

UNIVERSIDADE DE MOGI DAS CRUZES
ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE LINHA DE AR COMPRIMIDO

Mogi das Cruzes, SP

2023

UNIVERSIDADE DE MOGI DAS CRUZES

BÁRBARA MARTINS DE FARIA

LETICIA FIGUEIRA SANTOS

LETICIA MORAIS DE LEMOS

RAISSA SATO

PROJETO DE LINHA DE AR COMPRIMIDO

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica da Universidade Mogi das Cruzes como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Antônio Capistrano Alckmin

Mogi das Cruzes, SP

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a todos que tornaram possível este trabalho e a visita técnica, pela receptividade e pelos insights valiosos durante a visita. À nossa família, sincero agradecimento pelo apoio constante. Aos nossos orientadores, Antônio Capistrano Alckmin e ao Fausto Mori Viana, agradecemos as orientações sábias. Cada um de vocês desempenharam um papel fundamental, e estamos gratas pela colaboração e apoio ao longo desta jornada acadêmica. Cada experiência compartilhada foi crucial para o sucesso deste projeto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Compressor rotacional parafuso.....	15
Figura 2 – Compressor de pistão.....	15
Figura 3 – Compressor parafuso.....	16
Figura 4 – Compressor centrífugo.....	16
Figura 5 – Válvula de controle.....	26
Figura 6 – Válvula de segurança.....	27
Figura 7 – Válvula de retenção.....	28
Figura 8 – Filtro de partículas finas.....	34
Figura 9 – Filtro de óleo.....	35
Figura 10 – Filtro coalescentes.....	36
Figura 11 – Secador.....	40
Figura 12 – Acessórios do reservatório de ar comprimido.....	42
Figura 13 – Componentes da linha de ar comprimido.....	43
Figura 14 – Componentes da linha de ar comprimido.....	44
Figura 15 – Sistema de cores de Munsell.....	46
Figura 16 – Cores das tubulações.....	47
Figura 17 – Composição do ar.....	48
Figura 18 - Pressões absoluta e manométrica, de acordo com os níveis de referência.....	52
Figura 19 - Produção, distribuição e tratamento do ar comprimido.....	53
Figura 20 – Compressor ELGI (2 unidades).....	57
Figura 21 – Compressor KAESER.....	57
Figura 22 – Tubulação com pontos de corrosão.....	58

Figura 23 – Tubulação com pintura não conforme.....	58
Figura 24 – Acessórios da linha necessitando de manutenção.....	58
Figura 25 – Ponto de vazamento de ar.....	59
Figura 26 – Conjunto lubrificador.....	73
Figura 27 – Sensor de vazão.....	74
Figura 28 – Sensor de pressão.....	74
Figura 29 – Sensor de vazão.....	75
Figura 30 - Válvula de Esfera.....	75
Figura 31 - Secador de ar por refrigeração.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de ar comprimido seco versus lubrificado.....	12
Tabela 2 – Umidade absorvida pelo ar (ROLLINS, 2004).....	49
Tabela 3 – Padrão da atmosfera nos EUA ao nível do mar.....	52
Tabela 4 – Classes de qualidade pela norma ISO-8573-1.....	54
Tabela 5 - Consumo de ar por equipamento.....	62
Tabela 6 – Diâmetros de tubos de aço carbono DIN 2440.....	64
Tabela 7 – Comprimento equivalente das conexões da rede principal.....	64
Tabela 8 – Comprimento equivalente das conexões da linha secundária de abastecimento do galpão.....	66
Tabela 9 – Comprimento equivalente das conexões da linha de entrada do tanque pulmão...68	
Tabela 10 – Comprimento equivalente das conexões da linha de saída do tanque pulmão.....	70
Tabela 11 – Comprimento equivalente das conexões da linha de entrada das máquinas.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASME – American Society of Mechanical Engineers (Sociedade Norte Americana de Engenheiros Mecânicos).

DIN – Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normatização).

EUA – Estados Unidos da América.

ISO – International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização).

NBR – Norma Brasileira.

NR – Normas Regulamentadoras.

PEAD – Polietileno de Alta Densidade.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Objetivo geral.....	11
1.2	Objetivo específico	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	HISTÓRICO DO USO DO AR COMPRIMIDO	12
2.1.1	Origens e desenvolvimento do uso do ar comprimido.....	12
2.1.2	Avanços tecnológicos ao longo do tempo	12
2.2	DEFINIÇÃO E FUNÇÃO DO AR COMPRIMIDO	13
2.2.1	Conceito de ar comprimido e sua utilização	13
2.2.2	Funções e aplicações do ar comprimido na indústria	14
2.3	TIPOS DE AR COMPRIMIDO.....	15
2.3.1	Seco versus lubrificado	15
2.3.2	Classificação do ar comprimido quanto à pureza e qualidade	16
2.4	COMPRESSOR	17
2.4.1	Definição e princípio de funcionamento do compressor	17
2.4.2	Tipos de compressores: alternativo, rotativo, parafuso e centrífugo	18
2.4.3	Importância do compressor na geração de ar comprimido	21
2.4.4	Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de compressores	22
2.5	REFRIGERADOR DE AR	23
2.5.1	Função e importância do refrigerador de ar no sistema de ar comprimido	23
2.5.2	Princípio de funcionamento do refrigerador de ar	24
2.5.3	Tipos de refrigeradores de ar: arrefecedores a ar e a água.....	25
2.5.4	Vantagens e desvantagens dos refrigeradores de ar.....	26
2.6	VÁLVULAS	27
2.6.1	Papel e importância das válvulas no sistema de ar comprimido.....	27

2.6.2	Tipos de válvulas	28
2.6.3	Funcionamento e características das diferentes válvulas.....	29
2.7	Sensores de monitoramento e controle	33
3	FILTROS.....	35
3.1	Função e importância dos filtros no sistema de ar comprimido	35
3.2	Tipos de filtros: de partículas, de óleo, coalescentes	36
3.3	Eficiência dos filtros	38
3.4	Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de filtros	39
3.4.1	Filtros coalescentes:	39
4	SECADOR.....	41
5	RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO.....	43
5.1	Principais acessórios do reservatório	43
6	CONDENSADOR.....	45
7	LINHA DE AR COMPRIMIDO	46
8	MATERIAIS DE TUBULAÇÃO DE AR COMPRIMIDO.....	47
9	ESPECIFICAÇÃO DE CORES EM TUBOS E TUBULAÇÕES DE UMA REDE DE AR COMPRIMIDO	48
10	PROPRIEDADES DO AR.....	50
10.1	Ar atmosférico e Ar comprimido	50
10.2	Umidade	52
10.3	Comportamento do ar comprimido	52
10.4	Gás Ideal	52
10.5	Pressão	53
10.6	Preparação do ar.....	54
10.7	Qualidade do ar	55

11	NORMAS REGULAMENTADORAS.....	57
12	PROJETO DE DIMENSIONAMENTO DE UMA REDE DE AR COMPRIMIDO	58
	12.1 Estudo de caso - Inspeção das linhas de ar comprimido de uma fábrica de fertilizantes.....	58
	12.2 Evidências	58
	12.3 Escopo.....	62
13	RESULTADOS	63
	13.1 Material Da tubulação.....	63
	13.2 Pintura da TUBULAÇÃO.....	63
	13.3 Consumo de ar	63
	13.4 Dimensionamento DA TUBULAÇÃO.....	65
	13.5 Dimensionamento da linha SECUNDÁRIA - abastecimento do galpão da fábrica.....	68
	13.6 Dimensionamento da linha de entrada no tanque pulmão	70
	13.7 Dimensionamento da linha de saída no tanque pulmão	72
	13.8 Dimensionamento DAS linhas que abastecem as máquinas	74
	13.9 Tanque pulmão.....	75
14	Escolha de acessórios da linha de ar comprimido	77
	14.1 Filtro.....	77
	14.2 Sensores de monitoramento e controle	77
	14.3 Válvulas	79
	14.4 Secador de ar.....	79
15	CONCLUSÃO.....	81
	REFERÊNCIAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso eficiente de recursos tem se tornado uma prioridade essencial para as indústrias modernas, impulsionando a busca por tecnologias que não apenas otimizem processos, mas também promovam a sustentabilidade e a eficiência energética. Nesse contexto, a utilização de ar comprimido emerge como uma solução versátil e fundamental. A capacidade de automatizar operações, gerar energia mecânica e aprimorar o desempenho de equipamentos torna o ar comprimido uma peça-chave nos setores que vão desde a indústria alimentícia até a farmacêutica.

