



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
Instituto de Ciências e Engenharia – Câmpus de Itapeva

**JHONATTAN RODRIGUES DOS SANTOS**

**Cálculo para o desenvolvimento de rede de ar comprimido para uma linha de  
produção de batata chips**

Itapeva - SP  
2023



JHONATTAN RODRIGUES DOS SANTOS

**Cálculo para o desenvolvimento de rede de ar comprimido para uma linha de produção de batata chips**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Conselho de Curso de Engenharia Industrial Madeireira, da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Câmpus de Itapeva, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Industrial Madeireira.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Villas Boas

Itapeva - SP  
2023

S237c Santos, Jhonattan Rodrigues dos  
Cálculo para o desenvolvimento de rede de ar comprimido para uma linha de produção de batata chips / Jhonattan Rodrigues dos Santos. -- Itapeva, 2023  
53 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva  
Orientador: Daniel Villas Boas

1. Ar comprimido. 2. Compressor. 3. Dimensionamento de rede de distribuição. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

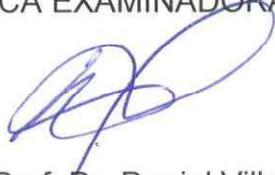
Essa ficha não pode ser modificada.

**JHONATTAN RODRIGUES DOS SANTOS**

**CÁLCULO PARA O DESENVOLVIMENTO DE REDE DE AR  
COMPRIMIDO PARA UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE BATATA  
CHIPS**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial - Madeira, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Dr. Daniel Villas Bôas  
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.



2º Examinador: Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza  
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.



3º Examinador: Prof. Dr. Antonio Francisco Savi  
Pesquisadora - Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 24/11/2023.

Dedico de modo especial a minha família,  
pai, mãe e minha esposa pela  
compreensão, carinho e apoio incansável.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha família nas figuras de meus pais Edio e Rose e minha esposa Ana Laura, pelo convívio alegre durante todos esses anos de vida, além do suporte financeiro, moral e psicológico para meu aperfeiçoamento pessoal e profissional ao longo dos anos.

Ao meu orientador, Prof<sup>o</sup>. Dr. Daniel Villas Boas que jamais deixou de compartilhar seu conhecimento, disposição e dedicação para a realização do estudo aqui apresentado.

Aos professores que fizeram parte do meu curso, onde contribuíram com suas experiências, sabedoria e conhecimento para o aproveitamento do curso.

Aos funcionários do Campus de Itapeva da UNESP pela dedicação, atenção e disposição em ajudar sempre que solicitados.

Aos amigos, colegas e conhecidos que fizeram parte desse período.

“Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês, diz o Senhor, planos de fazê-los prosperar e não de causar dano, planos de dar a vocês esperança e um futuro.”

(BÍBLIA, Jeremias, 29:11).

## RESUMO

O ar comprimido é uma forma de energia de ampla utilização no setor industrial, empregada em diversos processos e equipamentos. É resultado da compressão do ar, complementado por processos de tratamento com finalidade de oferecer o melhor desempenho para os equipamentos. O objetivo geral deste estudo é dimensionar uma rede de distribuição de ar comprimido, que atenda a demanda de pressão e vazão requeridas pela implantação do projeto de uma empresa alimentícia. Para a realização do trabalho foi necessário fazer um embasamento teórico e posteriormente a coleta de informações na empresa, tais como: seleção dos equipamentos que utilizam o ar comprimido, dimensões da unidade de produção e escolha das singularidades. Uma análise nos catálogos dos fabricantes auxiliou na obtenção de especificações técnicas dos equipamentos pneumáticos. Por meio das informações foi apresentado o layout da rede de ar comprimido, cálculos dos diâmetros das linhas de distribuição e alimentação, o tipo do compressor adequado. Através do dimensionamento da rede de ar comprimido, verificou-se que o sistema atende as necessidades dos equipamentos, proporciona um bom desempenho e oferece maior vida útil aos equipamentos pneumáticos.

Palavras-chave: Ar comprimido; Compressor; Dimensionamento de rede de distribuição.

## **ABSTRACT**

Compressed air is a form of energy widely used in the industrial sector, used in various processes and equipment. It is the result of air compression, complemented by treatment processes in order to offer the best performance for the equipment. The general objective of this study is to design a compressed air distribution network that meets the pressure and flow demands required by the implementation of a food company project. To carry out the work, it was necessary to provide a theoretical basis and then collect information from the company, such as: selection of equipment that uses compressed air, dimensions of the production unit and choice of singularities. An analysis of manufacturers' catalogs helped to obtain technical specifications for pneumatic equipment. Through the information, the layout of the compressed air network was presented, calculations of the diameters of the distribution and supply lines, and the type of suitable compressor. By sizing the compressed air network, it was verified that the system meets the needs of the equipment, provides good performance and offers a longer useful life for pneumatic equipment.

Keywords: Compressed air; Compressor; Distribution network sizing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - CUSTO DE PROPRIEDADE DE UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO EM 10 ANOS.....	16
FIGURA 2 – PRESSÕES ABSOLUTA E MANOMÉTRICA, MOSTRANDO NÍVEIS DE REFERÊNCIA.....	17
FIGURA 3 – TIPOS DE COMPRESSORES .....	21
FIGURA 4 – FAIXAS DE OPERAÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE COMPRESSORES.....	21
FIGURA 5 – COMPRESSOR DE ÊMBOLO MONOESTÁGIO E MULTI-ESTÁGIO.....	22
FIGURA 6 – COMPRESSOR DE MEMBRANA.....	23
FIGURA 7 – COMPRESSOR DE PALHETAS.....	23
FIGURA 8 – COMPRESSOR DE PARAFUSO.....	24
FIGURA 9 – COMPRESSOR ROOTS.....	24
FIGURA 10 – COMPRESSOR AXIAL.....	25
FIGURA 11 – COMPRESSOR RADIAL .....	25
FIGURA 12 – GERAÇÃO, TRATAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DO AR COMPRIMIDO .....	26
FIGURA 13 – INSTALAÇÃO TÍPICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE AR COMPRIMIDO.....	27
FIGURA 14 – CONEXÃO RECOMENDÁVEL ENTRE TUBULAÇÃO PRINCIPAL E PONTO DE CONSUMO.....	31
FIGURA 15 – DIMENSÕES DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO E ALIMENTAÇÃO.....	34
FIGURA 16 – VISTA SUPERIOR DA NOVA UNIDADE FABRIL.....	35
FIGURA 17 – LOCAL DA INSTALAÇÃO DO COMPRESSOR E RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO. ....	35
FIGURA 18 – VISTA DA LINHA DE FRITURA. ....	36
FIGURA 19 – VISTA DA LINHA DE EMPACOTAMENTO.....	36
FIGURA 20 – VISTA GERAL DO ESTOQUE.....	37
FIGURA 21 – TABELA A.5 NORMA ASTM A 120 SCHEDULE 40.....	41
FIGURA 22 – COMPRIMENTO DAS SINGULARIDADES.....	42
FIGURA 23 – COMPRESSOR DE AR PARAFUSO.....	46

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – SINGULARIDADES SELECIONADOS.....	37
QUADRO 2 – EQUIPAMENTOS PNEUMÁTICOS.....	38
QUADRO 3 – ESPECIFICAÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO.....	40
QUADRO 4 – ESPECIFICAÇÃO DA VAZÃO E PRESSÃO DO SISTEMA.....	45

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VAZÃO DE AR.....	39
TABELA 2 – DIMENSÕES DAS SINGULARIDADES.....	43
TABELA 3 – DIMENSÕES DAS SINGULARIDADES DA REDE DE ALIMENTAÇÃO.....	44
TABELA 4 – DADOS ADICIONAIS DO COMPRESSOR.....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$L_T$	Comprimento Total
$L_1$	Comprimento Linha
$L_2$	Comprimento Singularidade
Q	Volume de Ar Corrente
N	Número de Linhas
P	Pressão
V	Volume
T	Temperatura
m	Massa
R	Constante do Gás para o Ar
$\rho$	Densidade
Pabs	Absoluta
Patm	Atmosférica
Pman	Manométrica
GWH	Giga Whats Hora
J	Joule
kg	Quilograma
K	Kelvin
°C	Grau Celsius
in	Polegadas
cm <sup>2</sup>	Centímetro Quadrado
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
h	Hora
cm	Centímetros
kgf	Quilograma Força
mm	Milímetros
pcm	Pé cúbico por minuto
Hp	House power (cavalo vapor)
kW	Quilowatt

lbf/in <sup>2</sup>	Libra força por polegada quadrada
L	Largura
C	Comprimento
A	Altura
l	Litro

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>15</b>
2.1. Objetivo específico .....	15
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
3.1. Alguns usos gerais do ar comprimido .....	16
3.2. Pressão .....	17
3.3. Gás ideal .....	17
3.4. Tipos de secadores de ar .....	19
3.4.1. Secadores deliquescentes.....	19
3.4.2. Secadores dessecantes regenerativos.....	19
3.4.3. Secadores dessecantes refrigerados .....	19
3.5. Filtros de ar.....	20
3.6. Compressores .....	20
3.6.1. Compressores de êmbolo.....	22
3.6.2. Compressor de membrana. ....	22
3.6.3. Compressores rotativos. ....	23
3.6.4. Turbos-Compressores .....	25
<b>4. SISTEMA DE AR COMPRIMIDO</b> .....	<b>26</b>
4.1. Objetivo do sistema de ar comprimido .....	26
4.2. Projetando um sistema de ar comprimido .....	27
4.2.1. Estabelecer a capacidade necessária do compressor.....	28
4.2.2. Selecionar o número de compressores .....	28
4.2.3. Regulagem do sistema de ar comprimido .....	29
4.2.4. Seleção do compressor: tipo e fabricante.....	30
4.2.5. Checagem dos sistemas de distribuição de ar comprimido .....	30
<b>5. METODOLOGIA</b> .....	<b>32</b>
5.1. Métodos e Técnicas utilizadas .....	32
5.2. Coletas de dados.....	33
5.2.1. Dimensões (da fábrica, rede de distribuição e singularidades) .....	33
5.2.2. Vazão do sistema.....	37
5.2.3. Queda pressão admitida .....	39

5.2.4. Pressão de regime.....	39
6. RESULTADOS .....	40
6.1. Dimensionamento da tubulação .....	40
6.2. Dimensionamento do compressor .....	45
7. CONCLUSÕES.....	47
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
REFERÊNCIAS.....	49

## 1. INTRODUÇÃO

O ar comprimido tem uma longa história de utilização, sendo anterior a Da Vinci, que em diversos inventos dominou e usou o ar. No Velho Testamento, são encontradas referências ao emprego do ar comprimido: na fundição de prata, ferro, chumbo e estanho. A história demonstra que há mais de 2000 anos os técnicos construía máquinas pneumáticas, produzindo energia pneumática por meio de um pistão. Como instrumento de trabalho utilizavam um cilindro de madeira dotado de êmbolo.

