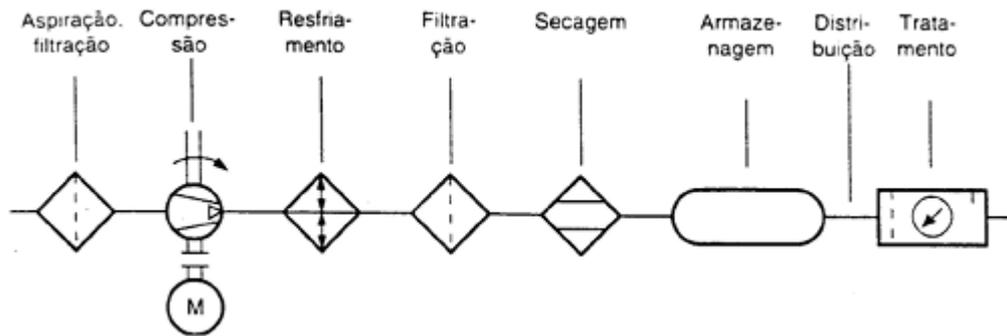
### ***2.2.1 Contaminação***

O uso incorreto dos sistemas pneumáticos pode afetá-los intensamente, no âmbito dos componentes. Desse modo, a indicação é que se preserve esses sistemas, o que se aplica para as operações industriais e para a construção civil. Dessa forma, a constante revisão no nível de contaminação da aparelhagem que prepara o ar comprimido é imprescindível para a garantia de que o sistema atenda ao que dele é esperado.

### ***2.2.2 Tratamento do Ar Comprimido***

Na Figura 1, abaixo, de acordo com Silva (2002) encontram-se os equipamentos essenciais para fornecer ar comprimido de modo eficiente, pois esses operam com a produção e a distribuição na malha fabril a partir da produção centralizada da compressão do ar. Na sequência, destaca-se que após tal compressão, o ar passa por um tratamento de purificação e descarte das impurezas, com o fito de atender aquilo que é esperado para que o sistema opere com qualidade.

**Figura 1 – Produção, distribuição e tratamento do ar comprimido.**



FONTE: Silva (2002, p. 25).

Assim, de acordo com (SANTOS *et al*, 2014) um radiador é o responsável pelo esfriamento do ar comprimido, por esse operar com a troa de calor com ar.

Há, ainda, os secadores de ar comprimidos, que podem ser definidos como aquelas ferramentas voltadas à dispersão da umidade que, por vezes, aloja-se no fluxo desse ar, de modo a torná-lo seco. Assim, torna-se importante a somatória de secadores e filtros, no sentido de fazer a remoção do que for prejudicial ao processo, como partículas indesejáveis, óleo etc (FARGON, 2006).

Na perspectiva de Santos *et al* (2014) os reservatórios são usados, no sistema de ar comprimido, para acumular o ar, pois promovem uma pressão continuada e frequente na linha, o que otimiza o funcionamento do compressor. Desse modo, esses reservatórios de pressão são operam como um pulmão para o compressor, de maneira que podem fornecer ar para garantir a pressão constante a todo o manejo produtivo durante o tempo do referido compressor.

Quando o ar não bem tratado, caso haja elementos capazes de contaminá-lo, isso pode ocasionar falhas em um sistema, o que compromete a vida útil dos componentes. Dessa forma, c. Ela estabelece níveis de qualidade com base em parâmetros quantitativos. Dessa forma, há uma divisão em cinco, as quais determinam os valores máximos de partículas sólidas, água e óleo aceitos para cada uma. Por sua vez, a norma ISO 8573-1 define uma sequência padrão para os equipamentos de tratamento de ar (SANTOS; SILVA,2014).

### 2.3 Geração de ar comprimido

Em um sistema pneumático, o ar comprimido é gerado por meio de um compressor, que captura o ar ambiente e o comprime. Desta forma, quando o ar é comprimido passa por um sistema de filtragem para remover impurezas, e por um secador, que retira a umidade de

conservação ou de preparação. Essa unidade é equipada com um filtro, que remove impurezas do ar; uma válvula reguladora de pressão, que controla a pressão adequada do sistema; e um lubrificador, que adiciona uma quantidade controlada de lubrificante ao ar para reduzir o desgaste das peças móveis do sistema pneumático. Esses elementos asseguram que o ar comprimido esteja limpo, regulado e lubrificado, o que contribui para o funcionamento eficiente e prolongado do sistema (SILVA, 2002).

### ***2.3.1 Sala do compressor***

Na categoria das utilidades encontram-se os compressores e demais equipamentos de geração, tratamento e armazenamento de ar comprimido, de modo que é relevante atentar-se às seguintes advertências: destinar uma sala para acondicionar esses equipamentos e que essa seja desvinculada dos outros compartimentos da empresa, para que os ruídos advindos dos equipamentos fiquem isolados.

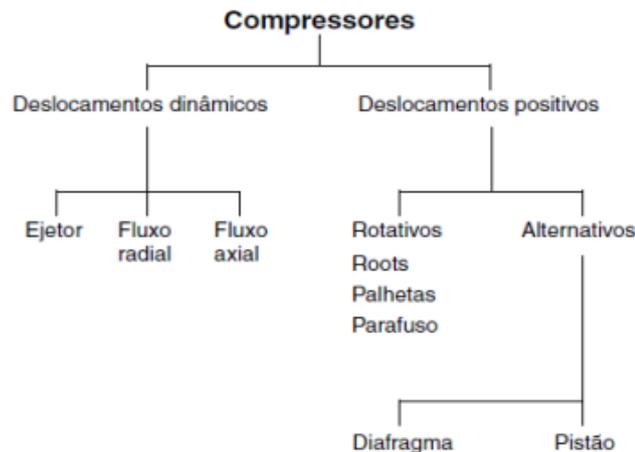
### ***2.3.2 Compressores***

São denominados compressores os dispositivos, cuja função é reduzir a quantidade de fluido ou de gás, de modo a aumentar a pressão. Desse modo, na teia industrial, tais compressores possuem papel relevante, assim como, também, em sistemas de refrigeração e, ainda, em sistemas de compressão de dados na área computacional (MORAN, 1999).