Este trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica se propõe a explorar e aprofundar os aspectos fundamentais do projeto de uma linha de ar comprimido. Para isso, adotaremos uma abordagem metodológica de natureza aplicada, com o objetivo de contribuir para o entendimento detalhado da tubulação de ar comprimido. Este estudo visa não apenas analisar a infraestrutura da tubulação, mas também fornece uma compreensão abrangente dos componentes das máquinas envolvidas e dos cálculos essenciais para o dimensionamento adequado da tubulação.

Ao analisar os componentes essenciais do sistema de ar comprimido, abordaremos aspectos como a quantidade de ar necessária para as atividades industriais e o nível de pressão requerido para assegurar o funcionamento eficiente dos processos de produção. Nosso objetivo é não apenas oferecer uma visão abrangente desses elementos fundamentais, mas destacar a importância da eficiência na criação e execução de sistemas de ar comprimido.

A pesquisa aqui apresentada não apenas busca avançar o conhecimento técnico no campo da engenharia mecânica, mas também pretende oferecer insights práticos e aplicáveis para profissionais que lidam com sistemas de ar comprimido. Ao final deste trabalho, espera-se que os leitores possuam uma compreensão aprofundada dos princípios de projeto, operação e otimização de linhas de ar comprimido, contribuindo assim para a eficiência e sustentabilidade das práticas industriais.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é conduzir uma análise detalhada para identificar a opção mais adequada de tubulação de ar comprimido no processo produtivo. Isso envolve ajustar as linhas existentes para atender às necessidades específicas dos nossos equipamentos, visando aprimorar a eficiência do sistema.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Trata-se de efetuar a adequação das linhas existentes com base nas necessidades dos equipamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DO USO DO AR COMPRIMIDO

2.1.1 Origens e desenvolvimento do uso do ar comprimido

O uso do ar comprimido remete a séculos atrás, com os primeiros registros históricos indicando sua utilização desde a Antiguidade. Os antigos egípcios, por exemplo, utilizavam juncos de papiro para construir flautas que funcionavam com base no princípio do ar comprimido (Smith, 2015). No entanto, foi somente no século XVII que o uso do ar comprimido começou a ganhar mais relevância e aplicação prática.

Um marco importante no desenvolvimento do uso do ar comprimido foi a invenção da bomba de ar pelo físico e engenheiro britânico Robert Hooke, em 1681. Essa bomba permitia comprimir o ar em um recipiente, o que possibilitou a realização de experimentos e observações fundamentais no campo da física (Smith, 2015).

Posteriormente, no século XIX, o uso do ar comprimido expandiu-se consideravelmente com o advento da Revolução Industrial. Nesse período, surgiram máquinas a vapor e motores movidos a ar comprimido, que foram amplamente utilizados em diferentes setores da indústria, como mineração, construção civil e transporte (Hirst, 2018).

Ao longo do tempo, houve avanços significativos na tecnologia relacionada ao ar comprimido. A introdução de compressores alternativos e rotativos, no final do século XIX e início do século XX, trouxe maior eficiência na geração e controle do ar comprimido. Além disso, o desenvolvimento de sistemas de filtragem e secagem do ar comprimido contribuiu para melhorar a qualidade e a confiabilidade do seu uso (Bégaud & Desoutter, 2014).

2.1.2 Avanços tecnológicos ao longo do tempo

O uso do ar comprimido evoluiu significativamente ao longo do tempo, impulsionado por avanços tecnológicos que permitiram melhorias na eficiência, controle e aplicação dessa forma de energia. Diversos marcos históricos contribuíram para o desenvolvimento do uso do ar comprimido na indústria.

Além dos compressores, outros avanços tecnológicos foram fundamentais para a utilização eficaz do ar comprimido. O desenvolvimento de válvulas de controle, válvulas de segurança e válvulas de retenção permitiu um controle preciso do fluxo de ar e a proteção dos sistemas pneumáticos contra sobre pressão e vazamentos (Hirst, 2018). A aplicação de válvulas pneumáticas também contribuiu para a automação de processos industriais, aumentando a eficiência e a produtividade.

A introdução de sistemas de filtragem e secagem do ar comprimido foi outro avanço tecnológico crucial. Os filtros de partículas, filtros de óleo e filtros coalescentes foram desenvolvidos para remover impurezas, contaminantes e excesso de umidade do ar comprimido, garantindo sua qualidade e evitando danos aos equipamentos e processos (Bégaud & Desoutter, 2014). A utilização desses filtros melhorou a confiabilidade e a vida útil dos sistemas pneumáticos, além de contribuir para a preservação do meio ambiente.

2.2 DEFINIÇÃO E FUNÇÃO DO AR COMPRIMIDO

2.2.1 Conceito de ar comprimido e sua utilização

O ar comprimido é o resultado da compressão do ar atmosférico, ou seja, o ar que nos rodeia. Ele é obtido por meio de compressores, que reduzem o volume do ar e aumentam sua pressão (Bégaud & Desoutter, 2014). O ar comprimido é amplamente utilizado em diversos setores da indústria devido às suas características e propriedades únicas.

A principal função do ar comprimido é fornecer energia pneumática para acionar equipamentos e sistemas que requerem força ou movimento. Ele pode ser utilizado para alimentar máquinas, motores, ferramentas pneumáticas e sistemas de controle automatizados. Além disso, o ar comprimido também desempenha um papel importante em processos de secagem, limpeza, pintura e transporte de materiais (Hirst, 2018).

A versatilidade do ar comprimido permite sua aplicação em uma ampla gama de indústrias, como automobilística, alimentícia, farmacêutica, química, metalúrgica, entre outras. Sua utilização traz diversos benefícios, como alta disponibilidade, facilidade de transporte e armazenamento, além de ser uma fonte de energia limpa e segura.

No entanto, é importante ressaltar que o ar comprimido também possui algumas desvantagens. O processo de compressão gera calor e consome energia, o que pode resultar em perdas de eficiência e aumento dos custos operacionais. Além disso, o ar comprimido pode apresentar contaminantes, como partículas, óleo e umidade, que requerem sistemas de filtragem e secagem adequados para garantir sua qualidade e evitar danos aos equipamentos (Bégaud & Desoutter, 2014).

2.2.2 Funções e aplicações do ar comprimido na indústria

O ar comprimido possui uma ampla variedade de funções e aplicações na indústria, devido às suas propriedades e capacidades únicas. Ele desempenha um papel fundamental em diversos processos e operações industriais (Hirst, 2018).

- **Acionamento de máquinas e ferramentas:** O ar comprimido é utilizado para acionar máquinas e ferramentas pneumáticas, como furadeiras, lixadeiras, chaves de impacto, pistolas de pintura, entre outras. Sua pressão e fluxo controlados permitem o funcionamento eficiente e preciso desses equipamentos, possibilitando atividades de montagem, usinagem e manutenção.
- **Controle de processos:** O ar comprimido é amplamente utilizado em sistemas de controle pneumático para automatizar processos industriais. Válvulas pneumáticas são acionadas pelo ar comprimido, controlando o fluxo de fluidos e permitindo a operação de diferentes etapas de produção, como abertura e fechamento de válvulas, movimentação de cilindros e atuadores.
- **Limpeza e secagem:** O ar comprimido é empregado para a limpeza de equipamentos, remoção de resíduos, partículas e detritos em áreas industriais. Além disso, é utilizado em processos de secagem, como a remoção de umidade em sistemas de tubulações e componentes.
- **Transporte de materiais:** O ar comprimido é aplicado no transporte pneumático de materiais granulados, como grãos, pós e pellets. Por meio de tubulações e sistemas de transporte, o ar comprimido cria fluxos de ar que movem esses materiais em linhas de produção, evitando a necessidade de transporte manual ou mecânico.