Os antigos aproveitavam ainda a força gerada pela dilatação do ar aquecido e a força produzida pelo vento. Em Alexandria (centro cultural vigoroso no mundo helênico), foram construídas as primeiras máquinas reais, no século III a. C. Neste mesmo período, Ctesibios fundou a Escola de Mecânicos, também em Alexandria, tornando-se, portanto, o precursor da técnica para comprimir o ar. A Escola de Mecânicos era especializada em Alta Mecânica, e eram construídas máquinas impulsionadas por ar comprimido.

No século III d.C., um grego, Hero, escreveu um trabalho em dois volumes sobre as aplicações do ar comprimido e do vácuo. Contudo, a falta de recursos materiais adequados, e mesmo incentivos, contribuiu para que a maior parte destas primeiras aplicações não fosse prática ou não pudesse ser convenientemente desenvolvida. A técnica era extremamente depreciada, a não ser que estivesse a serviço de reis e exércitos, para aprimoramento das máquinas de guerra. Como consequência, a maioria das informações perdeu-se por séculos. Hero parece ter sido o primeiro a projetar e construir uma máquina/motor de calor, capaz de abrir grandes portas de templos.

Durante um longo período, o desenvolvimento da energia pneumática sofreu paralisação, renascendo apenas nos séculos XVI e XVII, com as descobertas dos grandes pensadores e cientistas como Galileu, Otto Von Guericke, Robert Boyle, Bacon e outros, que passaram a observar as leis naturais sobre compressão e expansão dos gases. Leibinz, Huyghens, Papin e Newcomem são considerados os pais da Física Experimental, sendo que os dois últimos consideravam a pressão atmosférica objeto das Ciências Naturais, Filosóficas e da Especulação Teológica desde Aristóteles até o final da época Escolástica. Encerrando esse período, encontra-se Evangelista Torricelli, o inventor do barômetro, um tubo de mercúrio para medir a pressão atmosférica. Com a invenção da máquina a vapor de Watts, tem início

a era da máquina. No decorrer dos séculos, desenvolveram-se várias maneiras de aplicação do ar, com o aprimoramento da técnica e novas descobertas. Assim, foram surgindo os mais extraordinários conhecimentos físicos, bem como alguns instrumentos.

Segundo Bosch (2008), somente na segunda metade do século XIX é que o ar comprimido adquiriu importância industrial. Sendo utilizados em vários segmentos como, automobilismo, farmacêutico, mineração, alimentício, etc.

Onde o segmento desse trabalho é o alimentício, o ar comprimido atuará principalmente nos atuadores de empacotamento e transporte do fluido térmico que realizará a troca de calor com o óleo vegetal.

## **2. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral desse trabalho é projetar um sistema de geração e distribuição de ar comprimido, para atender os requisitos de pressão e vazão necessários para a expansão de instalações na indústria de alimentos localizada na cidade de Capão Bonito – SP.

### **2.1. Objetivo específico**

Para alcançar o objetivo geral deste estudo, deve-se cumprir os seguintes objetivos específicos.

- Verificar os equipamentos que possuem necessidade do uso de ar Comprimido e coletar as dimensões da fábrica para o desenvolvimento do layout de distribuição;
- Modelar a rede de distribuição e identificar o comprimento da linha principal e linhas secundárias;
- Levantar as singularidades necessárias e dimensões para união das tubulações;
- Coletar o volume de ar necessário de cada equipamento para o seu funcionamento e definir um acréscimo de volume para futuras ampliações da empresa;
- Determinar a pressão de regime do sistema;
- Cálculo, dimensionar o diâmetro da tubulação da linha principal e secundárias;
- Selecionou-se o compressor que atenda às necessidades;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

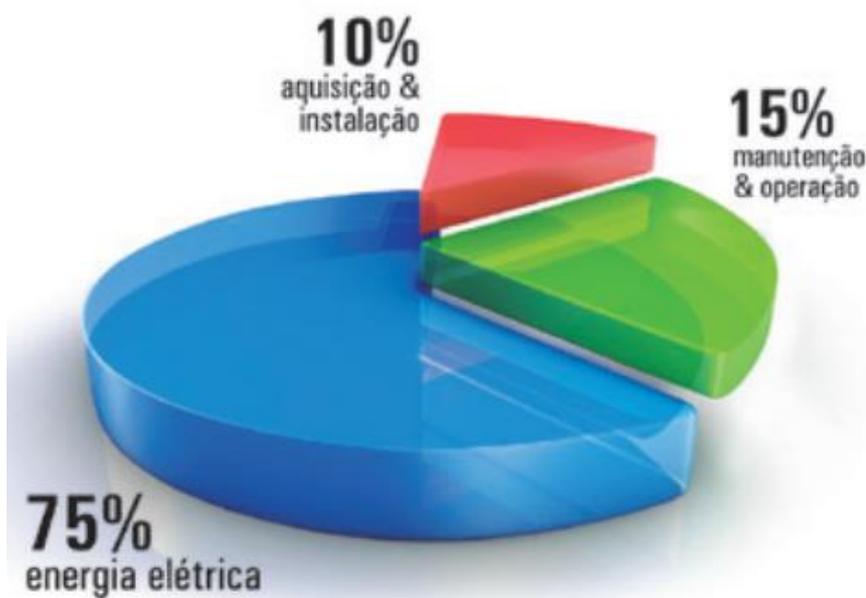
O ar comprimido ajuda o ser humano a resolver os mais diversos problemas em nossas complexas indústrias e até no comércio. Desde a indústria de produtos primários, que abastece outras indústrias, com produtos para uso em seus processos, até a fabricação de produtos pesados. Também é encontrado na indústria leve e fábricas de bens de consumo, como alimentos e bebidas. Também é utilizado no processamento e embalagem de produtos, transporte, construção civil e manutenção industrial.

#### 3.1. Alguns usos gerais do ar comprimido

Segundo Rollins (2004), em uma unidade fabril de médio porte é possível utilizá-la para dezenas de aplicações diferentes, por exemplo, em sistemas de acionamento de punctionadeiras, apertadeiras pneumáticas, controles e aeração, e ainda assim, processos químicos e/ou peças da produção.

Segundo Metalplan (2017), os principais custos associados ao uso do ar comprimido estão relacionados ao gasto energético necessário para obtenção do ar comprimido (Figura 1). Estima-se que aproximadamente 6 bilhões de toneladas de ar sejam comprimidas em um ano, resultando em aproximadamente 500.000 GWh de gasto de energia, a um custo de 30 bilhões de dólares.

Figura 1 - Custo de propriedade de um sistema de ar comprimido em 10 anos.



Fonte: METALPLAN (2017)

De acordo Metalplan (2017) o ar comprimido é uma fonte de energia que demanda um gasto elevado em energia elétrica, podendo custar de sete a dez vezes mais que a energia elétrica em uma aplicação similar. Mas os principais fatores que justificam o uso dessa forma de energia são flexibilidade, conveniência, segurança e relativa facilidade de armazenamento.

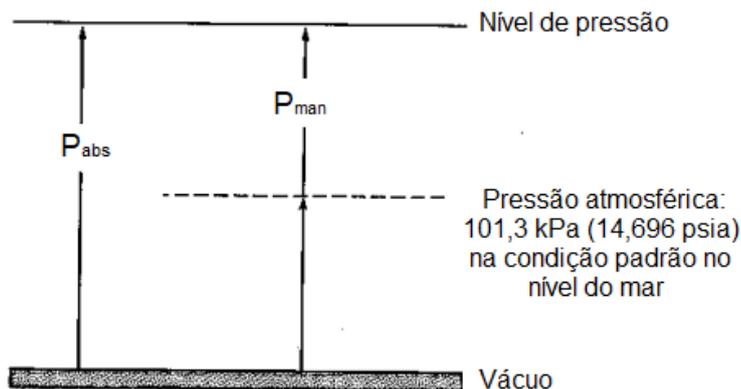
### 3.2. Pressão

Os gases são compostos por moléculas em constante movimento (agitação) que exercem energia de pressão sobre o ambiente ou recipiente que contém o gás. As medições de pressão podem ter dois pontos de referência, zero absoluto (vácuo), e a pressão atmosférica. Os valores de pressão devem ser estabelecidos em relação aos níveis de referência. Se o nível de referência for o vácuo, a pressão é chamada de pressão absoluta, conforme mostra a Figura 2. A maioria dos medidores de pressão indica pressão diferencial - a diferença entre a pressão medida e a pressão ambiente (pressão atmosférica local). O nível de pressão medido em relação à pressão atmosférica é chamado de pressão manométrica.

Assim,

$$P_{abs} = P_{atm} + |P_{man}|$$

Figura 2 – Pressões absoluta e manométrica, mostrando níveis de referência.



Fonte: FOX; MCDONALD; PRITCHARD, (2006).

### 3.3. Gás ideal

Segundo Van Wylen (2009), as propriedades gerais dos gases, são que eles ocupam todo o volume disponível e geram forças devido à pressão exercida pelo movimento constante das moléculas. Em uma mistura de vários gases, cada gás se comporta como se os outros gases não estivessem presentes, e a pressão total será

dada pela soma de todas as pressões (pressões parciais) de cada gás. Como o vapor é produzido pela evaporação de um líquido, dependendo da temperatura, ele pode evaporar até uma pressão máxima de vapor (em função da temperatura), então se tornar um vapor saturado. O gás estudado pode ser entendido como vapor superaquecido, que obedece às leis físicas dos gases, e não é adequado para vapor saturado. Os termos gases reais e gás ideal na pneumática são frequentemente usados, um gás real é um vapor superaquecido que condensa a uma determinada temperatura, enquanto um gás ideal não condensa quando resfriado ao zero absoluto e então se torna um estado ideal, facilitando assim a modelagem e equacionamento teórico de seu comportamento, o que não ocorre na prática. Mas, como o ponto de condensação dos gases reais é dado em alta pressão e temperatura extremamente baixa, os gases reais podem, em princípio, ser considerados gases ideais.