Coradi (2011) explica que os compressores têm a finalidade de aumentar a pressão de um gás, reduzindo seu volume, isto é, eles absorvem ar atmosférico e o comprimem, elevando sua pressão para alcançar o nível necessário para executar o trabalho. Cabe ressaltar que os compressores são utilizados em máquinas industriais e em sistema de refrigeração e ar-condicionado.

A Figura 2 apresenta a classificação dos compressores, conforme a atualidade.

**Figura 2 – Classificação dos Compressores.**



FONTE: Parker Training (2006, p. 12).

### 2.3.3 Compressor de parafuso

Na demonstração acima, o compressor apresentado possui dois rotores, cujo formato é o de parafusos, os quais giram em sentido contrário e as aberturas de sucção e de descargas se dão pelas ligações ao sistema.

Cabe destacar que o compressor de parafuso utiliza dois rotores em forma de parafuso para comprimir o gás. Ele funciona a partir da aspiração do gás que é sugado pela abertura existente entre os filetes dos rotores que giram em alternativas opostas dentro de uma carcaça cilíndrica. Esses rotores possuem um formato de parafuso que permite o movimento contínuo do ar, reduzindo o espaço que é tomado pelo gás, proporcionando assim a compressão do ar (RODRIGUES, 1991). Essa por sua vez é interdependente da geometria da máquina e da modalidade do gás que será comprimido:

- À proporção que ocorre o movimento dos rotores, uma admissão de ar é feita por meio de uma depressão responsável pelo processo;
- A rotação redundante em uma compressão leve do ar para que cada seção alcance o bocal de descarga;
- Na sequência, o ar comprimido é centrifugado para fora do elemento compressor.

## 2.4 Distribuição de ar comprimido

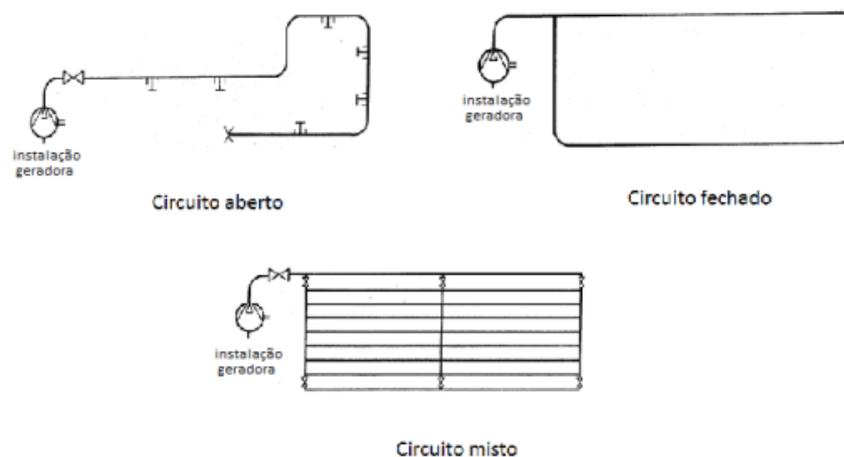
Coradi (2011) assevera que apenas em casos considerados isolados é possível usar um compressor próprio para cada uma das máquinas pneumáticas. Isso porque, a distribuição de ar comprimido em máquinas pneumáticas envolve a refrigeração, filtragem e secagem do ar comprimido. Já o transporte ocorre através de um sistema de articulação, ou seja, o ar comprimido chega às máquinas pneumáticas através de conexões e mangueiras. Portanto, sua distribuição deve ser projetada, ou seja, é importante criar um layout, que exiba a rede de distribuição principal com suas ramificações e pontos de consumo, para que seja feitas tubulações para ligar o reservatório aos pontos de utilização para se distribuir o ar comprimido.

Com esse critério, é mais simples a definição do tipo de rede de distribuição que carece de ser implantada, com vistas a um percurso menor para, desse modo, economizar-se nos custos, além de se reduzir perdas. Assim, é possível garantir o funcionamento de forma adequada e segura.

Nessa linha, destaca-se que as instalações das tubulações pneumáticas devem se dar em locais mais indicados, com vistas à realização de manutenções regulares, de modo que, caso haja fuga de ar, isso seja detectado rapidamente. Embora, caso surjam vazamentos de tamanho aparentemente insignificante, eles podem levar a vultosas perdas de pressão.

Jesus (2012) ressalta que as principais configurações de distribuição de ar comprimido são: rede em circuito aberto, rede em circuito fechado e rede mista, ver Figura 3.

**Figura 3 – Tipos de redes de distribuição.**



FONTE: Adaptado de silva (2002, p. 36 e p. 37).

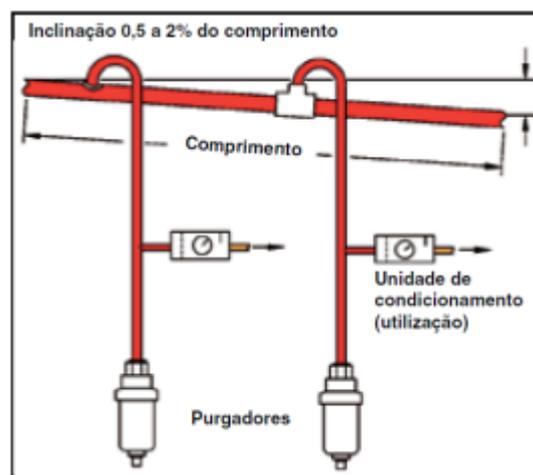
Fialho (2011) explica que na rede em circuito aberto, o ar comprimido é distribuído a partir de uma linha principal, por meio de uma direção única (linear) até os diferentes pontos de uso. É empregada quando há necessidade de pontos alimentares específicos que estão a uma certa distância do ponto de origem ou até localizado em áreas mais isoladas. Após passar pelas máquinas pneumáticas, o ar é expelido na atmosfera, não retornando ao sistema.