- Geração de energia: O ar comprimido também pode ser usado na geração de energia, por meio de motores pneumáticos. Esses motores convertem a energia do ar comprimido em movimento mecânico, podendo ser utilizados em equipamentos e sistemas que demandam baixa velocidade e alto torque.

Essas são apenas algumas das principais funções e aplicações do ar comprimido na indústria. Sua versatilidade e capacidade de fornecer energia e controle em diferentes processos tornam-no uma fonte valiosa em diversos setores industriais.

2.3 TIPOS DE AR COMPRIMIDO

2.3.1 Seco versus lubrificado

Existem dois principais tipos de ar comprimido: seco e lubrificado. Cada um possui características e aplicações distintas (WAKEEL, 2018).

- Ar comprimido seco: O ar comprimido seco é aquele que passa por processos de filtragem e secagem para remover a umidade e outros contaminantes. Isso é essencial em aplicações que requerem ar limpo e seco, como instrumentação, controle pneumático de precisão, pintura e processos que envolvem componentes sensíveis à umidade. A remoção da umidade é realizada por meio de secadores de ar, como secadores por refrigeração, secadores de adsorção ou secadores de membrana.
- Ar comprimido lubrificado: O ar comprimido lubrificado é aquele que contém uma quantidade controlada de óleo lubrificante, adicionado intencionalmente para lubrificar equipamentos pneumáticos, como compressores, ferramentas e cilindros. O óleo lubrificante ajuda a reduzir o atrito, o desgaste e a corrosão nas partes móveis dos equipamentos, prolongando sua vida útil e mantendo um bom desempenho. No entanto, em certas aplicações, como indústria alimentícia, farmacêutica ou em processos que exigem ar puro, o ar comprimido lubrificado pode ser inadequado, pois pode contaminar os produtos ou afetar a qualidade do ar.

É importante ressaltar que, mesmo no caso do ar comprimido lubrificado, a quantidade de óleo presente deve ser controlada e monitorada para evitar excessos e garantir que não haja

contaminação indesejada em processos sensíveis. Para isso, são utilizados filtros de óleo e sistemas de separação de óleo e água.

A escolha entre ar comprimido seco e ar comprimido lubrificado depende das necessidades e requisitos específicos de cada aplicação industrial. Considerações como a qualidade do ar exigida, a natureza dos equipamentos envolvidos e os padrões de segurança e regulamentações devem ser levados em conta para determinar o tipo de ar comprimido mais adequado, abaixo uma tabela de comparação (WAKEEL, 2018).

Tabela 1 – Comparação de ar comprimido seco versus lubrificado

Características	Ar Comprimido Seco	Ar Comprimido Lubrificado
Presença de umidade	Baixa umidade	Pode conter umidade
Presença de óleo	Sem óleo lubrificante	Contém óleo lubrificante
Aplicações	Instrumentação, controle pneumático de precisão, pintura, processos sensíveis à umidade	Ferramentas pneumáticas, cilindros e outras aplicações onde a lubrificação é necessária
Contaminação	Menor risco de contaminação, adequado para aplicações que requerem ar puro e limpo	Pode causar contaminação em determinadas aplicações (alimentos, farmacêuticos)
Manutenção	Menor necessidade de manutenção em termos de remoção de óleo e água	Requer manutenção adequada para garantir a qualidade do óleo e evitar contaminação
Custo operacional	Geralmente maior custo operacional devido a sistemas de secagem e filtragem adequados	Pode ter custo operacional menor devido a menor necessidade de secagem e filtragem

Fonte: Autoria.

2.3.2 Classificação do ar comprimido quanto à pureza e qualidade

O ar comprimido pode ser classificado quanto à sua pureza e qualidade com base em padrões e normas estabelecidos por diversas organizações e instituições. Essas classificações

ajudam a garantir que o ar comprimido atenda aos requisitos específicos de diferentes aplicações industriais. A seguir, são apresentadas algumas das classificações mais comuns:

- ISO 8573-1: A norma ISO 8573-1 é amplamente utilizada para classificar a pureza do ar comprimido. Ela estabelece limites para diferentes contaminantes presentes no ar comprimido, como partículas sólidas, umidade (ponto de orvalho), óleo e outros contaminantes (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2010).
- Classes de pureza do ar comprimido: As classes de pureza do ar comprimido, conforme definidas pela norma ISO 8573-1, são representadas por três números separados por pontos. Cada número indica a concentração máxima permitida para um contaminante específico. Por exemplo, a classe de pureza "1.2.1" significa que o ar comprimido atende aos limites máximos permitidos para partículas sólidas, umidade e óleo, respectivamente (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2010).
- Padrões específicos de aplicação: Além da norma ISO 8573-1, algumas indústrias têm padrões específicos de pureza do ar comprimido para atender a requisitos particulares. Por exemplo, a indústria alimentícia, farmacêutica e eletrônica pode ter padrões mais rigorosos para minimizar a presença de contaminantes no ar comprimido (ZAPPE, 2015).

A classificação do ar comprimido quanto à pureza e qualidade é importante para garantir o desempenho adequado e a integridade de equipamentos e processos que dependem do uso desse ar. Portanto, é essencial seguir as diretrizes e padrões estabelecidos para cada aplicação específica.

2.4 COMPRESSOR

2.4.1 Definição e princípio de funcionamento do compressor

Um compressor é um dispositivo mecânico utilizado para aumentar a pressão de um gás, como o ar comprimido. Sua função principal é reduzir o volume de um gás e aumentar sua pressão, fornecendo um fluxo contínuo e pressurizado para diversas aplicações industriais.

O princípio de funcionamento básico de um compressor é baseado na captura de um volume de gás em uma câmara e, em seguida, diminuir o volume dessa câmara para aumentar a pressão do gás. Isso é alcançado por meio de diferentes mecanismos de compressão.

Cada tipo de compressor possui características distintas de eficiência, capacidade de fluxo e pressão de trabalho, sendo selecionado de acordo com a aplicação específica e as necessidades de pressão e volume de ar comprimido.

2.4.2 Tipos de compressores: alternativo, rotativo, parafuso e centrífugo

Existem diferentes tipos de compressores utilizados na indústria, cada um com características específicas de funcionamento e aplicação. A seguir, são apresentados os principais tipos de compressores:

- Compressor alternativo: Também conhecido como compressor de pistão, utiliza um ou mais pistões para comprimir o ar. O movimento alternativo do pistão dentro de um cilindro cria o aumento de pressão. Esse tipo de compressor é comumente usado em aplicações de baixa a média pressão, como em sistemas de ar comprimido para pequenas oficinas e ferramentas pneumáticas (MANUAL DE AR COMPRIMIDO, 2001).
- Compressor rotativo: Os compressores rotativos operam por meio de rotores que giram em alta velocidade para comprimir o ar. Existem diferentes tipos de compressores rotativos, incluindo o compressor de palhetas, compressor de lóbulos e compressor de parafuso (MOLINA, 2014).

Figura 1 – Compressor rotacional



Fonte: Intermach - Compressores

- Compressores de pistão: Utilizam um ou mais pistões que se movem dentro de cilindros para comprimir o ar. O ar é aspirado para o cilindro durante o movimento de retorno do pistão e, em seguida, é comprimido quando o pistão se move para dentro do cilindro (AL-WAKED; ZOUGHAIB; OULADSINE, 2018).

Figura 2 – Compressor de pistão



Fonte: Intermach - Compressores

- Compressor de parafuso: Esse tipo de compressor utiliza dois parafusos rotativos que se encaixam entre si para comprimir o ar. O ar é capturado nos espaços entre os parafusos e comprimido à medida que os parafusos se movem em direção à saída. Os compressores de parafuso são amplamente utilizados em aplicações industriais de média a alta pressão, como em sistemas de ar comprimido para fábricas, hospitais e indústrias automotivas (ZAPPE, 2015).