Sendo assim, o estado de um gás pode ser determinado a partir de dados de pressão (P), temperatura (T) e volume (V), através da equação:

$$\frac{PV}{T} = cte$$

Sendo a unidade de temperatura Kelvin. Inserindo a massa nessa equação:

$$PV = mRT$$

Com  $R = 287 \text{ J/kg.K}$ , constante do gás para o ar. Portanto, a densidade será:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT}$$

O ar atmosférico é composto essencialmente por Nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e Oxigênio ( $\text{O}_2$ ), juntos compõem aproximadamente 99%, sendo 78% de Nitrogênio e 21% de Oxigênio, da mistura do ar, sendo que o resto 1%, é a soma de outros gases que compõem o ar.

Soma-se a essa composição, a presença de no estado de vapor, sendo a capacidade de absorção de vapor d'água no ar dependente da temperatura ambiente. Sendo ultrapassada essa capacidade o excesso de vapor d'água se condensa e se precipita.

O ar comprimido é o ar atmosférico condensado que armazena energia de pressão, tendo então condições de realizar trabalho. O fato é que a umidade sempre estará presente no processo de obtenção do ar comprimido, cabendo aos responsáveis pelo projeto determinarem qual seria o processo de secagem do ar comprimido mais adequado para suas finalidades.

### **3.4. Tipos de secadores de ar**

Segundo Rollins (2004), existem basicamente três tipos de secadores: deliquescentes, dessecantes regenerativos e dessecantes refrigerados.

#### **3.4.1. Secadores deliquescentes**

Esses secadores utilizam materiais de secagem higroscópicos, ou seja, possuem alta afinidade com a água. O material dessecante remove o vapor de água do ar comprimido dissolvido no líquido formador, de modo que esse material se desgasta com o tempo e precisa ser substituído, geralmente 2 a 3 vezes ao ano.

As vantagens dos secadores deliquescentes são o baixo custo inicial e a ausência de partes móveis. No entanto, também apresenta as seguintes desvantagens: redução limitada do ponto de orvalho, substituição regular, altos custos de manutenção, falha na filtragem pode levar o líquido formado à tubulação de distribuição e alguns materiais dessecantes derretem acima de 32°C, tornando-os ineficazes.

#### **3.4.2. Secadores dessecantes regenerativos**

Eles usam um dessecante que atrai a umidade para os milhares de minúsculos poros em cada partícula dessecante. O dessecante pode ser regenerado por aquecimento ou ar quente e seco. Necessitam de duas ou mais torres de secagem para operar continuamente, pois enquanto uma torre está sendo regenerada, a outra seca o ar comprimido.

Algumas das vantagens dos secadores de absorção regenerativa são: baixo ponto de orvalho alcançado, nenhuma drenagem necessária e custos operacionais moderados. Apresenta as seguintes desvantagens: alto custo inicial, manutenção regular da torre de secagem e, se o filtro de óleo falhar, pode revestir o material dessecante, inutilizando-o.

#### **3.4.3. Secadores dessecantes refrigerados**

Eles são usados como condicionadores de ar domésticos ou refrigeradores, onde o ar é resfriado por um trocador de calor refrigerante/ar quente. Os refrigerantes

comumente usados são o freon 12 ou 22. À medida que o ar esfria, sua capacidade de absorver a umidade diminui e a condensação resultante se acumula.

Algumas das vantagens de um secador por refrigeração são: ponto de orvalho constante, baixa manutenção, baixo custo operacional e não ser danificado por vapores de óleo e aerossóis. A principal desvantagem desse tipo de secador é que ele não pode atingir pontos de orvalho muito baixos porque o condensado congelará, o que restringirá o fluxo de ar.

### **3.5. Filtros de ar**

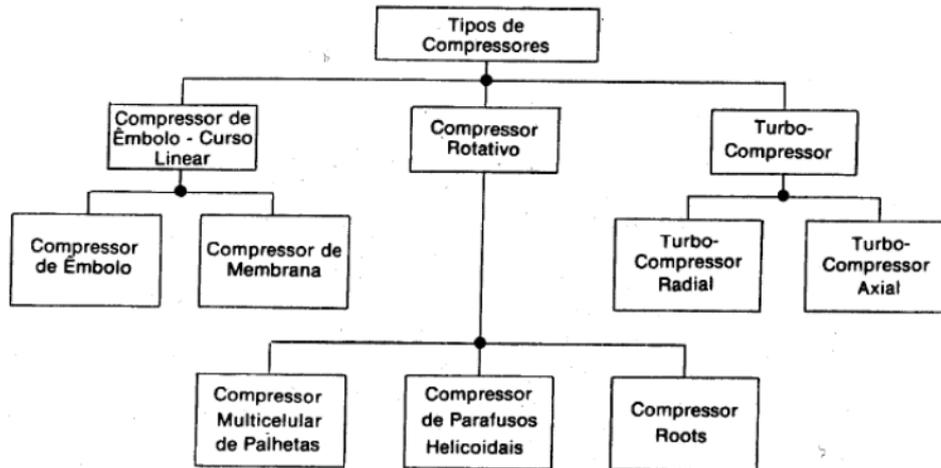
Os compressores movimentam muito ar por um longo período, a sujeira presentes no ar podem acumular-se gerando um volume considerável. A função do filtro é manter a quantidade de poeira e abrasivos dentro dos limites aceitáveis. A melhor maneira de selecionar um filtro de ar depende de diversas variáveis, incluindo: projeto do filtro, necessidades do compressor e condições atmosféricas locais.

De acordo com Rollins (2004), existem três tipos de filtros de ar: úmido, banho de óleo e seco. Os filtros úmidos a óleo consistem em materiais filtrantes compostos por várias camadas de arame, malha ou material fibroso. O material do filtro geralmente está contido em um recipiente que deve ser removido e limpo periodicamente de acordo com as especificações do fabricante, e por último os elementos são lubrificados e instalados. Os filtros de banho de óleo passam o ar primeiro pelo cárter de óleo e depois pelo elemento. Os filtros secos usam material espaçador para evitar a penetração de partículas. Quanto menos espaço houver entre os materiais, mais eficientes eles são, mas exigem manutenção frequente para evitar o bloqueio das passagens de ar.

### **3.6. Compressores**

Compressor é uma máquina de fluxo responsável por converter energia mecânica ou elétrica em energia de pressão, isto é, ar comprimido. Existem vários tipos de compressores como demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Tipos de compressores

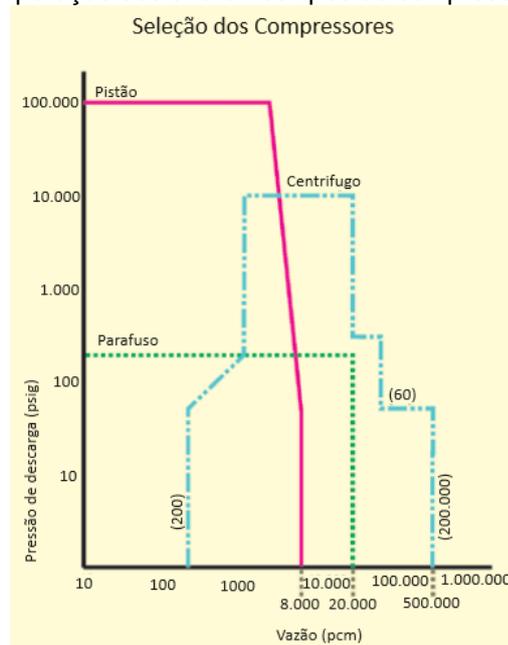


Fonte: Silva (2002).

Os compressores de êmbolo e rotativos caracterizam-se por comprimir um volume fixo de ar por ciclo, razão pela qual também são classificados como compressores de deslocamento positivo. Um turbocompressor comprime o ar forçando-o através de um bocal, que converte energia cinética em energia de pressão.

Essa variedade de estruturas de compressores e conceitos operacionais é demonstrado na Figura 4 e ilustra que cada compressor opera dentro de uma determinada faixa de pressão e vazão, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens, sendo o responsável pelo projeto determinar o equipamento que melhor atende às suas necessidades.

Figura 4 – Faixas de operação dos diferentes tipos de compressores.



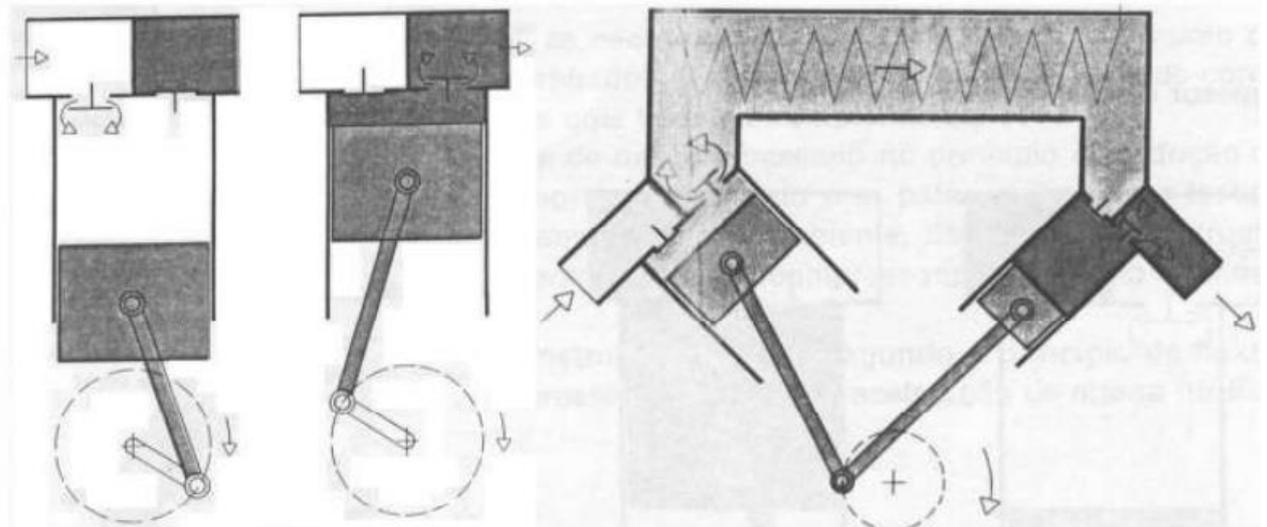
Fonte: METALPLAN (2017)

### 3.6.1. Compressores de êmbolo.

Esse compressor utiliza um sistema de biela-manivela, semelhante ao de um carro (Figura 5), movido por um motor de combustão interna ou por um motor elétrico.