Já na rede em circuito fechado, o ar comprimido circula em um circuito contínuo, retornando ao ponto de origem após passar pelos diferentes pontos de uso, e, desta forma o ar é reciclado e tratado sempre que necessário, não sendo liberado na atmosfera. Nesse tipo de circuito a pressão é mais estável e uniforme ao longo da rede, sendo possível também criar novos pontos de consumo, não previstos no projeto inicial (FIALHO, 2011).

Por sua vez, a rede combinada é aquela em que há a mistura de elementos das redes de circuito aberto e fechado. Em outras palavras, esse tipo de sistema busca-se combinar linhas principais em circuito aberto com símbolos em circuito fechado permitindo assim, bloquear certas linhas de ar comprimido caso necessário. Além disso, na rede combinada é possível aproveitar o que há de melhor em ambas as configurações e, conseqüentemente obter eficiência, redução de custos, estabilidade da pressão e flexibilidade no sistema (SILVA, 2002).

Segundo Fialho (2011), a linha que alimenta cada máquina deve ser posicionada na parte superior da linha de distribuição para prevenir que o ar condensado presente na linha de distribuição vaze para a linha de alimentação. Diante desse fato, é recomendado que as tubulações sejam inclinadas de 0,5 a 2% no sentido do comprimento do tubo e no sentido do fluxo, para os drenos possam absorver as impurezas vindas das tubulações, ver Figura 04. (FARIA, 2007).

**Figura 4 – Instalação da linha de alimentação.**



FONTE: Parker Training (2006, p. 53).

## **2.5 Eficiência energética**

De acordo com Attfield (1999), há de se levar em conta a super importância do desenvolvimento sustentável como base para a eficiência energética que, por sua vez, subordina-se à responsabilidade de empresas e da sociedade, voltadas para o uso consciente dos recursos, para o que, há de se restringir o uso da energia por parte de segmentos sociais, assim como adaptar estilos de vida aos recursos ecológicos disponíveis na Terra.

Outro teórico, Capelli (2007, p.217), defende que a eficiência energética é um credo trabalhista que busca potencializar o uso da energia elétrica, o que se dá pela junção de fatores como recursos humano, indicação e economia com ferramentas destinadas a tal eficiência energética.

Nesse viés, entende-se o conceito relacionado à eficiência energética como a condição de se usar quantidades menores de energia para se obter o mesmo teor de iluminação, de aquecimento, de transporte e de outros serviços, cuja base é a energia (US National Policy Development Group, 2001).

### ***2.5.1 Aumento da eficiência energética***

No segmento industrial, a eficiência energética, deve estar presente desde a planta do projeto, para que o uso de compressores seja profícuo (HAHN, 2004).

Para Hahn (2004) depois da energia elétrica, o ar comprimido é, hoje, o meio que possui o maior consumo, além de ônus na indústria de transformação. No entanto, muitos sistemas que dele fazem uso, não contam com os cuidados necessários para tal, de modo que esse ar passa a ser um meio para desperdícios constantes.

## **2.6 Análise financeira**

Frequentemente, avalia-se os projetos na linha financeira, com base em hipóteses de fluxo de caixa futuro de tais projetos, para o que se leva em conta diversas variáveis. Assim, inicialmente, analisa-se conforme os valores mais adequados para as variáveis que foram elencadas, de modo que isso possa deferir o cálculo de indicadores determinantes. Em contrapartida, tais variáveis não contam com uma precisão de 100%, pois deve-se considerar que ela pode sofrer alteração para mais ou para menos, no que tange ao risco relativo ao retorno financeiro canalizado pelo projeto (BREALEY e MYERS, 1996).

Conforme asseveram Ross, Westerfield e Jaffe (2009), no que diz respeito a um investimento, esse deve, ao menos, abarcar seu custo de oportunidade, além do custo do capital que o financia, mesmo que esse seja capital próprio, capital de terceiros ou ambos. Nessa linha econômica, trata-se de uma categoria imprescindível para a viabilidade do projeto.

Assim, os processos avaliativos econômico-financeiros ajudam os gestores tomarem decisões, quando esses tiverem de decidir sobre o melhor investimento, o que é possível pelo viés da apuração de seus resultados (ASSAF NETO, 2012). Isso posto, destaca-se que para este trabalho, prevalecerá aquele método mais comumente usados na análise econômico-financeira: Valor Presente Líquido (VPL).

### **2.6.1 Valor presente líquido (VPL)**

O VPL – Valor Presente Líquido – também denominado por VAL – Valor Atual Líquido - é comumente o meio mais indicado quando se deseja fazer investimentos, cuja indicação pauta-se naquilo que o VPL leva em conta como o valor temporal do capital, ou seja, caso haja recurso disponível no presente pode gerar, se investido, juros. Ainda, o VPL, caso haja dois tipos de investimentos, possibilita uma decisão mais assertiva, pois ao levar em conta os fluxos futuros associados aos valores presentes, tais fluxos podem, simultaneamente, ser analisados e adicionados (FONSECA & BRUNI, 2009).

O valor presente líquido (VPL), segundo Ferreira (2000), baseia-se na atualização dos fluxos de caixa representado pelas entradas, saídas e lucros operacionais, em um intervalo de tempo definido, considerando uma taxa mínima de atratividade. Sendo alcançado pela fórmula (1), abaixo:

$$VPL = \left[ \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} \right] - C_0 \quad (1)$$

Assim:

$FC_t$  = Fluxo de caixa líquido de cada período;

$r$  = Taxa de desconto do projeto ou taxa mínima de atratividade;

$t$  = Período de tempo;

$n$  = Número total de períodos;

$C_0$  = Custo inicial do investimento.

O estudo do resultado do VPL irá conduzir a decisão quanto a aceitar ou rejeitar um projeto de investimento e, aquele que apresentar um valor presente líquido superior ou igual a zero, é

tido, como atraente e indica um retorno superior à taxa mínima de atratividade (ASSAF NETO, 2012).