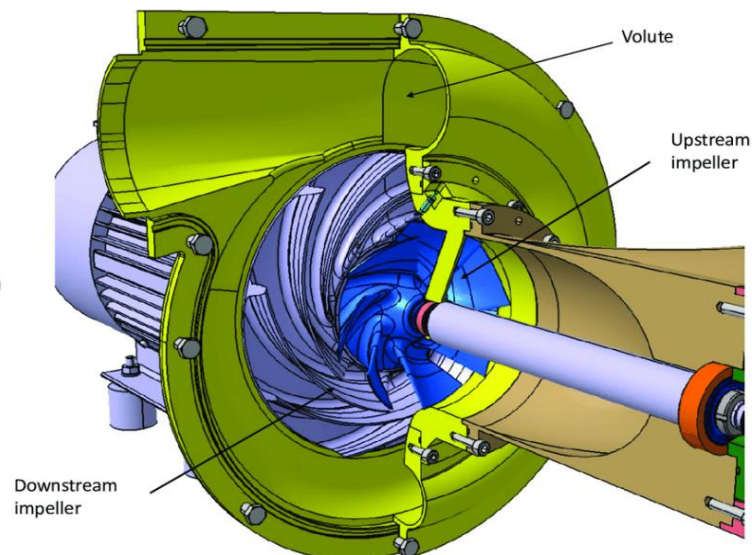
Figura 3 – Compressor parafuso



Fonte: Intermach - Compressores

- Compressor centrífugo: Esse tipo de compressor utiliza a força centrífuga para comprimir o ar. O ar é acelerado por um rotor de alta velocidade e, em seguida, direcionado para uma carcaça onde é comprimido. Os compressores centrífugos são adequados para aplicações que exigem altas taxas de fluxo de ar e baixa pressão, como em sistemas de ar-condicionado e refrigeração industrial (KUJAWSKI et al., 2016).

Figura 4 – Compressor centrífugo



Fonte: Researchgate - Compressores

Cada tipo de compressor possui vantagens e limitações, e a escolha do compressor mais adequado depende das necessidades específicas de cada aplicação industrial.

2.4.3 Importância do compressor na geração de ar comprimido

O compressor desempenha um papel fundamental na geração de ar comprimido, sendo um componente essencial nos sistemas de ar comprimido utilizados na indústria. Sua importância pode ser destacada por diversos motivos:

- **Geração de ar comprimido:** O compressor é responsável por comprimir o ar atmosférico e fornecer ar comprimido em alta pressão. Esse ar comprimido é utilizado como fonte de energia para uma ampla variedade de equipamentos e ferramentas pneumáticas nas instalações industriais.
- **Alimentação de processos:** O ar comprimido é utilizado em diversos processos industriais, como acionamento de máquinas, controle de válvulas, transporte pneumático, pulverização e secagem. O compressor fornece o ar comprimido necessário para garantir o funcionamento adequado desses processos.
- **Eficiência energética:** Compressores eficientes contribuem para a eficiência energética dos sistemas de ar comprimido. Ao utilizar compressores com alto rendimento, é possível reduzir o consumo de energia e os custos operacionais relacionados à geração de ar comprimido (KANTOR, 2012).
- **Manutenção da pressão:** O compressor é responsável por manter a pressão do ar comprimido dentro dos limites necessários para as aplicações industriais. Ele compensa as perdas de pressão ao longo do sistema de distribuição, garantindo que o ar chegue aos pontos de uso com a pressão adequada.
- **Controle de qualidade do ar:** O compressor desempenha um papel importante na garantia da qualidade do ar comprimido. Os compressores modernos são equipados com sistemas de filtragem e secagem, removendo impurezas, óleo e umidade do ar comprimido antes de ser utilizado nas aplicações industriais (SMITH, 2017).

A escolha adequada do compressor, considerando a capacidade de fluxo, pressão de trabalho e eficiência energética, é essencial para garantir uma geração confiável e eficiente de ar comprimido nas instalações industriais.

2.4.4 Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de compressores

Existem diferentes tipos de compressores disponíveis no mercado, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens. A seguir, são apresentadas as características distintas dos principais tipos de compressores:

2.4.4.1 Compressor alternativo:

- Vantagens:
 - Construção simples e custo inicial relativamente baixo.
 - Adequado para aplicações de baixa a média pressão.
 - Facilidade de manutenção e reparo.

- Desvantagens:
 - Produz vibrações e ruídos significativos durante a operação.
 - Menor eficiência energética em comparação com outros tipos de compressores.
 - Necessidade de manutenção frequente dos componentes móveis.

2.4.4.2 Compressor rotativo:

- Vantagens:
 - Compacto e de tamanho reduzido, ocupando menos espaço.
 - Funcionamento suave, com baixo nível de vibração e ruído.
 - Eficiência energética relativamente alta.

- Desvantagens:
 - Maior custo inicial em comparação com compressores alternativos.
 - Necessidade de manutenção especializada devido à complexidade dos componentes rotativos.
 - Capacidade limitada em relação aos compressores alternativos.

2.4.4.3 Compressor de parafuso:

- Vantagens:
 - Alta capacidade de fluxo e pressão.
 - Funcionamento contínuo e suave.
 - Menor vibração e ruído em comparação com compressores alternativos.
- Desvantagens:
 - Custo inicial mais elevado.
 - Necessidade de óleo lubrificante, exigindo cuidados adicionais para evitar contaminação do ar comprimido.
 - Requer manutenção regular do sistema de lubrificação.

2.4.4.4 Compressor centrífugo:

- Vantagens:
 - Alta capacidade de fluxo de ar.
 - Operação livre de óleo, proporcionando ar comprimido limpo.
 - Menor manutenção em comparação com outros tipos de compressores.
- Desvantagens:
 - Requer velocidade e controle preciso para funcionar corretamente.
 - Limitado a aplicações de baixa pressão.
 - Maior custo inicial e complexidade de projeto.

2.5 REFRIGERADOR DE AR

2.5.1 Função e importância do refrigerador de ar no sistema de ar comprimido

O refrigerador de ar desempenha um papel fundamental no sistema de ar comprimido, sendo responsável pela remoção do calor gerado durante a compressão do ar (MAZUR, 2001). Suas principais funções são reduzir a temperatura do ar comprimido e condensar a umidade presente no ar, contribuindo para melhorar a qualidade e a eficiência do sistema (ZAPPE, 2015).

A importância do refrigerador de ar reside em diversos aspectos:

- **Remoção do calor:** Durante a compressão do ar, ocorre um aumento significativo de temperatura. O refrigerador de ar remove o calor gerado, evitando danos aos equipamentos e garantindo um ar comprimido com temperatura controlada.
- **Condensação da umidade:** O ar comprimido contém vapor de água, que pode se condensar em forma de água líquida quando resfriado. O refrigerador de ar promove a condensação desse vapor, ajudando a remover a umidade e evitando problemas relacionados à presença de água no sistema.
- **Preservação da qualidade do ar comprimido:** Ao reduzir a temperatura e condensar a umidade, o refrigerador de ar contribui para a obtenção de um ar comprimido limpo e seco. Isso é essencial para garantir o bom funcionamento de equipamentos pneumáticos e evitar danos causados pela presença de água ou partículas no sistema.
- **Eficiência energética:** Ao controlar a temperatura do ar comprimido, o refrigerador de ar auxilia na redução do consumo de energia. Isso ocorre porque o ar comprimido resfriado requer menos energia para ser comprimido novamente em etapas subsequentes do processo.

Portanto, o refrigerador de ar desempenha um papel crucial na manutenção da qualidade e eficiência do sistema de ar comprimido, garantindo o fornecimento de um ar limpo, seco e com temperatura adequada para as aplicações industriais.

2.5.2 Princípio de funcionamento do refrigerador de ar

O refrigerador de ar é um equipamento que utiliza o princípio da troca de calor para resfriar o ar comprimido. O seu funcionamento baseia-se no processo de refrigeração por compressão de vapor.

O processo inicia-se com o ar comprimido quente e úmido entrando no refrigerador. Esse ar é direcionado para um sistema de trocadores de calor, onde ocorre a transferência de calor para um meio refrigerante.

O refrigerante, geralmente um fluido refrigerante como o R134a ou R404a, circula dentro do sistema de trocadores de calor. Ele entra no evaporador, que é a parte do refrigerador

onde ocorre a absorção do calor do ar comprimido. O ar quente transfere seu calor para o refrigerante, causando a evaporação parcial do refrigerante (MAZUR, 2001).