Neste tipo de compressor, o ar é sugado para dentro da câmara de compressão através da abertura da válvula de pressão até que o pistão atinja o ponto morto superior, depois é comprimido quando o pistão atinge o ponto morto inferior e é liberado pela válvula de descarga uma vez atinge o ponto morto inferior. Estes são os compressores mais usados porque são muito flexíveis em termos de fluxo e pressão. Sua faixa de pressão de trabalho econômica é de 8 a 10 bar. Quando a taxa de compressão necessária for muito alta, haverá mais perda de calor, por isso é necessário usar vários estágios, e cada estágio terá um aumento de pressão.

Figura 5 – Compressor de êmbolo monoestágio e multi-estágio.

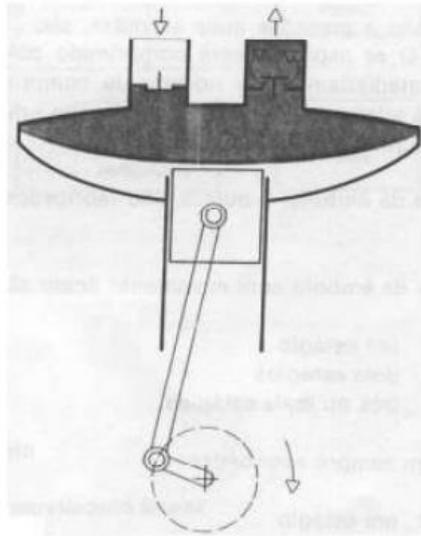


Fonte: Silva (2002).

### 3.6.2. Compressor de membrana.

A Figura 6 demonstra o compressor de membrana, que é uma variação do compressor de êmbolo, como o nome sugere, possuem um diafragma cuja função é isolar o fluxo de ar comprimido dos componentes do compressor e evitar resíduos de óleo. Por isso, é amplamente utilizado nas indústrias alimentícia e farmacêutica.

Figura 6 – Compressor de membrana.



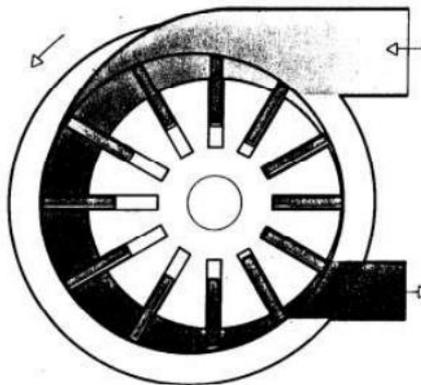
Fonte: Silva (2002).

### 3.6.3. Compressores rotativos.

#### 3.6.3.1. Compressor de palhetas.

Esse funciona com um rotor que gira dentro de uma carcaça, acionado por um motor elétrico ou de combustão interna. Como o rotor é excêntrico à carcaça, suas palhetas deslizam em trilhos para comprimir o ar, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Compressor de palhetas.



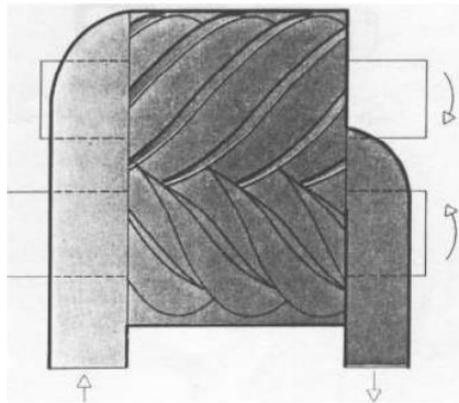
Fonte: Silva (2002).

Nota-se que o fluxo de ar comprimido gerado é pouco pulsante e opera em faixas de pressão menores, isso deve-se ao volume de ar aspirado ser ligeiramente comprimido ao longo do curso do rotor.

#### 3.6.3.2. Compressor de parafuso.

O conceito de funcionamento consiste em duas roscas, cada uma ligada ao seu respectivo eixo de rotação, de forma que o ar esteja em constante movimento entre as roscas, livre de choques de pressão e sucção, proporcionando assim um fluxo contínuo de ar comprimido, conforme a Figura 8. Esse compressor caracteriza-se pelo seu tamanho pequeno, que permite altas velocidades de rotação e, portanto, produz alto consumo de energia. Apesar de caro, é um dos tipos de compressores preferidos no mercado devido ao seu fluxo contínuo e alta pressão de operação.

Figura 8 – Compressor de parafuso.

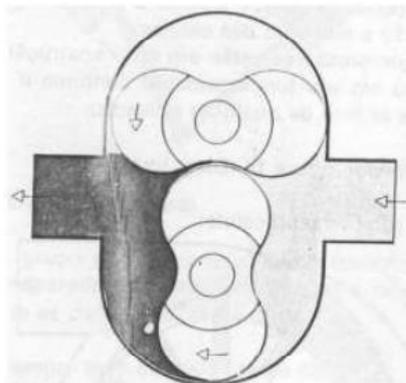


Fonte: Silva (2002).

### 3.6.3.3. Compressor roots.

Compressor roots trabalha com um motor a combustão ou elétrico, que aciona os dois rotores que giram em direções opostas (Figura 9) para mover o ar de uma área de baixa pressão, para uma área de alta pressão. Amplamente utilizado em transporte pneumático, trabalhando sempre em baixa pressão. Sua principal vantagem é que é durável e pode funcionar por muitos anos sem mais cuidados.

Figura 9 – Compressor roots.



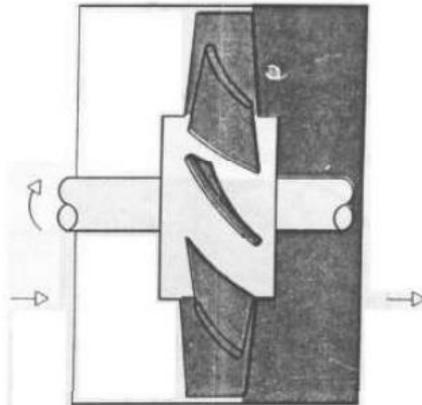
Fonte: Silva (2002).

### 3.6.4. Turbos-Compressores

#### 3.6.4.1. Turbo compressor axial.

O ar flui sobre uma roda rotativa perpendicular ao eixo do compressor como demonstrado na Figura 10. Sua principal vantagem é a alta vazão alcançada, mas a compressão é muito baixa e na maioria dos casos são necessários vários estágios de rotação para atingir a pressão de descarga necessária.

Figura 10 – Compressor axial.

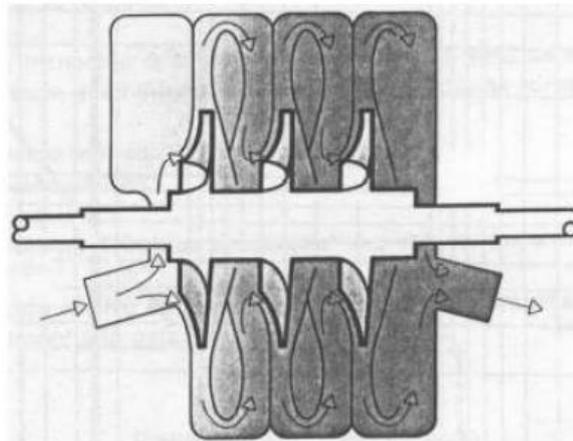


Fonte: Silva (2002).

#### 3.6.4.2. Turbo compressor radial

A Figura 11 mostra um compressor radial onde o ar entra pelo impulsor do rotor e flui radialmente. Possuem as mesmas características dos compressores axiais, que permitem alta vazão e requerem múltiplos estágios para atingir alta pressão de descarga.

Figura 11 – Compressor radial



Fonte: Silva (2002).

## 4. SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

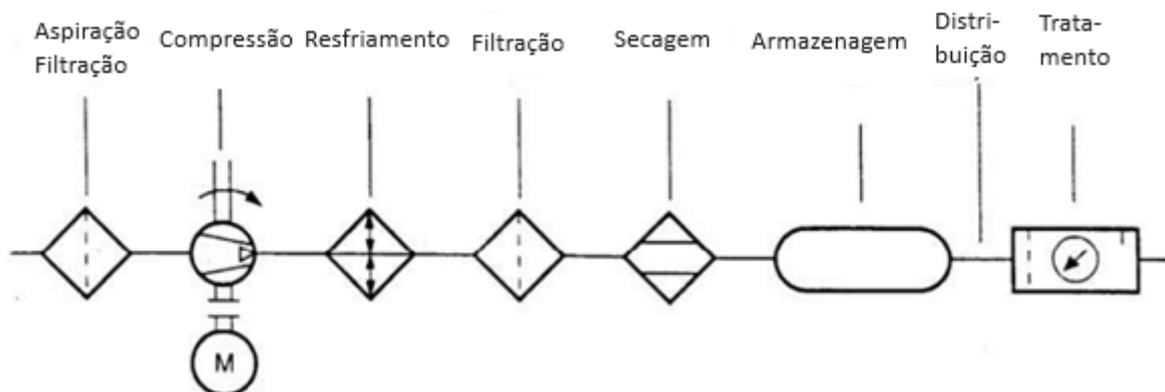
O ar comprimido é uma importante fonte de energia para a indústria e possui muitas vantagens, como segurança, economia, forte adaptabilidade, fácil condução e custos reduzidos de mão de obra.

Porém, para usufruir dos benefícios e vantagens de um sistema de ar comprimido, é fundamental um bom planejamento, exigindo seleção criteriosa dos equipamentos, elaboração do layout e dimensionamento do sistema de distribuição, instalação e manutenção adequada dos equipamentos.