Para Ross, Westerfield e Jaffe (2009) o resultado do VPL implica na escolha de um projeto de investimento quando comparado a outras opções de investimentos, dada uma taxa de desconto, sendo os projetos que produzem maior VPL mais atraentes. Para melhor entendimento quanto ao resultado do valor presente líquido, Ferreira (2000) explica:

- Quando o  $VPL > 0$  significa dizer que o projeto analisado apresentará lucro econômico;
- Quando o  $VPL = 0$  o projeto analisado apresentará lucro normal caso seja realizado e terá uma remuneração idêntica à taxa mínima de atratividade estipulada;
- Quando o  $VPL < 0$  entende-se que o projeto analisado apresentará prejuízo.

## 2.7 Análise do escoamento viscoso incompressível em dutos

O estudo do escoamento dos fluidos em sistemas de ar comprimido pode empregar a análise de escoamento de fluidos incompressíveis e as equações básicas de conservação da massa e energia para regime permanente. Apesar de o ar ser um fluido compressível, em muitas situações práticas como em sistemas de tubulações de ar comprimido, os efeitos da compressibilidade podem ser negligenciados, especialmente em sistemas de baixa velocidade e pequena variação de pressão (FOX, McDONALD E PRITCHARD, 2006). Portanto, para simplificar a análise, podem ser aplicados os princípios da mecânica dos fluidos para escoamento incompressível e utilizadas as equações de conservação da massa e da energia para regime permanente. Essas equações, como a equação da continuidade (conservação de massa) e a equação de Bernoulli, permitem compreender o comportamento do escoamento de ar comprimido, logo a conservação da massa para as diferentes tubulações do sistema de ar comprimido pode ser dada na equação (2), abaixo:

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} p \, dv = \sum \dot{m}_{final} - \sum \dot{m}_{inicial} = 0 \quad (2)$$

Para quantificar a relação entre as grandezas do escoamento, tais como pressão, velocidade e altura do fluido emprega-se a equação (3) da energia com a mesma notação piezométrica da equação de Bernoulli, considerando desprezíveis as variações da energia interna e as trocas de calor, como se segue:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_e + h_p \quad (3)$$

Em que  $h_e$  e  $h_p$  são, respectivamente, os termos de altura piezométrica do trabalho eixo de máquinas motoras ou geradoras e do trabalho viscoso ou perda de carga na tubulação. O termo  $p/\gamma$  é chamado altura de pressão e o termo  $V^2/2g$  é designado como altura de velocidade. A perda de carga na tubulação  $h_p$  é dada pelo fator de atrito de Darcy na equação (4), abaixo:

$$h_p = \left( f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

Essa equação contabiliza tanto as perdas em comprimentos retos,  $f \cdot L / D$ , quanto as perdas de carga localizadas na tubulação devido aos acessórios,  $\sum K$ , em que  $f$  é o fator de atrito dado pela equação (5) de Colebrook para escoamento turbulento:

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/d}{3,7} + \frac{2,51}{Re_d \cdot f^{1/2}} \right) \quad (5)$$

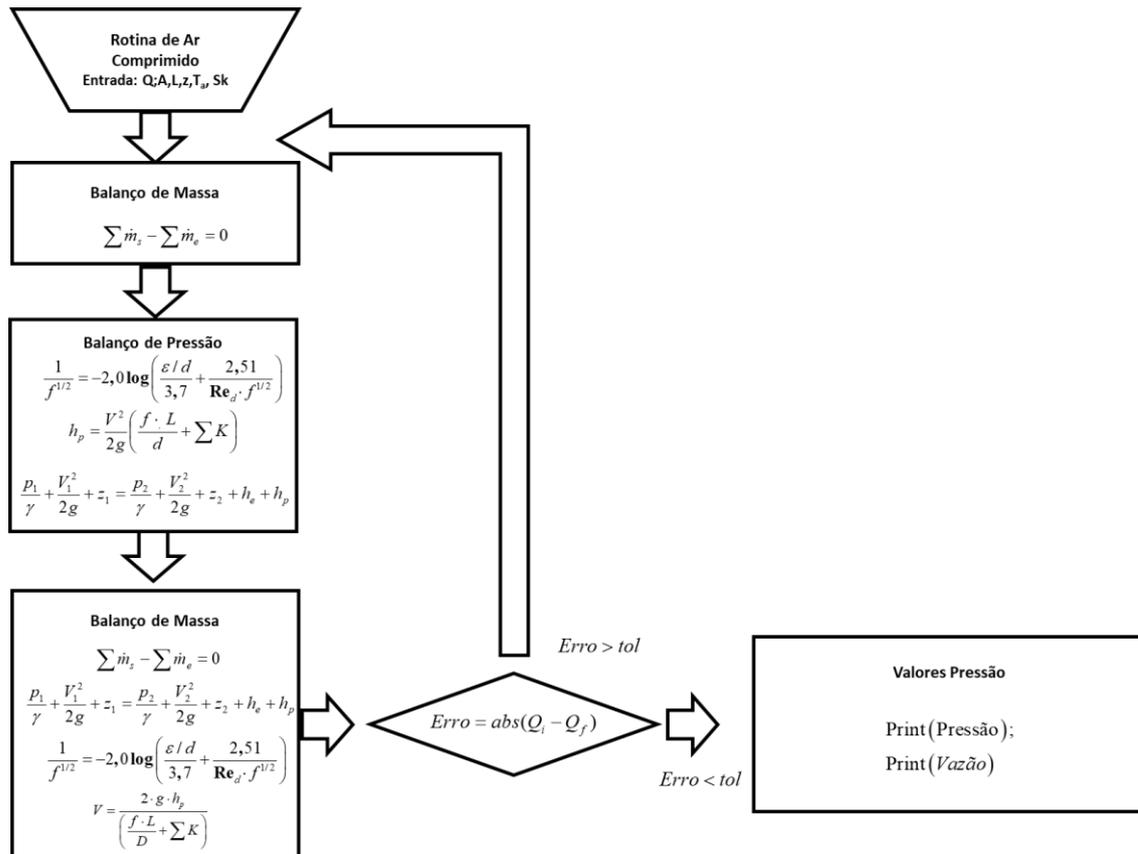
Em que  $Re$  é o número de Reynolds na tubulação e  $\varepsilon$  é a rugosidade na tubulação.