Conforme o refrigerante evapora, ele absorve o calor do ar, reduzindo sua temperatura e condensando a umidade presente. O ar resfriado e desumidificado é então direcionado para fora do refrigerador.

O refrigerante gasoso, que absorveu o calor do ar comprimido, é encaminhado para o compressor do refrigerador. O compressor aumenta a pressão do refrigerante, elevando sua temperatura e pressão. Em seguida, o refrigerante passa pelo condensador, onde ocorre a transferência de calor para o meio ambiente ou para um sistema de resfriamento (MAZUR, 2001).

No condensador, o refrigerante se transforma em líquido devido à dissipação do calor. Em seguida, o refrigerante líquido passa por uma válvula de expansão, que reduz sua pressão e temperatura, preparando-o para entrar novamente no evaporador e reiniciar o ciclo de refrigeração. Dessa forma, o refrigerador de ar remove o calor do ar comprimido, resfriando-o e condensando a umidade, resultando em um ar comprimido mais frio e seco.

2.5.3 Tipos de refrigeradores de ar: arrefecedores a ar e a água

Existem dois principais tipos de refrigeradores de ar utilizados no sistema de ar comprimido: os arrefecedores a ar e os arrefecedores a água.

- **Arrefecedores a ar:** Os arrefecedores a ar são os mais comuns e utilizam o ar ambiente para resfriar o ar comprimido. Eles consistem em um conjunto de aletas de refrigeração que permitem a dissipação do calor do ar comprimido para o ambiente circundante. O ar quente proveniente do compressor passa por entre as aletas, enquanto o ar ambiente flui sobre as aletas, removendo o calor do ar comprimido e reduzindo sua temperatura. Esse tipo de refrigerador é simples, de fácil instalação e manutenção, além de não requerer água adicional para o resfriamento (ZAPPE, 2015).

- Arrefecedores a água: Os arrefecedores a água, como o próprio nome indica, utilizam água para resfriar o ar comprimido. Nesse tipo de refrigerador, o ar quente proveniente do compressor é direcionado através de um trocador de calor onde há circulação de água fria. A transferência de calor ocorre entre o ar e a água, resultando no resfriamento do ar comprimido. Os arrefecedores a água tendem a ser mais eficientes na remoção de calor do ar comprimido em comparação com os arrefecedores a ar. No entanto, eles exigem uma fonte de água e um sistema de resfriamento, o que pode aumentar a complexidade de instalação e manutenção (ZAPPE, 2015).

A escolha entre arrefecedores a ar e a água depende das necessidades específicas do sistema, como a temperatura desejada do ar comprimido, disponibilidade de água e requisitos de eficiência energética.

2.5.4 Vantagens e desvantagens dos refrigeradores de ar

Os refrigeradores de ar, sejam eles arrefecedores a ar ou a água, apresentam vantagens e desvantagens em sua utilização no sistema de ar comprimido. A seguir, são destacadas algumas delas (ZAPPE, 2015).

Vantagens dos refrigeradores de ar:

- Simplicidade: Os refrigeradores de ar são relativamente simples em sua construção e operação, o que facilita a instalação e manutenção.
- Baixo custo inicial: Em comparação com outros equipamentos de resfriamento, os refrigeradores de ar costumam ter um custo inicial mais baixo.
- Não requerem água adicional: Os arrefecedores a ar não dependem de uma fonte de água externa, tornando sua instalação e operação mais simples.

Desvantagens dos refrigeradores de ar:

- Menor eficiência de resfriamento: Os refrigeradores de ar geralmente apresentam uma menor capacidade de resfriamento em comparação com os refrigeradores a água. Isso pode resultar em uma temperatura de saída do ar comprimido menos baixa.

- Limitação de temperatura: Os refrigeradores de ar podem ter dificuldades em alcançar temperaturas de saída de ar muito baixas, especialmente em ambientes com temperaturas ambientes elevadas.
- Dependência das condições ambientais: A eficiência dos refrigeradores de ar pode ser afetada pelas condições ambientais, como a temperatura e umidade do ar ambiente. Em ambientes muito quentes e úmidos, o desempenho de resfriamento pode ser comprometido.

É importante considerar as características específicas do sistema de ar comprimido e as necessidades de resfriamento ao avaliar as vantagens e desvantagens dos refrigeradores de ar. A escolha adequada dependerá das demandas de resfriamento, eficiência energética e disponibilidade de recursos.

2.6 VÁLVULAS

2.6.1 Papel e importância das válvulas no sistema de ar comprimido

As válvulas desempenham um papel essencial no sistema de ar comprimido, sendo responsáveis por controlar o fluxo de ar, direcionar o ar comprimido para os componentes desejados e regular a pressão. Elas atuam como dispositivos de controle, permitindo a abertura e o fechamento do fluxo de ar em determinados pontos do sistema (ZAPPE, 2015).

A importância das válvulas no sistema de ar comprimido pode ser destacada pelas seguintes funções:

- Controle de fluxo: As válvulas controlam a vazão de ar comprimido em diferentes partes do sistema, permitindo a distribuição adequada do ar para os equipamentos e processos que requerem. Elas podem ser ajustadas para aumentar ou diminuir o fluxo de ar, de acordo com as necessidades operacionais.
- Direcionamento do ar: As válvulas são utilizadas para direcionar o fluxo de ar comprimido para os componentes específicos, como cilindros pneumáticos, atuadores e ferramentas pneumáticas. Elas garantem que o ar seja direcionado para os locais corretos, permitindo o funcionamento adequado dos equipamentos.

- **Regulação da pressão:** As válvulas de controle de pressão são essenciais para manter a pressão do ar comprimido dentro dos níveis desejados. Elas ajudam a evitar variações excessivas de pressão, garantindo a operação segura e eficiente dos componentes do sistema.

Além dessas funções, as válvulas também desempenham um papel importante na segurança do sistema, permitindo o bloqueio do fluxo de ar em emergências ou manutenção.

Em resumo, as válvulas são componentes fundamentais no sistema de ar comprimido, sendo responsáveis pelo controle preciso do fluxo, direcionamento adequado do ar e regulação da pressão. Sua correta seleção, instalação e manutenção são essenciais para garantir o desempenho e a eficiência do sistema como um todo.

2.6.2 Tipos de válvulas

No sistema de ar comprimido, existem diferentes tipos de válvulas, cada uma com sua função específica. A seguir, são apresentados os principais tipos de válvulas utilizadas no contexto do ar comprimido (ZAPPE, 2015).

- **Válvulas de controle:** As válvulas de controle são projetadas para regular o fluxo de ar comprimido, permitindo ajustes precisos na vazão e na pressão. Elas podem ser operadas manualmente, por meio de alavancas ou botões, ou de forma automática, por meio de atuadores pneumáticos. Essas válvulas desempenham um papel importante no controle dos processos pneumáticos, garantindo a operação adequada dos equipamentos.
- **Válvulas de segurança:** As válvulas de segurança são dispositivos essenciais para garantir a segurança do sistema de ar comprimido. Elas são projetadas para aliviar a pressão excessiva que possa ocorrer no sistema, protegendo-o de danos e minimizando riscos de acidentes. Essas válvulas são ajustadas para abrir automaticamente quando a pressão atinge um limite pré-estabelecido, liberando o excesso de ar e evitando o aumento descontrolado da pressão.
- **Válvulas de retenção:** As válvulas de retenção, também conhecidas como válvulas check, são responsáveis por permitir o fluxo de ar em uma direção específica, impedindo

o retorno do ar comprimido no sentido oposto. Elas são instaladas em tubulações e sistemas pneumáticos para garantir que o ar flua apenas em uma direção desejada, evitando retrocessos que possam comprometer o funcionamento correto do sistema.

É importante destacar que existem outros tipos de válvulas utilizadas no contexto do ar comprimido, como válvulas de bloqueio, válvulas de escape rápido e válvulas de descarga. Cada uma dessas válvulas desempenha um papel específico na operação e na segurança do sistema de ar comprimido.

2.6.3 Funcionamento e características das diferentes válvulas

2.6.3.1 Válvulas de controle

Funcionamento: As válvulas de controle permitem ajustar a vazão e a pressão do ar comprimido no sistema. Elas possuem uma abertura variável que pode ser ajustada manualmente ou automaticamente para controlar o fluxo de ar (ZAPPE, 2015).