Segundo Rollins (2004), um sistema de ar comprimido é composto por vários componentes, um ou mais compressores, filtro de entrada, sistema de controle, pós-resfriador com separação de condensado, reservatório de ar, tubulação de interligação, secador de ar e um sistema de distribuição que canaliza o ar comprimido para onde é necessário.

De acordo com Silva (2002), a Figura 12 representa o esquema de geração, tratamento e distribuição de um sistema de ar comprimido.

Figura 12 – Geração, tratamento e distribuição do ar comprimido



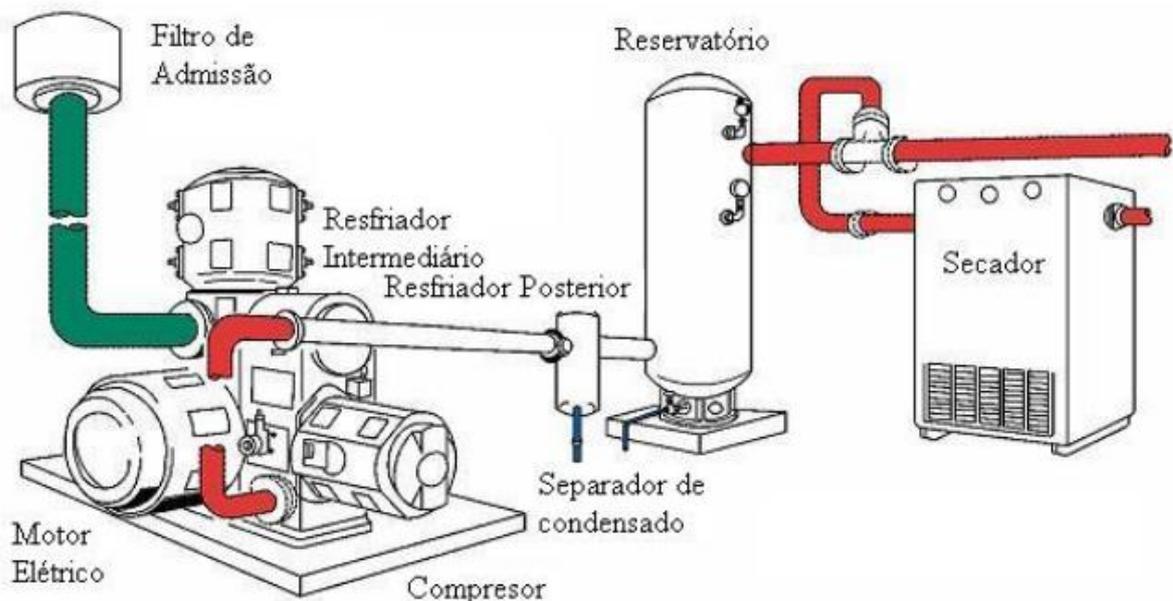
Fonte: Silva (2002).

### 4.1. Objetivo do sistema de ar comprimido

O principal objetivo de um sistema de ar comprimido é fornecer ar para vários pontos de uso dentro de uma indústria, com a quantidade adequada de fluxo, qualidade e pressão necessária para o funcionamento ideal de ferramentas pneumáticas e outros equipamentos ou procedimentos dependentes de ar comprimido.

Antes de iniciar qualquer instalação que requeira ar comprimido, é essencial realizar uma investigação inicial. Essa investigação deve abranger todas as necessidades relevantes, bem como quaisquer previsões sobre novas aplicações e possíveis expansões de uso. Além disso, é fundamental determinar a quantidade de ar comprimido que o sistema de geração deve produzir para atender a demanda projetada. Uma instalação típica do sistema de geração de ar comprimido pode ser vista na Figura 13.

Figura 13 – Instalação típica de um sistema de geração de ar comprimido.



Fonte: Rollins (2004).

#### 4.2. Projetando um sistema de ar comprimido

Segundo Rollins (2004) destaca a necessidade de vários fatores importantes a serem cuidadosamente considerados durante o projeto de um sistema de ar comprimido.

- Estabelecer a capacidade necessária do compressor;
- Selecionar o número de compressores;
- Localização dos compressores;
- Determinação do uso de compressores ou componentes individuais;
- Estabelecimento do sistema de regulação mais adequado para o uso;
- Seleção do compressor: tipo e fornecedor;
- Checagem dos sistemas de distribuição de ar comprimido;

- Checagem da localização e capacidade de armazenamento do ar;
- Estabelecimento do layout da tubulação de admissão e descarga;
- Checagem das necessidades do resfriador posterior e do separador de condensado e suas capacidades;

#### **4.2.1. Estabelecer a capacidade necessária do compressor**

Ao planejar e projetar um sistema de ar comprimido, um aspecto vital é analisar os dispositivos, ferramentas e processos que irão necessitar de ar comprimido. Além disso, é fundamental considerar os padrões de operação dessas demandas, sejam elas de funcionamento contínuo ou intermitente, levando a picos de demanda. Não é aconselhável calcular a demanda total como a soma das maiores demandas individuais, pois isso resultaria em um sistema superdimensionado. Em vez disso, é fundamental levar em consideração o consumo médio de cada demanda. Para lidar com picos de demanda ocasionais, é altamente recomendável ter uma reserva de armazenamento de ar comprimido.

Para determinar o consumo médio de ar, deve-se primeiro calcular o fator de carga. Isso é obtido dividindo-se o consumo real do equipamento pelo consumo máximo em plena carga. O fator de carga, ou uma aproximação dele, é crucial para determinar a capacidade necessária da instalação.

#### **4.2.2. Selecionar o número de compressores**

Uma vez determinados os requisitos individuais dos diferentes pontos de consumo, o próximo passo é combinar essas informações para determinar a eficiência geral do ar comprimido. Deve-se considerar o estudo do comportamento da demanda de ar comprimido. Caso o sistema necessite de picos de consumo, deve-se avaliar a instalação de reservatórios de ar comprimido, abastecidos em períodos de consumo médio e possíveis vazamentos, que geralmente ocorrem próximos aos pontos de consumo, também devem ser levados em consideração possíveis extensões de instalação e tempos de operação de ferramenta mais longos também devem ser levados em consideração. Segundo Metalplan (2017), boa prática de projeto deve permitir uma perda de dispersão de 5-10 % além da queda de pressão na tubulação da rede, não deve ser superior a 10 % entre o ponto de origem e o ponto de consumo de consumo do ar comprimido.

A adoção de compressor único na instalação é uma escolha não recomendada, pois assim como outra máquina de fluxo, o compressor precisa de manutenção e eventualmente precisa parar de operar para que a manutenção seja realizada, assim sendo provavelmente a demanda de ar comprimido não seria atendida por muito tempo apenas com o reservatório de ar, provocando prejuízos pela parada na produção. Portanto, recomenda-se a adoção de um compressor em “stand-by”, que entre em operação quando o compressor principal estiver parado para a manutenção.

Um sistema centralizado de compressores tem várias vantagens interessantes em relação ao sistema descentralizado. Uma sala separada para os compressores é desejável, onde possa ser admitido ar fresco e limpo.

#### 4.2.3. Regulagem do sistema de ar comprimido

Geralmente consumo de ar comprimido nas instalações costuma variar, mas é desejável que a pressão do ar no ponto de consumo seja relativamente constante. A variedade de tipos de compressores (deslocamento positivo, rotativos e centrífugos) requer procedimentos diferentes para ajustar cada tipo de compressor. Os pressostatos são frequentemente usados em compressores de deslocamento positivo, ligando e desligando o motor conectado ao compressor em resposta a mudanças na pressão de descarga.

O método de controle dos compressores rotativos (parafuso e palhetas) é diferente dos compressores de deslocamento positivo. Para compressores de estágio único a oclusão parcial da entrada é usada. Com isso, é possível obter o controle de carga total do compressor entre 100% à 60%.

Quando se trata de compressores dinâmicos, seu controle é um pouco mais intrincado porque o fluxo de ar é altamente responsivo. No passado, o bloqueio do fluxo de admissão era comumente usados como método de regulação, mas os compressores modernos são equipados com palhetas guia de admissão, que oferecem gerenciamento controle preciso do fluxo de admissão. Isso reduz a possibilidade de a máquina sofrer condições de refluxo, também conhecidas como "surge".

#### 4.2.4. Seleção do compressor: tipo e fabricante.

A confiabilidade dos sistemas de ar comprimido é uma necessidade crucial porque o ar comprimido é usado para muitas finalidades na indústria. O compressor é a parte fundamental do sistema de ar comprimido, sendo muito importante escolher corretamente o equipamento. Como mostrado, existem vários tipos de compressores, cada um com características operacionais específicas (Figura 3), portanto, ao responsável pelo projeto selecionar o equipamento mais adequado. Ainda há fatores a serem considerados: custos de energia, horas de operação, tempos de carregamento, custos iniciais, custos de óleo, necessidades de instalação externa, valor de revenda, instalação, depreciação, ventilação, disponibilidade de água de resfriamento, ruído, manutenção etc.

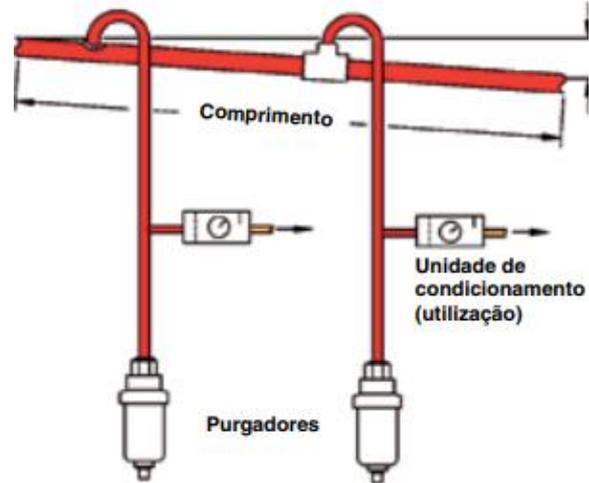
#### 4.2.5. Checagem dos sistemas de distribuição de ar comprimido

Inicialmente, para que a queda de pressão entre o ponto de geração e o ponto de consumo não ultrapasse 10%, a tubulação de distribuição deve ser dimensionada o suficiente com conexões que mantenham pouca resistência ao fluxo (curvas de grande raio). Como pode ser visto, o futuro crescimento da demanda também deve ser considerado. Outra consideração é a utilização de uma rede de distribuição fechada, pois permite que o fluxo de ar tome dois caminhos possíveis até o ponto de maior consumo de ar. Quando a tubulação for longa, é recomendável instalar tanques de armazenamento nos pontos mais distantes e próximos aos equipamentos que demandam maior consumo de ar comprimido, evitando assim quedas excessivas de pressão.