A análise energética do acoplamento da tubulação de ar comprimido com o compressor de ar é um processo relativamente simples, pois a relação de pressão de compressor de pistão é independente das perdas de carga na tubulação.



Para a modelagem computacional utilizou o GNU Octave para implementar as equações de Darcy e de Colebrook, associada à equação da energia e conservação de massa para avaliar as perdas de pressão e os balanços de massa nas tubulações definindo as vazões em cada ramal da tubulação, conforme o fluxograma da Figura 6.

**Figura 6 - Fluxograma da rotina computacional.**



FONTE: Autoria própria (2024).

A rotina computacional consiste inicialmente na entrada dos parâmetros de dimensão da tubulação, assim como a demanda necessária de vazão. Em seguida realiza-se o balanço de massa em cada ramal periférico da tubulação contabilizando a vazão nos ramais principais, com os resultados da vazão determinam-se as pressões em cada ramal da tubulação empregando as equações de energia, de Darcy e Colebrook, esse cálculo é realizado da pressão do compressor para os ramais periféricos. Com as pressões em cada ramal periférico é possível determinar novamente a vazão nesses ramais. Assim realiza-se o cálculo iterativo até que o desvio quadrático médio das vazões seja menor que a tolerância.

### **3.3 Procedimentos metodológicos - Etapas**

Ao compreender os desafios específicos enfrentados por essa usina sucroalcooleira e analisar as práticas atuais relacionadas ao uso do ar comprimido, o estudo busca não apenas destacar áreas de ineficiência, mas também propor soluções viáveis e estratégias para aprimorar a eficiência energética.

A análise detalhada do sistema de ar comprimido da usina, incluindo seus componentes e operação, permite identificar os principais pontos de perda de energia e formular medidas eficazes para minimizá-las. A partir da modelagem computacional da demanda de ar comprimido, baseada nos equipamentos instalados na planta, a pesquisa identifica oportunidades de melhorias e quantifica o potencial de economia de energia.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização da empresa

O estudo foi realizado no setor da fábrica de levedura de uma usina sucroalcooleira com o quadro de colaboradores acima de 2500, localizada no interior do estado de Goiás, com ênfase em uma instalação de sistema de ar comprimido, ocupando uma área de 708,47m<sup>2</sup>, sob condições ambientais de temperatura média de 30°C±4°C, sendo utilizado o sistema de ar comprimido para acionamento de válvulas pneumáticas bray séries 92/93.

### 4.2 Mapeamento da realidade empresarial

A investigação da eficiência energética e as vantagens econômicas associadas ao sistema de ar comprimido utilizado no setor de levedura, buscou coletar as informações sobre gastos operacionais e pressões do sistema durante uma inspeção in loco na referida instalação, conforme Tabelas 1 e 2.

Na Tabela 1 representa os valores investidos para a realização do projeto de sistema de ar comprimido na usina sucroalcooleira, objetivo deste estudo.

**Tabela 1 – Gasto total do sistema de ar comprimido.**

<b>Material</b>	<b>Valor</b>
Compressor parafuso (METALPLAN TOTALPACK FLEX DD 100)	R\$ 161.405,00
Tubulação e Acessórios	R\$ 201.025,00
Serviços de montagem	R\$ 75.207,00
<b>Total</b>	<b>R\$ 437.637,00</b>

FONTES: Pesquisa de campo (2024).

A Tabela 2 representa as pressões para abertura e fechamento das válvulas pneumáticas do projeto de sistema de ar comprimido na usina sucroalcooleira.

**Tabela 2 – Pressões do sistema de ar comprimido.**

<b>Ramais</b>	<b>Pressão de abertura (kPa)</b>	<b>Pressão de fechamento (kPa)</b>
II-1	620,76	586,44
III-1	620,76	241,24
V-1	620,76	206,92
VII-1	620,76	378,54
VI-1	551,13	344,21
X-1	686,47	344,21
XI-1	551,13	378,54
XII-1	620,76	530,54
XIV-1	620,76	448,16
XIII-1	620,76	378,54

FONTE: Pesquisa de campo (2024).

Os resultados da simulação do balanço de massa e das variações de pressão no sistema de ar comprimido da seção de levedura estão apresentados na Tabela 2. Esta simulação permitiu determinar vazões em cada ramal da tubulação baseada na demanda de ar comprimido em cada ponto de consumo da planta de levedura conforme exposta na Tabela 3.

**Tabela 3 – Vazões nas tubulações da planta de ar comprimido.**

<b>Ramais</b>	<b>Seção I (m³/h)</b>	<b>Seção II (m³/h)</b>	<b>Seção III (m³/h)</b>	<b>Seção IV (m³/h)</b>
1	58.1861	58.1861	44.5954	13.5907
2	6.7954			
3	6.7954			
4	24.2093			
5	6.7954			
6	6.7954			
7	6.7954			
8	12.1046	8.0698	4.0349	
9	12.1046	8.0698	4.0349	
10	4.0349			
11	4.0349			
12	4.0349			
13	4.0349			
14	4.0349			

FONTE: Pesquisa de campo (2024).

A Tabela 3 mostra que as maiores vazões concentram-se na instalação em formato de anel, ramais 4, 8 e 9, sendo que as ramificações de descida são de 10 a 14 nos anéis.

A distribuição de pressão calculadas a partir das demandas de vazões da Tabela 03 e considerando duas condições de operação de pressão de saída do compressor 9,0 bar, conforme aplicado, e a proposição de 7,5 bar, entre parênteses, estão explícitas na Tabela 04.