Características: Podem ser operadas manualmente por meio de alavancas ou botões, ou de forma automática por atuadores pneumáticos. Podem ter diferentes formatos, como globo, borboleta ou agulha, dependendo da aplicação específica (ZAPPE, 2015).

Figura 5 – Válvula de controle



Fonte: Soluções industriais - Produtos.

2.6.3.2 Válvulas de segurança

Funcionamento: As válvulas de segurança são projetadas para aliviar a pressão excessiva no sistema de ar comprimido. Quando a pressão atinge um limite pré-estabelecido, a válvula se abre automaticamente, permitindo a saída do ar e evitando danos ao sistema.

Características: São ajustadas para uma pressão de alívio específica e possuem uma mola de ajuste para manter a válvula fechada até que a pressão atinja o limite. Podem ter diferentes formatos, como válvulas de alívio, válvulas de escape rápido ou válvulas de segurança pilotadas.

Figura 6 – Válvula de segurança



Fonte: Ar comprimido - Válvula de segurança.

2.6.3.3 Válvulas de retenção

Funcionamento: As válvulas de retenção permitem o fluxo de ar em uma direção específica, impedindo o retorno do ar no sentido oposto. Elas possuem uma abertura unidirecional que permite a passagem do ar em uma direção e bloqueia o fluxo na direção contrária (ZAPPE, 2015).

Características: Podem ter diferentes configurações, como válvulas de retenção de portinhola, válvulas de retenção de esfera ou válvulas de retenção de pistão. São instaladas em tubulações ou sistemas pneumáticos para garantir o fluxo unidirecional do ar (ZAPPE, 2015).

É importante ressaltar que as características específicas das válvulas podem variar dependendo do fabricante e da aplicação. É recomendado consultar as especificações técnicas do fabricante para obter informações detalhadas sobre o funcionamento e as características das válvulas utilizadas no sistema de ar comprimido.

Figura 7 – Válvula de retenção



Fonte: Soluções industriais - Válvula de retenção.

2.6.3.4 *Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de válvulas*

As válvulas desempenham um papel fundamental no sistema de ar comprimido, e cada tipo de válvula apresenta vantagens e desvantagens específicas. A seguir, são destacadas as vantagens e desvantagens de cada tipo de válvula:

2.6.3.4.1. Válvulas de controle

Vantagens:

- Permitem ajustes precisos na vazão e na pressão do ar comprimido.
- Podem ser operadas manualmente ou de forma automática, oferecendo flexibilidade de controle.
- Possibilitam o controle eficiente dos processos pneumáticos.

Desvantagens:

- Podem apresentar perdas de carga e redução da eficiência energética devido à obstrução parcial do fluxo de ar.
- Podem requerer manutenção periódica para garantir o funcionamento adequado.

2.6.3.4.2. Válvulas de segurança

Vantagens:

- Protegem o sistema de ar comprimido contrapressões excessivas, prevenindo danos aos equipamentos e garantindo a segurança operacional.
- Atuam automaticamente para aliviar a pressão quando necessário.
- Contribuem para a conformidade com normas de segurança.

Desvantagens:

- Podem apresentar perdas de carga quando a válvula está aberta.
- Podem requerer ajustes e testes regulares para manter a precisão da pressão de alívio.

2.6.3.4.3. Válvulas de retenção

Vantagens:

- Permitem o fluxo unidirecional do ar comprimido, impedindo o retorno do ar no sentido oposto.
- Evitam o retrocesso do ar, garantindo o funcionamento correto do sistema.
- São de fácil instalação e manutenção.

Desvantagens:

- Podem apresentar perdas de carga quando a válvula está aberta.
- Podem gerar ruídos devido ao fechamento brusco da válvula em casos de fluxo reverso.

É importante considerar as necessidades e os requisitos específicos do sistema de ar comprimido ao selecionar o tipo de válvula mais adequada. A escolha correta levará em conta fatores como pressão de operação, vazão de ar, controle preciso, segurança e eficiência energética.

2.7 SENSORES DE MONITORAMENTO E CONTROLE

É fundamental destacar a importância do monitoramento e controle de uma rede de ar comprimido, uma vez que, após a instalação, a estrutura está sujeita a desgaste. A falta de manutenção adequada pode resultar na redução da vida útil do sistema, aumento dos custos de reparo, além de prejudicar a eficiência operacional. Para garantirmos tal controle, podemos utilizar os sensores:

Detector de vazamentos: Essa tecnologia oferece uma detecção confiável e precisa de vazamentos em fluidos. Sua capacidade de rastrear as fontes de vazamento com base nas emissões de sons de alta frequência geradas por essas falhas a torna uma escolha predominante. Na indústria, essa ferramenta é amplamente utilizada para fins de manutenção preventiva e detecção ágil de vazamentos em sistemas industriais, contribuindo significativamente para a conservação de recursos e a prevenção de perdas desnecessárias.

Manutenção preventiva: Realizar verificações regulares de componentes não apenas contribui para o aumento da vida útil da rede, mas também desempenha um papel essencial na garantia da segurança. É crucial realizar uma inspeção abrangente que englobe:

- A detecção de vazamentos em toda a rede.

- A inspeção visual de tubulações e conexões para identificar possíveis danos ou desgaste.
- O monitoramento contínuo da pressão do sistema para assegurar que esteja dentro de limites seguros.
- Testes e manutenção dos compressores e secadores de ar.
- Avaliação regular dos filtros de ar para garantir seu funcionamento eficiente.
- Verificação da qualidade do ar comprimido, especialmente em aplicações críticas.

Conformidade com as normas e regulamentos: De suma importância que o sistema esteja em conformidade com as normas de segurança e regulamentações aplicáveis.

Medição de Parâmetros: Monitoramento constante de temperatura, vazão e pressão da rede.

3 FILTROS

3.1 FUNÇÃO E IMPORTÂNCIA DOS FILTROS NO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

Os filtros têm a função de remover partículas sólidas, água, óleo e outros contaminantes presentes no ar comprimido. Eles atuam como uma barreira física, retendo essas impurezas e impedindo que elas cheguem aos equipamentos e processos que utilizam o ar comprimido. Além disso, os filtros também ajudam a proteger componentes sensíveis, como válvulas e cilindros pneumáticos, prolongando sua vida útil e reduzindo a necessidade de manutenção.

A utilização de filtros adequados e de qualidade é de extrema importância no sistema de ar comprimido, pois traz diversos benefícios, tais como:

- **Garantia da qualidade do ar comprimido:** Os filtros removem partículas sólidas, óleo, água e outros contaminantes que podem comprometer a qualidade do ar comprimido. Isso é essencial em aplicações sensíveis, como em processos de pintura, instrumentação e controle, onde a presença de contaminantes pode afetar a qualidade final do produto ou o desempenho dos equipamentos.
- **Proteção dos equipamentos:** Ao remover impurezas e contaminantes, os filtros protegem os equipamentos pneumáticos e componentes do sistema de ar comprimido contra danos e desgaste prematuro. Isso resulta em maior confiabilidade, redução de custos de manutenção e aumento da vida útil dos equipamentos.
- **Eficiência energética:** Filtros limpos e devidamente dimensionados ajudam a manter a eficiência energética do sistema de ar comprimido. A presença de impurezas e contaminantes pode causar obstrução nas tubulações, reduzir a eficiência dos equipamentos e aumentar o consumo de energia. Com filtros adequados, o sistema opera de forma mais eficiente, resultando em economia de energia e redução dos custos operacionais.

É importante ressaltar que a seleção e a manutenção adequadas dos filtros são essenciais para garantir o desempenho e a eficácia do sistema de ar comprimido. Consultar as especificações do fabricante e seguir as recomendações de instalação e substituição dos filtros é fundamental para obter os melhores resultados.

3.2 TIPOS DE FILTROS: DE PARTÍCULAS, DE ÓLEO, COALESCENTES

Existem diferentes tipos de filtros utilizados no sistema de ar comprimido, cada um projetado para remover contaminantes específicos. A seguir, são apresentados os principais tipos de filtros e suas características (ASHRAE, 2016).