Além disso, cada ponto de saída da tubulação deve ser o mais próximo possível do ponto de consumo para evitar uma maior queda de pressão pela mangueira. A ligação à tubagem principal deve ser feita pela parte superior da tubagem conforme demonstrado pela Figura 14, de forma a evitar a entrada de condensação no ponto de consumo. Deve-se levar em consideração também a inclinação da tubulação no sentido do ponto de consumo para que o ar condensado vá para o ponto de drenagem. Nunca incline o tubo na direção do compressor, ou corre o risco de retorno do condensado para o compressor. Em sistemas que empregam compressores isentos de óleo, são usados tubos resistentes à corrosão, ao contrário dos sistemas que

empregam compressores lubrificados a óleo, onde uma película de óleo é formada para proteger os tubos, onde os tubos são corroídos pela água condensada.

Figura 14 – Conexão recomendável entre tubulação principal e ponto de consumo.



Fonte: Parker Training (2006).

## 5. METODOLOGIA

O estudo surgiu da necessidade da construção de uma nova unidade fabril da empresa, localizada na cidade de Capão Bonito, no estado de São Paulo para atender a demanda dos clientes, por sua vez necessitou determinar o dimensionamento da rede de ar comprimido. Dessa forma, um sistema de ar comprimido dimensionado pode fornecer à empresa menores custos de produção devido ao menor consumo de energia, além de melhor desempenho e maior vida útil dos equipamentos. Com isso, procurou-se determinar a melhor maneira de projetar seu sistema de ar comprimido da maneira mais simples possível.

### 5.1. Métodos e Técnicas utilizadas

Foi utilizado os estudos aprendidos na disciplina de Comandos Hidráulicos e Pneumáticos para atender ao objetivo geral de mostrar o dimensionamento da rede de distribuição de ar comprimido que atenderá os requisitos de pressão e vazão necessária para a ampliação da nova unidade fabril.

O levantamento dos materiais utilizados nos cálculos da tubulação, volume do reservatório e seleção do compressor, juntamente com a coleta de dados teóricos, foi utilizado para determinar o tamanho da rede de distribuição, dentre elas:

- Coletou-se as dimensões da fábrica para o desenvolvimento do layout de distribuição, identificou-se o comprimento da linha principal e linhas secundárias e levantou-se as singularidades necessárias e dimensões para união das tubulações;
- Verificou-se os equipamentos que possuem necessidade do uso de ar comprimido e coletou-se o volume de ar necessário de cada equipamento para o seu funcionamento;
- Com o volume total de ar identificado, definiu-se um acréscimo de 30% no volume para futuras ampliações da empresa;
- Determinou-se a pressão de regime do sistema;
- A partir dos dados necessários para o cálculo, dimensionou-se o diâmetro da tubulação da linha principal e secundárias;
- De acordo com as informações de vazão de ar, selecionou-se o compressor que atenda às necessidades;

- Conforme os parâmetros do compressor identificou-se o volume do reservatório de ar.

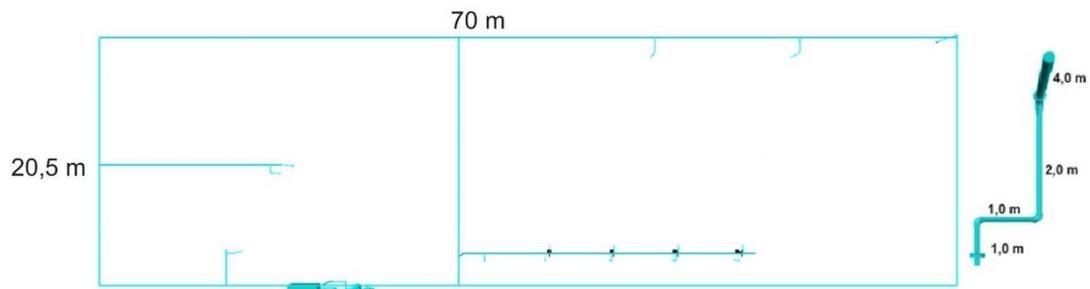
## **5.2. Coletas de dados**

### **5.2.1. Dimensões (da fábrica, rede de distribuição e singularidades)**

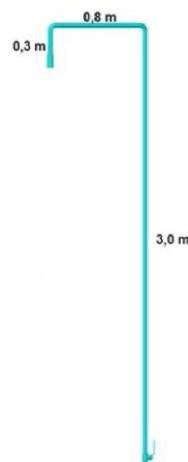
Como não havia projeto disponível para a unidade de produção, foi utilizado fita métrica para determinar as dimensões gerais da fábrica. Essas medições foram usadas para criar um desenho de planta baixa. O objetivo era simular a configuração mais adequada para o sistema de distribuição e, ao mesmo tempo, extrair as medições lineares da tubulação. A Figura 15 apresenta as dimensões da rede de distribuição.

A rede de distribuição transporta o ar comprimido dos tanques de armazenamento para a rede de abastecimento. A título de elaboração, o comprimento linear do tubo pode ser determinado pela soma de todos os pontos finais, que é de 189,00 m de comprimento. Seguindo o mesmo conceito da rede de alimentação, o ar comprimido é distribuído para os pontos de consumo do equipamento com comprimento linear de 4,10 m, conforme Figura 15.

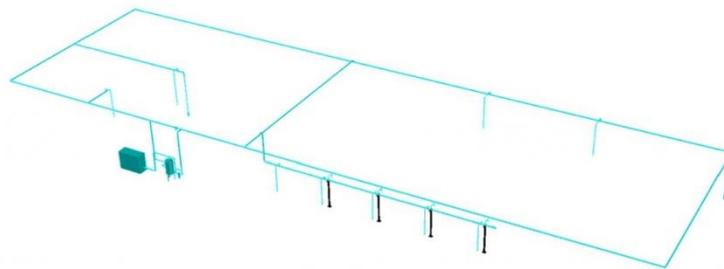
Figura 15 – Dimensões das redes de distribuição e alimentação.



Dimensões da rede de distribuição



Dimensão da rede de alimentação



Fonte: Próprio autor.

A Figura 16, mostra a vista superior da nova unidade fabril, onde é composta pela linha de fritura, linha de empacotamento, estoque de insumos e produto acabado e o local destinado a instalação do compressor e reservatório de ar.

Figura 16 – Vista superior da nova unidade fabril.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 17, é o local onde será instalado o compressor e o reservatório de ar comprimido.

Figura 17 – Local da instalação do compressor e reservatório de ar comprimido.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 18, é a vista da linha de fritura, onde será instalado 3 pontos de saída de ar comprimido, sendo eles, no trocador de calor, no filtro rotativo e no fatiador.

Figura 18 – Vista da linha de fritura.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 19, é a vista da linha de empacotamento, onde conterà 9 pontos saídas de ar comprimido, onde serão instalados 1 em cada equipamento de empacotamento, e 5 bicos de limpeza.

Figura 19 – Vista da linha de empacotamento.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 20, é a vista geral do estoque, onde será instalado 2 pontos de saída de ar comprimido para ser utilizados nos bicos de limpeza;

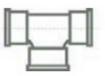
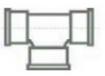
Figura 20 – Vista geral do estoque.



Fonte: Próprio autor.

Segundo Parker (2006), a escolha das conexões utilizadas na rede é muito importante e as mais indicadas são aquelas com raios maiores, que permitem maior fluxo de ar e assim evitam perdas de carga por turbulência. Nesta avaliação, foram definidas as singularidades especificadas na Quadro 1, que têm a função de interligar ou em alguns casos bloquear linhas.

Quadro 1 – Singularidades selecionados.

Rede de Distribuição		Rede de Alimentação	
	Curva 90° raio longo roscado		Curva 90° raio longo roscado
	Tê fluxo dividido roscado		Tê fluxo dividido roscado
	Válvula gaveta roscada		Válvula gaveta roscada
	Válvula retenção portinhola		Curva 180° raio longo roscada
			Válvula retenção portinhola

Fonte: Próprio autor.

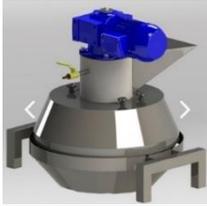
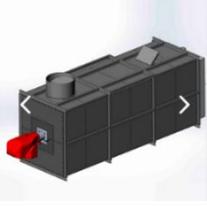
### 5.2.2. Vazão do sistema

Pode-se identificar como a capacidade de ar requerida pelo sistema para operar os equipamentos movidos a ar comprimido. Diante disso, foram verificados os

equipamentos pneumáticos da unidade fabril já existente, assim conhecendo as especificações de consumo de ar e pressão de trabalho de cada equipamento.

Para obtenção de informações técnicas, foram investigados os equipamentos alimentados pela rede de ar comprimido e suas funções, conforme Quadro 2. Para determinar o fluxo de ar necessário para cada dispositivo.

Quadro 2 – Equipamentos pneumáticos.

Equipamentos	
	Empacotadeira
	Fatiador
	Filtro rotativo
	Trocador de calor
	Bico de limpeza

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 1 contém as informações de volume de ar total e unitário e pressão de trabalho de cada equipamento. Para o dimensionamento da tubulação, a vazão total dos equipamentos (24,2 m<sup>3</sup>/h) deve ser somada aos valores especificados para futura expansão da empresa.

Segundo Parker (2006), após definir o fluxo total de equipamentos, deve-se estabelecer um fator entre 20% a 50% para a expansão futura da empresa.

Tabela 1 – Vazão de ar.