**Tabela 4 – Distribuição de pressão nas tubulações da planta de ar comprimido.**

Ramais	Ponto I (kPa)	Ponto II (kPa)	Ponto III (kPa)	Ponto IV (kPa)	Ponto V (kPa)
1	900.00 (750.00)	899.98 (749.97)	899.94 (749.93)	899.93 (749.92)	899.91 (749.90)
2	899.94 (749.93)	633.00 (633.00)			
3	899.94 (749.93)	633.00 (633.00)			
4	899.93 (749.92)	899.82 (749.81)			
5	899.93 (749.92)	633.00 (633.00)			
6	899.91 (749.90)	700.00 (700.00)			
7	899.91 (749.90)	633.00 (633.00)			
8	899.82 (749.81)	899.78 (749.77)	899.78 (749.77)	899.78 (749.77)	
9	899.82 (749.81)	899.76 (749.75)	899.76 (749.75)	899.76 (749.75)	
10	899.78 (749.77)	562.00 (562.00)			
11	899.76 (749.75)	700.00 (700.00)			
12	899.78 (749.77)	633.00 (633.00)			
13	899.76 (749.75)	562.00 (562.00)			
14	899.76 (749.75)	562.00 (562.00)			

FONTE: Pesquisa de campo (2024).

A Tabela 4 mostra que as duas condições de pressão atendem as pressões finais exigidas nos equipamentos, ver pontos finais apresentados em um único valor, estimando uma redução na potência de operação da unidade de compressão de 10,39%.

### 4.3 Aplicação de metodologias e/ou ferramentas da engenharia de produção

Realizando os balanços de massa e de pressão, considerando a pressão de 9,0 bar e as condições de pressão antes da unidade de Lubrifil de 7,0 bar, têm-se as vazões máximas na Tabela 05. Os valores entre parênteses representam a demanda de fluxo de massa.

**Tabela 5 – Vazões nas tubulações da planta de ar comprimido.**

Ramais	Seção I (m <sup>3</sup> /h)	Seção II (m <sup>3</sup> /h)	Seção III (m <sup>3</sup> /h)	Seção IV (m <sup>3</sup> /h)
1	3590.3000 (58.1861)	3590.3000 (58.1861)	2079.8000 (44.5954)	411.5800 (13.5907)
2	811.1200 (6.7954)			
3	699.3700 (6.7954)			
4	281.3900 (24.2093)			
5	1386.9000 (6.7954)			
6	154.8300 (6.7954)			
7	256.7500 (6.7954)			
8	151.9400 (12.1046)	62.7600 (8.0698)	20.8570 (4.0349)	
9	129.4500 (12.1046)	54.4230 (8.0698)	20.8570 (4.0349)	
10	89.1800 (4.0349)			
11	75.0230 (4.0349)			
12	41.9030 (4.0349)			
13	33.5650 (4.0349)			
14	20.8570 (4.0349)			

FONTE: Pesquisa de campo (2024).

A Tabela 5 evidencia que a tubulação de arranjo de ar comprimido tem uma capacidade muito acima dos equipamentos instalados na planta de ar comprimido indicando uma boa capacidade de expansão do consumo de ar comprimido da planta, além de um potencial de redução de custos para manutenções futuras ou no caso de redimensionamento da instalação.

Logo, considerando essa capacidade excedente e a necessidade de otimizar o consumo de energia o compressor de ar comprimido foi identificado como o equipamento com maior potencial de aprimoramento.

A empresa opera um compressor METALPLAN TOTALPACK FLEX DD 100, com potência elétrica de 73,55 kW e caudal de ar regulável entre 7,5 bar, 9 bar, 11 bar e 12,5 bar. A análise do sistema indicou que a demanda de ar comprimido pode ser satisfeita com uma vazão reduzida para a pressão de 7,5 bar, sem comprometer a operação da planta, conforme dados do fabricante do compressor (Tabela 6).

**Tabela 6 – Pressão nominal de trabalho do compressor.**

<b>bar (psi)</b>	<b>pcm (m<sup>3</sup>/h)</b>	
7,5 (108)	134 - 529	(227 - 900)
9 (130)	133 - 476	(226 - 809)
11 (159)	131 - 404	(222 - 687)
12,5 (181)	130 - 352	(221 - 598)

FONTE: Manual do compressor de parafuso METALPLAN POWERPACK/TOTALPACK FLEX DD 100 (2013).

A Tabela 6 mostra que o compressor é dimensionado para atender a demanda máxima de ar comprimido da instalação, para as duas condições de 9 e 7,5 bar.

Fazendo uma análise financeira comparativa dos resultados do consumo de energia elétrica do sistema de ar comprimido para dois cenários atuais, com demanda de 58,1861 m<sup>3</sup>/h e pressões para 9.0 bar e 7.5bar e também outros dois cenários de demanda nominal do compressor de 360m<sup>3</sup>/h para a pressão de 9,0bar e 360m<sup>3</sup>/h para a pressão de 7,5 bar e, considerando o valor da energia distribuída no estado de Goiás no valor de 0,71063 kW/h pela equatorial energia e o valor do ar comprimido, sendo ele de 1m<sup>3</sup> ar ≈ R\$ 0,055 de acordo com a C.B.A– Central Brasileira de Automação, têm-se os seguintes resultados para os cenários na Tabela 7.

**Tabela 7 – Cenários dos custos e receita de consumo de energia elétrica.**

<b>Cenário</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>
Pressão Operação	9.0Bar	7.5Bar	9.0Bar	7.5Bar
Demanda de Ar	58,1861 m <sup>3</sup> /h	58,1861 m <sup>3</sup> /h	360,000 m <sup>3</sup> /h	360,000 m <sup>3</sup> /h
Eficiência do compressor	94,6%;	94,6%;	94,6%;	94,6%;
Potência relativa do compressor (Demanda de ar)	5,6962kW	5,1601kW	35,2427kW	31,1928kW
Custo <sub>hora</sub>	R\$ 4,05	R\$ 3,67	R\$ 25,05	R\$ 22,17
Custo <sub>Anual</sub>	R\$ 35.483,86	R\$ 32.144,00	R\$ 219.540,24	R\$ 194.312,00
Receita <sub>anual</sub>	R\$ 28.053,26	R\$ 28.053,26	R\$ 173.566,80	R\$ 173.566,80
Lucro <sub>anual</sub>	<b>-R\$ 7.430,60</b>	<b>-R\$ 4.090,74</b>	<b>-R\$ 45.973,44</b>	<b>-R\$ 20.745,20</b>

FONTES: Pesquisa de campo (2024).