3.2.1 Filtros de partículas:

Função: Os filtros de partículas são responsáveis por remover partículas sólidas, como poeira, sujeira, ferrugem e outros detritos, presentes no ar comprimido.

Características:

- Possuem elementos filtrantes com porosidades adequadas para reter as partículas indesejadas.
- Podem ser fabricados com materiais como papel, tecido ou elementos filtrantes sintéticos.
- Podem ser classificados com base na eficiência de filtração, geralmente expressa em micrômetros (por exemplo, filtros de 5 μm , 1 μm).
- Alguns filtros de partículas possuem elementos filtrantes substituíveis, enquanto outros podem ser laváveis e reutilizáveis.

Figura 8 –Filtro de partículas finas



Fonte: Parker.com

3.2.2 Filtros coalescentes:

Função: Os filtros coalescentes são projetados para remover aerossóis de óleo e água do ar comprimido, combinando a filtração de partículas com o processo de coalescência.

Características:

- Possuem elementos filtrantes que são eficientes tanto na retenção de partículas quanto na fusão das gotículas de líquido, permitindo a sua remoção efetiva.
- Podem utilizar meios filtrantes de múltiplas camadas, incluindo camadas de fibra de vidro, para aumentar a eficiência da coalescência.
- Podem ser classificados de acordo com a eficiência de remoção de óleo e água, geralmente expressa em ppm (partes por milhão) ou mg/m³.

Figura 10 – Filtro coalescentes



Fonte: Wortec - Produto - Filtro coalescente - Parker.

É importante selecionar o tipo de filtro adequado com base nas necessidades específicas do sistema de ar comprimido, considerando o nível de pureza exigido, o tipo de contaminantes presentes e as especificações dos equipamentos e processos.

3.3 EFICIÊNCIA DOS FILTROS

Os filtros utilizados no sistema de ar comprimido funcionam com base em diferentes princípios de filtração, dependendo do tipo de contaminante a ser removido. A eficiência dos filtros é medida pela capacidade de reter as partículas indesejadas e manter a qualidade do ar comprimido. (ASHRAE, 2016).

A eficiência dos filtros é determinada pela capacidade de reter as partículas e contaminantes indesejados presentes no ar comprimido. A eficiência é geralmente expressa em termos de tamanho de partícula retida ou concentração de contaminantes removidos. A classificação e os padrões de eficiência dos filtros podem variar de acordo com as normas e regulamentos específicos do setor. Ela pode ser influenciada por diversos fatores, como o design do filtro, o meio filtrante utilizado, a área de superfície do filtro e a taxa de fluxo de ar. É importante considerar esses fatores ao selecionar os filtros adequados para atender aos requisitos de qualidade do ar comprimido de uma determinada aplicação.

3.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS DIFERENTES TIPOS DE FILTROS

Existem diferentes tipos de filtros utilizados no sistema de ar comprimido, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens.

3.4.1 Filtros de partículas:

Vantagens:

- Eficientes na remoção de partículas sólidas presentes no ar comprimido.
- Disponíveis em uma ampla faixa de eficiência de filtração.
- Podem ser facilmente substituídos ou limpos, dependendo do tipo de filtro.

Desvantagens:

- Não são eficazes na remoção de aerossóis de óleo ou água.
- Podem apresentar uma perda de carga maior à medida que o filtro se torna obstruído com as partículas retidas.

3.4.1 Filtros coalescentes:

Vantagens:

- Eficientes na remoção de aerossóis de óleo e água, além de partículas sólidas.
- Podem fornecer ar comprimido de alta pureza, adequado para aplicações sensíveis.
- Alguns filtros coalescentes possuem drenos automáticos para remover o líquido condensado.

Desvantagens:

- Requerem manutenção regular para substituição do meio filtrante e drenagem adequada.
- Podem apresentar uma perda de carga moderada à medida que o filtro se obstrui com as impurezas retidas.

É importante considerar as necessidades específicas da aplicação, o nível de pureza exigido e as condições operacionais ao escolher o tipo de filtro mais adequado para o sistema de ar comprimido.

4 SECADOR

É imprescindível manter um cuidadoso controle sobre a presença de água nos sistemas de ar comprimido, considerando que o ar aspirado pelo compressor, originário do ambiente, carrega consigo umidade na forma de vapor. Durante a fase de compressão, o ar sofre uma redução de volume e um aumento de temperatura, preservando sua umidade na forma de vapor. Posteriormente, no momento da descarga do compressor, ocorre o resfriamento do ar e a condensação do vapor, resultando na presença de água no ar comprimido, conforme explicado pelo especialista em engenharia da HBR Ar Comprimido, Leandro Di Petta.

A presença de água no ar comprimido pode ocasionar uma variedade de problemas, desde a aceleração da corrosão nos sistemas de tubulação e instrumentos até danos aos equipamentos e produtos. Além disso, a água pode prejudicar a eficiência do sistema, comprometendo a qualidade do ar comprimido produzido.

Para evitar esses contratemplos, uma solução eficaz é a utilização de secadores de ar comprimido, disponíveis em dois formatos principais: refrigeração e adsorção. A principal diferença entre eles está na temperatura empregada para o resfriamento do ar. O secador de refrigeração opera a uma temperatura de 3°C, enquanto o secador de adsorção funciona a uma temperatura mais baixa, em torno de -40°C.

É crucial destacar que o secador de adsorção encontra aplicação em setores mais sensíveis, como indústrias alimentícias e farmacêuticas, devido à baixa tolerância à presença de umidade no sistema, o que poderia comprometer a integridade dos produtos. Por outro lado, em aplicações onde a secura do ar é o requisito primordial, o secador por refrigeração pode ser empregado sem problemas, proporcionando uma solução eficiente e econômica. Essa abordagem proativa na gestão da umidade no ar comprimido não apenas contribui para a preservação dos equipamentos, mas também assegura a qualidade dos processos industriais.

Figura 11 – Secador



Fonte: Ar comprimido - Secador de ar comprimido afinal para que serve.

5 RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO

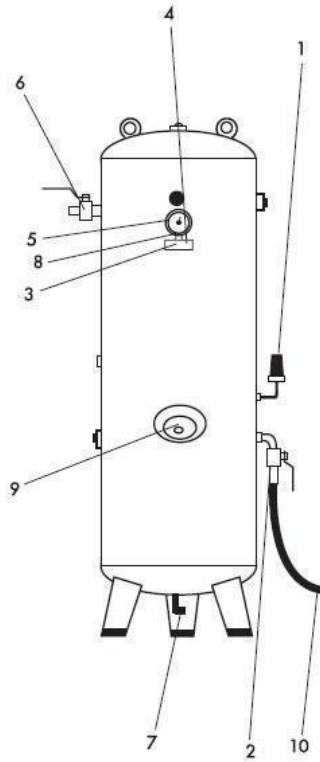
Reservatório ou cilindro de ar comprimido são fabricados conforme a norma americana ASME e com documentação da NR-13, podendo ser feito de aço carbono, aço inox ou outras ligas especiais.

Os reservatórios têm como finalidade estabilizar a distribuição de ar comprimido promovendo o equilíbrio e o armazenamento de pressão entre compressores e sistemas de consumo, ele também tem a função de remover impurezas do ar como água, poeira, óleo e outros mantendo assim uma maior qualidade do ar transportado para os equipamentos. Isso acontece porque devido à grande superfície do reservatório que funciona como um refrigerador do ar, dividindo no reservatório, uma parcela da umidade que foi transformada em líquido e que é removida através de um dreno manual, eletrônico ou magnético.

5.1 PRINCIPAIS ACESSÓRIOS DO RESERVATÓRIO

1. Pressostato: controla o funcionamento do compressor;
2. Válvula de retenção: é instalada na linha de alimentação que liga o compressor ao reservatório.
3. Válvula de segurança: sua instalação é obrigatória.
4. Flange de controle: usada como orifício para a instalação de um manômetro calibrado que se faz a inspeção no reservatório de testes de pressão;
5. Manômetro: mostra a pressão interna no reservatório;
6. Válvula de bloqueio de esfera: usada para isolar o sistema de tubulações do reservatório;
7. Dreno de condensado: é para drenar o condensado precipitado no reservatório;
8. Base para conexões: onde se instala de outros acessórios e ou válvulas necessárias;
9. Abertura de inspeção: serve para verificar se o interior do reservatório está limpo;
10. Mangueira flexível de alta pressão: elimina qualquer vibração do compressor.