Equipamentos	Quantidade	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Consumo (m <sup>3</sup> /h)	Consumo total (m <sup>3</sup> /h)
Empacotadeira	4	6	2,5	10,0
Fatiador	1	6	1,2	1,2
Filtro rotativo	1	6	1,6	1,6
Trocador de calor	1	6	3,0	3,0
Bico de limpeza	7	6	1,2	8,4

Fonte: Próprio autor

Seguindo esse conceito, analisa-se a possibilidade máxima de crescimento da empresa em instalações futuras, chegando a um percentual de 30%. Somando o consumo total dos equipamentos e a previsão de crescimento, o valor é de 31,46 m<sup>3</sup>/h.

### 5.2.3. Queda pressão admitida

Para o dimensionamento da tubulação, deve-se considerar a queda de pressão, também conhecida como perda de carga, que ocorre devido ao atrito do ar contra a tubulação durante o escoamento. Os valores são 0,3 kgf/cm<sup>2</sup> para tubos menores e 0,5 kgf/cm<sup>2</sup> para tubos maiores que 500 m (FIALHO, 2011).

Com base nisso, como o comprimento total do tubo é 189,0 m, foi escolhido perda de carga de 0,3 kgf/cm<sup>2</sup>.

### 5.2.4. Pressão de regime

Para Fialho (2011), a pressão de regime é a pressão efetiva fornecida pelo compressor, ou seja, a pressão na qual o ar é armazenado no tanque receptor, sendo que a pressão de regime está em torno de 7 a 12 kgf/cm<sup>2</sup>.

Os equipamentos analisados operam com pressão de 6 kgf/cm<sup>2</sup>, porém, para que o ar chegue ao ponto de abastecimento na pressão especificada pelo equipamento, devido às perdas de carga, a pressão do tanque de ar deve ser levada em consideração durante o processo de distribuição de ar.

Para tanto, é considerada uma pressão de 10 kgf/cm<sup>2</sup> no cálculo do diâmetro do tubo.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Dimensionamento da tubulação

O dimensionamento dos tubos se dá pela Equação 1, e será dividido em duas fases. Conforme especificado na Figura 15 (pág. 34), na primeira etapa será dimensionada a rede de distribuição, que conduz o ar dos tanques de armazenamento através da linha principal até a linha de abastecimento, que tem a função de conduzir o ar até a saída de abastecimento dos equipamentos, onde será a segunda etapa do dimensionamento.

$$d = 10 * \sqrt[5]{\frac{1,663785 * 10^{-3} * Q^{1,85} * L_1}{\Delta P * P}} \quad (1)$$

Onde:

$d$  = Diâmetro da linha primária (mm);

$Q$  = Volume de ar corrente (m<sup>3</sup>/h);

$L_1$  = Comprimento retilíneo da linha primária (m);

$P$  = Pressão de trabalho (kgf/cm<sup>2</sup>);

$\Delta P$  = Perda de carga do regime (kgf/cm<sup>2</sup>).

#### 6.1.1. Rede de distribuição

Para o dimensionamento, foram obtidas informações como vazão e pressão de operação dos equipamentos e dimensões da rede, que foram extraídas do layout desenvolvido.

A princípio, o sistema ignora o comprimento dos pontos singularidades e considera apenas o comprimento da linha reta do tubo. As especificações do sistema estão listadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Especificação da rede de distribuição.

Comprimento da tubulação	189,00 m
Vazão de ar + 30%	31,46 m <sup>3</sup> /h
Pressão de regime	10 kgf/cm <sup>2</sup>
Queda de pressão admitida	0,3 kgf/cm <sup>2</sup> .

Fonte: Próprio autor

Para determinação do diâmetro nominal, aplicou-se as informações na Equação 1.

$$d = 10 * \sqrt[5]{\frac{1,663785 * 10^{-3} * 31,46^{1,85} * 189}{0,3 * 10}}$$

$$d = 22,82 \text{ mm}$$

Utilizando a Figura 21, para o diâmetro interno nominal de 22,82 mm, foi encontrado o diâmetro comercial de 26,1 mm que corresponde a 1 in, obtendo as singularidades a seguir.

Figura 21 – Tabela A.5 Norma ASTM A 120 Schedule 40

Diâmetro				Espessura de Parede		Peso Teórico do Tubo Preto		Pressão de Ensaio
Nominal	Externo		Interno			Pontas Lisas	Com Roscas e Luvas <sup>17</sup>	
in	in	mm	mm	in	mm	Kg/m	Kg/m	Kgf/cm <sup>2</sup>
1/4	0,540	13,7	9,2	0,088	2,24	0,63	0,66	50
3/8	0,675	17,2	12,6	0,091	2,31	0,85	0,88	50
1/2	0,840	21,3	15,8	0,109	2,77	1,27	1,29	50
3/4	1,050	26,7	21,0	0,113	2,87	1,68	1,72	50
1	1,315	33,4	26,1	0,133	3,38	2,50	2,56	50
1.1/4	1,660	42,2	35,1	0,140	3,56	3,38	3,45	70
1.1/2	1,900	48,3	40,9	0,145	3,68	4,05	4,18	70
2	2,375	60,3	52,5	0,154	3,91	5,43	5,60	70
2.1/2	2,875	73,0	62,7	0,203	5,16	8,62	8,76	70
3	3,500	88,9	77,9	0,216	5,49	11,28	11,60	70
3.1/2	4,000	101,6	90,1	0,226	5,74	13,56	14,11	85
4	4,500	114,3	102,3	0,237	6,02	16,06	16,81	85
5	5,563	141,3	128,2	0,258	6,55	21,76	22,67	85
6	6,625	168,3	154,1	0,280	7,11	28,23	29,59	85
8	8,625	219,1	202,7	0,322	8,18	42,49	44,66	90
10	10,75	273,0	254,5	0,365	9,27	60,23	-	85

Fonte: Fialho, (2011)

Com a especificação do diâmetro comercial é possível analisar a Figura 22 e identificar o comprimento das singularidades.

Figura 22 – Comprimento das singularidades.

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
	ROSQ.	1,1	1,34	1,58	2	2,25	2,6	2,8
	FLAN.	0,3	0,37	0,5	0,62	0,73	0,95	1,1
	Diâmetro Nominal (in)							
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
90° Cotovelo comum	ROSQ.	3,4	3,7	4	-	-	-	-
	FLAN.	1,3	1,55	1,8	2,2	2,7	3,7	4,3

Conexão		Diâmetro Nominal (in)'						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
	ROSQ.	0,17	0,2	0,25	0,34	0,37	0,46	0,52
	FLAN.	-	-	-	-	-	0,8	0,83
	Diâmetro Nominal (in)							
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
Válvula gaveta	ROSQ.	0,58	0,67	0,76	-	-	-	-
	FLAN.	0,85	0,86	0,88	0,95	0,98	0,98	0,98

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
	ROSQ.	0,67	0,7	0,83	0,98	1	1,1	1,1
	FLAN.	0,33	0,4	0,49	0,61	0,7	0,83	0,88
	Diâmetro Nominal (in)							
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
Curva 90° raio longo	ROSQ.	1,2	1,3	1,4	-	-	-	-
	FLAN.	1	1,15	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
	ROSQ.	6,7	7,3	8,8	11,3	12,8	16,5	18,9
	FLAN.	11,6	12,2	13,7	16,5	18	21,4	23,5
	Diâmetro Nominal (in)							
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
Válvula globo	ROSQ.	24	27,25	33,5	-	-	-	-
	FLAN.	28,7	32,65	36,6	45,7	47,9	49,3	94,5

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
	ROSQ.	0,21	0,28	0,39	0,52	0,64	0,83	0,97
	FLAN.	0,14	0,18	0,25	0,34	0,4	0,52	0,61
	Diâmetro Nominal (in)							
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
Curva 45°	ROSQ.	1,2	1,45	1,7	-	-	-	-
	FLAN.	0,8	0,95	1,1	1,4	1,7	2,3	2,7

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
	ROSQ.	4,6	4,6	5,2	5,5	5,5	5,55	5,55
	FLAN.	4,6	4,6	5,2	5,5	5,5	6,4	6,7
	Diâmetro Nominal (in)							
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
Válvula angular	ROSQ.	5,55	5,55	5,55	-	-	-	-
	FLAN.	8,5	10,05	11,6	15,2	19,2	27,4	36,6

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
	ROSQ.	1,1	1,3	1,6	2	2,3	2,6	2,8
	FLAN.	0,34	0,4	0,49	0,61	0,7	0,83	0,88
	Diâmetro Nominal (in)							
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
Curva 180° raio longo	ROSQ.	3,4	3,7	4	-	-	-	-
	FLAN.	1	1,15	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
	ROSQ.	2,4	2,7	3,4	4	4,6	5,8	6,7
	FLAN.	1,2	1,6	2,2	3	3,7	5,2	6,4
	Diâmetro Nominal (in)							
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
Válvula Retenção Portinhola	ROSQ.	8,2	9,7	11,6	-	-	-	-
	FLAN.	8,3	9,6	11,6	15,2	19,2	27,4	36,6

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
	ROSQ.	0,52	0,73	0,99	1,4	1,7	2,3	2,8
	FLAN.	0,21	0,25	0,3	0,4	0,45	0,55	0,58
	Diâmetro Nominal (in)							
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
Tê fluxo em linha	ROSQ.	3,7	4,45	5,2	-	-	-	-
	FLAN.	0,67	0,74	0,85	1	1,2	1,4	1,6

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
	ROSQ.	0,07	0,07	0,08	0,11	0,12	0,14	0,14
	FLAN.	1,5	2	2,3	5,5	8,1	8,3	8,8
	Diâmetro Nominal (in)							
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
União Filtro Y	ROSQ.	0,16	0,175	0,19	-	-	-	-
	FLAN.	10,4	11,6	12,8	16,2	18,6	-	-

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
	ROSQ.	1,3	1,6	2	2,7	3	3,7	3,9
	FLAN.	0,61	0,8	1	1,3	1,6	2	2,3
	Diâmetro Nominal (in)							
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
Tê fluxo pelo ramal	ROSQ.	5,2	5,8	6,4	-	-	-	-
	FLAN.	2,9	3,3	3,7	4,6	5,5	7,3	9,1

Fonte: Fialho, (2011)

As dimensões encontradas a partir da Figura 22, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões das singularidades.