A Tabela 7 mostra que o cenário 2 é mais eficiente financeiramente ao apresentar uma menor perda financeira que o cenário 1, cerca de 81,6% de redução, devido ao menor consumo de energia para atender as pressões de operação das válvulas. Isso demonstra que o cenário 2 é mais eficaz ao utilizar a energia de forma econômica para realizar o trabalho necessário, minimizando as perdas financeiras associadas ao seu consumo de energia.

Sendo assim, ao reduzir a vazão de 9 bar para 7,5 bar, atende as necessidades de pressão e capacidade da planta, mas não gera lucro para a empresa. Portanto, utilizou-se a análise financeira do VPL para determinar um custo mínimo do ar comprimido nos 4 cenários possíveis, logo realizou-se o levantamento de dados da taxa SELIC de 11,15% a.a. segundo o BCB – Banco Central do Brasil, como taxa mínima de atratividade.

Sendo assim, fez-se a simulação da análise financeira para quatro cenários de maneira a estimar os preços mínimos de venda do ar comprimido a fim de zerar o VPL no período de 10 anos, conforme mostra a Tabela 8.

**Tabela 8 – VPL do projeto de ar comprimido.**

Cenário	I	II	III	IV
Pressão Operação	9.0Bar	7.5Bar	9.0Bar	7.5Bar
Demanda de Ar	58,1861 m <sup>3</sup> /h	58,1861 m <sup>3</sup> /h	360,000 m <sup>3</sup> /h	360,000 m <sup>3</sup> /h
Eficiência do compressor	94,6%;	94,6%;	94,6%;	94,6%;
Potência relativa do compressor (Demanda de ar)	5,6962kW	5,1601kW	35,2427kW	31,1928kW
Custo <sub>m<sup>3</sup></sub>	R\$ 0,069604	R\$ 0,063073	R\$ 0,069583	R\$ 0,061583
Custo <sub>Annual</sub>	R\$ 35.483,86	R\$ 32.144,00	R\$ 219.540,24	R\$ 194.312,00
Receita <sub>anual</sub>	R\$ 28.053,26	R\$ 28.053,26	R\$ 173.566,80	R\$ 173.566,80
Lucro <sub>anual</sub>	<b>-R\$ 7.430,60</b>	<b>-R\$ 4.090,74</b>	<b>-R\$ 45.973,44</b>	<b>-R\$ 20.745,20</b>
Ano	$\frac{FC_t}{(1+r)^t}$	$\frac{FC_t}{(1+r)^t}$	$\frac{FC_t}{(1+r)^t}$	$\frac{FC_t}{(1+r)^t}$
0	<b>-R\$ 437.637,00</b>	<b>-R\$ 437.637,00</b>	<b>-R\$ 437.637,00</b>	<b>-R\$ 437.637,00</b>
1	R\$ 67.277,92	R\$ 67.277,92	R\$ 67.277,92	R\$ 67.277,92
2	R\$ 60.528,94	R\$ 60.528,94	R\$ 60.528,94	R\$ 60.528,94
3	R\$ 54.456,99	R\$ 54.456,99	R\$ 54.456,99	R\$ 54.456,99
4	R\$ 48.994,14	R\$ 48.994,14	R\$ 48.994,14	R\$ 48.994,14
5	R\$ 44.079,30	R\$ 44.079,30	R\$ 44.079,30	R\$ 44.079,30
6	R\$ 39.657,49	R\$ 39.657,49	R\$ 39.657,49	R\$ 39.657,49
7	R\$ 35.679,25	R\$ 35.679,25	R\$ 35.679,25	R\$ 35.679,25
8	R\$ 32.100,09	R\$ 32.100,09	R\$ 32.100,09	R\$ 32.100,09
9	R\$ 28.879,98	R\$ 28.879,98	R\$ 28.879,98	R\$ 28.879,98
10	R\$ 25.982,88	R\$ 25.982,88	R\$ 25.982,88	R\$ 25.982,88
Total	R\$ 437.637,00	R\$ 437.637,00	R\$ 437.637,00	R\$ 437.637,00
VPL	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00

FONTES: Pesquisa de campo (2024).

A Tabela 8 mostra que o projeto analisado não apresentará lucro normal, mas os valores mínimos estimados para a venda do ar comprimido nos quatro cenários são ligeiramente superiores quando comparados ao valor de mercado, no máximo de 26,5% para a pressão de 9bar e 14,6% para a pressão de 7.5 bar. Comparativamente observa uma pequena redução no custo do ar comprimido quando da operação da instalação na condição de máxima capacidade, cenários 4 e 5. Assim recomenda-se para o projeto das instalações de ar comprimido o estudo detalhado do prognóstico da expansão da demanda da instalação, pois o investimento em instalações de maior capacidade inviabiliza a análise financeira e incrementa muito os custos de operação da instalação ao longo do tempo.

## 5 CONCLUSÕES

O ar comprimido é um suprimento sustentável importante para a indústria, pois permite a automação dos processos, porém devido aos custos elevados de operação das redes de ar comprimidos o dimensionamento destas instalações requer o conhecimento detalhado dos equipamentos e processos para aprimorar a eficiência energética da instalação.

A análise dos balanços de pressão e de massa na instalação demonstra a capacidade favorável de expansão da instalação, além da possibilidade de se reduzir a pressão de operação e, conseqüentemente minimizar o consumo de energia. Hahn (2004) adverte sobre a importância de iniciar uma planta de projeto de ar comprimido pela especificação correta de pressão e da vazão do sistema.

Logo, o equipamento a sofrer uma intervenção para o aumento da eficiência energética foi o compressor de ar comprimido, uma vez que a utilização de pressão de 7,5 bar atendia o fornecimento adequado do ar comprimido segundo a filosofia da US National Policy Development Group (2001). Com essa adequação observou-se a redução de 10% no custo de consumo de energia no sistema de ar comprimido e uma redução do impacto financeiro da ordem de 81,6%.