Singularidades	Quantidade	Comprimento (m)	Comprimento total por item (m)
Curva 90° raio longo roscado	13	0,83	10,79
Tê fluxo pelo ramal roscado	10	2,0	20,0
Válvula gaveta roscada	2	0,25	0,5
Válvula retenção portinhola	3	3,4	10,2
<b>Comprimento total (L2)</b>			<b>41,49</b>

Fonte: Próprio autor

Conhecendo as dimensões das singularidades, foi redimensionado o comprimento total da linha somando o comprimento de singularidades com o comprimento linear da tubulação.

$$L_t = L_1 + L_2$$

$$L_t = 189 + 41,49$$

$$L_t = 230,49 \text{ m}$$

Para analisar a variação do diâmetro nominal aplicou-se novamente a Equação 1, utilizando o comprimento total encontrado.

$$d = 10 * \sqrt[5]{\frac{1,663785 * 10^{-3} * 31,46^{1,85} * 230,49}{0,3 * 10}}$$

$$d = 24,74 \text{ mm}$$

Sendo o valor do diâmetro nominal encontrado foi de 24,74 mm, definiu-se que o valor está dentro dos requisitos, pois está abaixo do diâmetro comercial definido que foi de 26,1 mm que corresponde a 1 polegadas.

### 6.1.2. Rede de alimentação

Para o cálculo da linha de alimentação, escolheu a maior linha, para que o diâmetro das linhas de alimentação tenha o mesmo tamanho e deve-se dividir o volume da vazão de ar pelo número de linhas.

Dados necessários para o dimensionamento

- O comprimento linear da linha de alimentação: 24,6 m;

- Volume de ar corrente + 30%: 31,46 m<sup>3</sup>/h;
- Perda de carga: 0,3 kgf/cm<sup>2</sup>;
- Pressão de trabalho: 10 kgf/cm<sup>2</sup>;
- Número de linhas: 5 linhas de alimentação

$$Q = (Q)/n$$

$$Q = (31,46)/5$$

$$Q = 6,29 \text{ m}^3/h$$

Aplicou-se as informações coletadas na Equação 1, para obtenção do diâmetro nominal da linha de alimentação.

$$d = 10 * \sqrt[5]{\frac{1,663785 * 10^{-3} * 6,29^{1,85} * 24,6}{0,3 * 10}}$$

$$d = 8,37 \text{ mm}$$

O diâmetro interno obtido foi de 8,37 mm, analisando a Figura 21 (pág. 42) para verificar o diâmetro comercial aplicável ao dimensionamento, o diâmetro interno mais próximo é de 9,2 mm que equivale a ¼ polegadas, porém as singularidades começam a partir de ½ polegada que é equivalente a 15,8 mm, portanto esse sendo escolhido.

Com isso, verificou-se a Figura 22 (pág. 43) para obtenção dos dados das singularidades da rede de alimentação, conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões das singularidades da rede de alimentação

Singularidades	Quantidade	Comprimento (m)	Comprimento total por item (m)
Curva 180° raio longo roscada	1	1,1	1,1
Curva 90° raio longo roscado	25	0,67	16,75
Tê fluxo pelo ramal roscado	12	1,3	15,6
Válvula gaveta roscada	1	0,17	0,17
Válvula retenção portinhola	7	2,4	16,8
<b>Comprimento total (L2)</b>			<b>50,42</b>

Fonte: Próprio autor

Para o cálculo do diâmetro final do tubo calculou-se o comprimento total, em seguida calculando o diâmetro do tubo.

$$L_t = L_1 + L_2$$

$$L_t = 24,6 + 50,42$$

$$L_t = 75,02 \text{ m}$$

$$d = 10 * \sqrt[5]{\frac{1,663785 * 10^{-3} * 6,29^{1,85} * 75,02}{0,3 * 10}}$$

$$d = 10,46 \text{ mm}$$

O resultado do diâmetro interno foi de 10,46 mm, estando dentro do diâmetro nominal comercial do tubo escolhido, que é de 15,8 mm igual a ½ polegadas.

## 6.2. Dimensionamento do compressor

Com os resultados obtido de vazão do sistema e pressão de regime (Quadro 4). Através disso fez-se a conversão de m<sup>3</sup>/h para pcm (pé cúbico por minuto).

Quadro 4 – Especificação da vazão e pressão do sistema.

Vazão de ar + 30%	31,46 m <sup>3</sup> /h
Pressão de regime	10 kgf/cm <sup>2</sup>

Fonte: Próprio autor

$$31,46 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 18,52 \text{ pcm}$$

Para determinar o compressor ideal, uma vez que 4 pcm equivale a 1 Hp, calculou-se.

$$\frac{18,52}{4} = 4,63 \text{ Hp}$$

Entretanto consultando o catálogo de compressores da empresa Atlas Copco, o compressor imediatamente acima é o 6 Hp (24,9 pcm), que atende a necessidade da empresa. Assim foi escolhido o compressor conforme a Figura 23.

Figura 23 – Compressor de ar parafuso.



Fonte: Catálogo Atlas Copco.

A Tabela 4 apresenta as especificações comercial do compressor de 6Hp.

Tabela 4 – Dados adicionais do compressor

Deslocamento teórico (pcm)	24,9
Dimensões do Produto CxLxA (mm)	430 x 1.000 x 1.240
Peso Bruto (kg)	166
Potência do motor (hp)	6
Potência do motor (kW)	4,5
Pressão de Trabalho (bar)	10
Pressão de Trabalho (lbf/in <sup>2</sup> )	145
Volume do Reservatório de Ar (l)	100

Fonte: Próprio autor

## 7. CONCLUSÕES

O estudo propõe o dimensionamento de uma rede de distribuição de ar comprimido para uma nova planta de produção de batata chips.

Dimensionar corretamente uma rede de distribuição de ar comprimido requer competências técnicas de engenharia para analisar e interpretar cada caso específico.

O layout da rede de distribuição de ar comprimido incluindo a possibilidade de expansão futura de 30%, através da configuração de distribuição em circuito fechado em combinação com os diâmetros das tubulações encontrados deverá proporcionar ao sistema uma distribuição uniforme do ar que chega aos pontos de alimentação em quantidade suficiente para o funcionamento dos equipamentos. Ao selecionar o compressor e o reservatório de ar, é importante garantir que ele seja adequado para suprir a necessidade de ar comprimido do sistema.

Possibilitou-se concluir que utilizando tubulações de tamanho adequado, o ar comprimido pode ser produzido de forma eficiente e com alta qualidade. A rede de distribuição pode fornecer pressão e vazão suficientes para atender aos requisitos do sistema, garantindo bom desempenho e longa vida útil dos equipamentos pneumáticos.

No trabalho é mencionado que o ideal é trabalhar com dois ou mais compressores, em caso de manutenção em algum deles, tem-se outro para atender a demanda da fábrica. Mas a presidência da empresa preferiu-se trabalhar inicialmente com um compressor.

Este trabalho não só é de grande relevância para o campo da pesquisa em Engenharia Industrial, mas também aborda a importância deste trabalho na preparação profissional e acadêmica do autor, pois trata de um tema muito prevalente na indústria, que é o uso do ar comprimido como fonte de propulsão dos equipamentos.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho foi realizado devido a necessidade da empresa em ampliar seu parque industrial. Com isso, foi desenvolvido um estudo em conjunto com a equipe técnica de manutenção da empresa, através das anotações e conhecimento teórico aprendido na disciplina de Comandos Hidráulicos e Pneumáticos, foram realizados os cálculos para o dimensionamento da rede de distribuição de ar comprimido.

Os resultados foram apresentados a diretoria da empresa, onde foram aprovados e liberados para começarmos a conversar com a empresa responsável pela instalação das outras redes de distribuição das unidades fabril já existentes.

Na primeira reunião com a empresa fornecedora do compressor, foram apresentados os cálculos e o técnico responsável validou os resultados encontrados, onde o compressor será suficiente para atender a demanda e mais a ampliação futura da empresa.

Através desse estudo, a empresa obteve uma redução de custo, pois não necessitou contratar uma empresa para desenvolver o projeto de dimensionamento da rede de distribuição de ar comprimido.

Com esse trabalho, foi possível aplicar alguns conhecimentos aprendido durante o curso, como trabalho em equipe, aprendido na disciplina de Recurso Humanos. Desenvolvimento de uma nova unidade fabril, que foi aprendido na disciplina de Projetos de Indústrias. Entres outras disciplinas, Eletricidade Básica, Administração, Transferência de massa e Manutenção Industrial.

## REFERÊNCIAS

- ATLAS COPCO. **Catálogo G 110-250 G 110-160 VSD**. Bélgica: Atlas Copco, 2016. 12 p. Disponível em: [https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/oil-free-air/documents/G\\_110-250\\_G\\_110-160\\_VSD\\_leaflet\\_EN\\_Antwerp\\_2935059012.pdf](https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/oil-free-air/documents/G_110-250_G_110-160_VSD_leaflet_EN_Antwerp_2935059012.pdf). Acesso em: 20 jul. 2023.
- BOSCH, Robert. **Tecnologia de ar comprimido**: manual do tutor. Campinas: [Bosch Limitada], 2008. 30 p.
- DALL'AMICO, E. R. **Fundamentos da pneumática**. [S.l.]: SMC, 2003.
- FIALHO, A. B. **Automação pneumática**: projetos, dimensionamento e análise de circuitos. 7. ed. São Paulo: Érica, 2011.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- JESUS, C. S. A. D. **Otimização energética em uma unidade industrial**: caso da Cerutil. 2012. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica / Energia e Automação Industrial) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu, 2012.
- METALPLAN. **Manual de ar comprimido**. São Paulo: Metalplan, 2017.
- PARKER. **Dimensionamento de redes de ar comprimido**. Jacareí: Parker Training, 2006.
- ROLLINS, J. P. **Manual de ar comprimido e gases**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- SANTOS, A. A. D.; SILVA, A. F. D. **Automação pneumática**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2009.
- SILVA, E. C. N. **Apostila de pneumática**. São Paulo: Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Poli (USP), 2002.
- TELLES, P. C. D. S. **Tubulações industriais**: cálculo. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- TELLES, P. C. D. S. **Tubulações industriais**: materiais, projeto e montagem. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- VAN WYLEN, G. J. E. S. R. E. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 7. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.