A utilização das ferramentas de análise financeira, permitiu visualizar os impactos econômicos do dimensionamento e da operação na distribuição de ar comprimido seguindo Brealey e Myers (1996). Assim, como a demanda atual da empresa é muito inferior, ficou demonstrado que a planta de ar comprimido com capacidade de vazão muito superior da demanda exigida, inviabiliza financeiramente os custos de fornecimento de ar comprimido. Portanto, recomenda-se nos projetos de instalações de ar comprimido a análise financeira do investimento de maneira a atender a demanda real de pressão e de vazão da instalação e também uma estimativa razoável de expansão da demanda.

De maneira geral esse trabalho demonstrou a importância de um estudo detalhado das demandas de pressão e de vazão de uma instalação de ar comprimido utilizando as equações de balanço de energia e massa, além da importância da análise financeira para avaliar o impacto econômico dos projetos de instalações industriais. Estas informações podem ser úteis para um processo de tomada de decisão mais eficiente sobre gestão energética da empresa. Além disso, para trabalhos futuros pode-se estender a metodologia deste trabalho a outros setores da empresa que empregam ar comprimido, assim como a avaliação da eficiência energética em outras tubulações de suprimentos, tais como: vapor, água e fertirrigação.

## REFERÊNCIAS

- ASSAF NETO, Alexandre. **Finanças corporativas e valor**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2012.
- ROSS, Stephen A.; WESTERFIELD, Randolp W.; JAFFE, Jeffrey F. **Administração financeira**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- LINSINGEN, I. V. **Curso de sistema hidráulicos**, Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Mecânica. 1989.
- Fox, R. W.; McDonald, A. T.; Pritchard, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: LTC, 2006.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Séries Históricas: Taxas de Juros Selic**. Brasília: Banco Central do Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/selicdadosdiarios>. Acesso em: 08 de mar. de 2024.
- EQUATORIAL ENERGIA GOIÁS. **Valor de Tarifas e Serviços**. Goiânia: Equatorial Energia Goiás, 2024. Disponível em: <https://go.equatorialenergia.com.br/valor-de-tarifas-e-servicos/#demais-classes>. Acesso em: 09 de mar. de 2024.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safras: Cana: 2023/24**: Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 28 out. 2024.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Ranking de produção de cana, açúcar e álcool**: região centro-sul: safra 2023/2024. São Paulo, 2023a.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Açúcar e álcool do Brasil**: commodities da energia e do meio ambiente, São Paulo, 2023.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Potencial de cogeração com resíduos da cana-de-açúcar**: sua compatibilidade com o modelo atual. São Paulo, 2023.
- RODRIGUES, L. G. S. **Análise energética de diferentes sistemas de cogeração com bagaço de cana-de-açúcar**. 2005. f. 70 – 103. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005
- ROCHA, C.R.; MONTEIRO, M.A.G. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**: manual prático. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.
- METALPLAN. **Manual de ar comprimido**. 4ª ed. 2010.
- PACHECO, Acordi Vasques, Eduardo. **Eficiência energética de compressores de parafuso com variador de velocidade**. Estudo de caso/ Eduardo Acordi Vasques Pacheco. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2018.
- SENNIAPPAN, A.P. **“Baselining a compressed air system—an expert systems approach”**. Dissertação, Morgantown, West Virginia University, USA, 2004.
- Mckane, A. **Improving compressed air system performance: A sourcebook for industry**. US DOE. Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL Report #: LBNL-43888 Update, 2003. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/1627b9vv>
- KARMOUCHE, A. R. **Análise da eficiência energética em compressores a pistão em sistemas de ar comprimido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.
- FIALHO, A. B. **Automação pneumática: Projetos, dimensionamento e análise de circuitos**. 7. ed. São Paulo: Érica, 2011.
- PARKER TRAINING. **Dimensionamento de redes de ar comprimido**. Jacareí, 2006. Apostila M1004 BR.

BOSCH. **Tecnologia de ar comprimido**. Campinas, 2008.

SILVA, E. C. N. PMR2481 – **Sistemas Fluidomecânicos**. Apostila Pneumática. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2002.

CORADI, F. E. **Análise energética e econômica na rede de distribuição de ar de uma indústria de autopeças**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2011.

SANTOS, Adriano Almeida; SILVA, Antônio Ferreira da. **Automação Pneumática**. 3.ed. Porto-Portugal. Publindústria. 2014.

SANTOS, A. A. et al. **Automação Pneumática: Produção, tratamento e distribuição de ar comprimido**. 3º Ed. Porto. 2014.

FARGON. **Manual de Tratamento de Ar Comprimido**. São Paulo, 2006.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentos de engenharia termodinâmica**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

RODRIGUES, P.S.B. **Compressores industriais**. 1a Edição. Rio de Janeiro: EDC – Ed. Didática e Científica, 1991. 1 volume, 515 páginas.

JESUS, C. S. A. D. **Otimização energética em uma unidade industrial – O caso da Cerutil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica / Energia e Automação Industrial) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu, 2012.

FARIA, R. R. D. **Elementos de pneumática e automação, classificação e dimensionamento de atuadores: Aplicação ao caso de plataformas de embarque de deficientes físicos em veículos do transporte urbano coletivo**. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

Attfield, Robin. *The ethics of global environment*. Edinburgh University Press, Edinburgh, 1999.

US Report of the National Policy Development Group. “Using energy wisely. Increasing Energy Conservation and Efficiency”. In: *Reliable affordable and environmentally sound energy for the American Future*. Washington, may, 2001.

HAHN, A., **Eficiência energética industrial: compressores: guia avançado**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2004.

CAPELLI, A. **Energia elétrica para sistemas automáticos da produção**. São Paulo: Erica, 2007.

Brealey, Richard A.; Myers, Stewart C. *Principles of Corporate Finance*. 5. ed., McGraw-Hill, 1996.

FERREIRA, R.G. **Matemática financeira aplicada: ao mercado de capitais, administração financeira e engenharia econômica**. 5ª ed. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

BRUNI, A. L.; FONSECA, J.J.S. **Estatística aplicada à gestão empresarial**. São Paulo: Atlas, 2009.