Figura 12 – Acessórios do reservatório de ar comprimido



Fonte: Ar comprimido - Funções, vantagens, instalação, reservatório ar comprimido.

6 CONDENSADOR

O condensador é responsável pela troca térmica através de uma chapa metálica que ocorre a condensação do vapor com a água refrigerada. O gás condensado percorre uma tubulação que trabalha com troca de calor. Na parte de fora dos tubos, é feita uma lavagem com líquido resfriado que está em temperatura ambiente. O calor do processo de condensação vai para a lavagem e é eliminado pelo vapor desta água.

Os condensadores podem ser compactados como uma torre de refrigeração reduzida, e no seu interior inserido um feixe tubular o qual condensa o vapor no interior do processo, esses podem ser produzidos em aço carbono ou aço inox devido a resistência à corrosão.

No caso de a tubulação ser aletada, ela oferece uma troca de temperatura mais efetiva. Essas aletas são montadas a fim de proporcionar a fácil retirada do material do interior do tubo e a saída dos gases que não condensam.

Figura 13 – Componentes da linha de ar comprimido



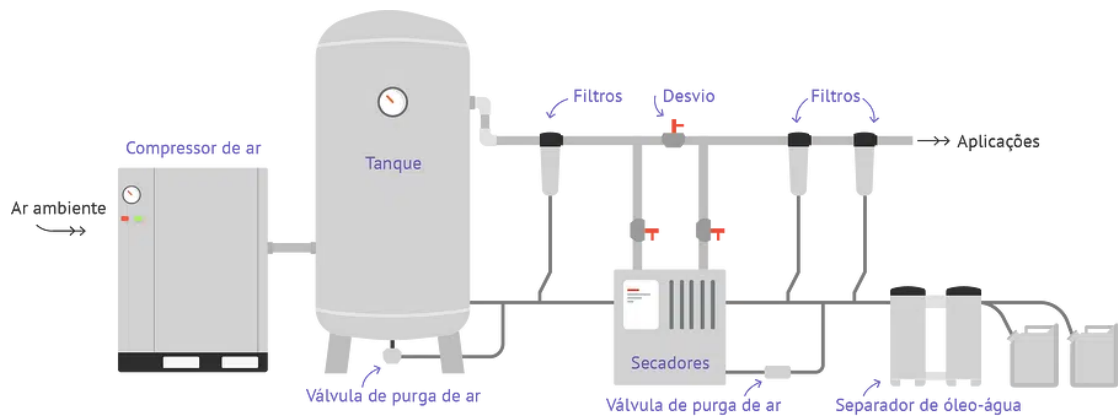
Fonte: Ar comprimido.com - Separador de condensado em aço carbono.

7 LINHA DE AR COMPRIMIDO

Uma linha de ar comprimido é responsável por canalizar todo o ar produzido pelo compressor para as ferramentas que serão usadas, ela possui 3 principais componentes: compressor, que gera o ar com as condições de vazão e pressão que o impostas pelo processo; rede principal, que são as tubulações e acessórios para a distribuição do ar, com o mínimo possível de perda de carga e para manter uma boa qualidade; os pontos de consumo, ferramentas pneumáticas, bombas, máquinas injetoras entre outros.

A definição do layout de uma linha de ar comprimido visa a melhor forma de distribuir o ar, com uma instalação sem perdas de carga, queda de pressão entre o compressor e as ferramentas para ser mais econômica possível. Ela possui os seguintes componentes:

Figura 14 – Componentes da linha de ar comprimido



Fonte: Metron.energy – ar comprimido: produção e aplicação.

8 MATERIAIS DE TUBULAÇÃO DE AR COMPRIMIDO

A adequada seleção do material para a tubulação em uma rede de ar comprimido desempenha um papel crucial na eficiência e durabilidade do sistema. Vários fatores devem ser ponderados ao escolher o material apropriado, incluindo resistência à corrosão, custo, durabilidade, facilidade de instalação e manutenção.

O aço inoxidável, destacando-se por sua notável resistência à corrosão, é frequentemente preferido, tornando-se uma escolha ideal para ambientes adversos. Sua durabilidade em condições agressivas contribui significativamente para uma vida útil prolongada da tubulação, e sua resistência a altas temperaturas oferece estabilidade térmica ao sistema.

O alumínio, conhecido por sua leveza, é outra opção popular, facilitando a instalação e o manuseio. Sua resistência à corrosão é vantajosa, embora seja mais suscetível do que o aço inoxidável em ambientes agressivos. O baixo peso também pode resultar em economia de custos no suporte da tubulação.

O polietileno de alta densidade (PEAD), escolhido por sua resistência química e durabilidade, é leve e flexível, facilitando a instalação. Sua resistência à corrosão o torna adequado para diversas aplicações, embora a exposição prolongada a raios UV possa afetar sua integridade estrutural.

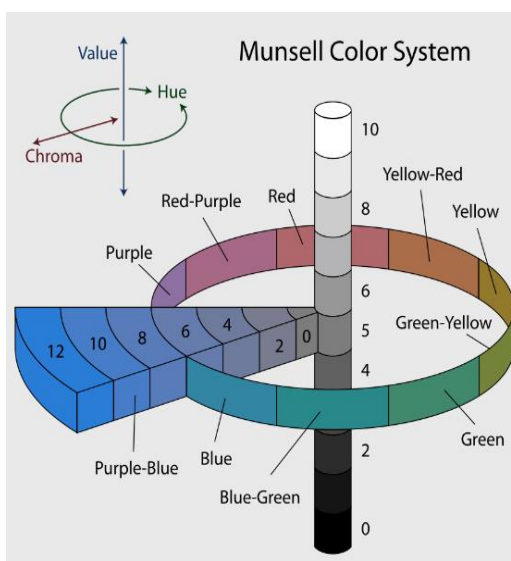
Contudo, destaca-se o aço carbono galvanizado, reconhecido por sua resistência mecânica e durabilidade. A galvanização confere resistência adicional à corrosão, tornando-o especialmente indicado para ambientes com alta umidade. Apesar disso, é importante notar que a galvanização pode se deteriorar ao longo do tempo, especialmente em condições extremas, exigindo manutenção regular. Em resumo, a escolha do material da tubulação em uma rede de ar comprimido é crucial e depende das características específicas do ambiente e dos requisitos do sistema. O aço inoxidável destaca-se por sua resistência à corrosão, o alumínio pela leveza, o PEAD pela resistência química, e o aço carbono galvanizado pela durabilidade, cada um oferecendo vantagens distintas com base nas necessidades do projeto e nas condições ambientais. No entanto, o aço carbono galvanizado destaca-se como uma opção robusta e versátil, especialmente em ambientes desafiadores.

9 ESPECIFICAÇÃO DE CORES EM TUBOS E TUBULAÇÕES DE UMA REDE DE AR COMPRIMIDO

Na primeira década do século XX foi criado pelo professor de artes Albert H. Munsell um sistema de cores denominado de Sistema de Cores de Munsell, de forma que possibilita ter uma relação tridimensional de uma cor em um espaço cilíndrico de 3 eixos.

- Matiz: Representação de uma cor e suas variações. São as cores que pertencem à mesma família. Exemplo: Verde escuro, verde folha, verde claro etc.
- Valor: Representação da variação da luminosidade da cor ou leveza.
- Cromo: Representação de pureza da cor. Cores menos puras são as cores pastéis e mais puras são as cores vivas.

Figura 15 – Sistema de cores de Munsell



Fonte: Maso - Sistema de cores Munsell, entenda o que é e como usar.

A padronização das cores em tubulações é amplamente adotada em vários setores, como indústria e construção, com o propósito de assegurar a segurança, facilitar a identificação e promover a eficiência no manuseio de líquidos, gases e substâncias químicas. No entanto, não há uma norma universal, mas no Brasil seguimos a norma ABNT NBR 6493 – Normas para cores de tubulações industriais.

Para a identificação de tubos de ar comprimido a cor padrão é azul real, a identificação deve conter pelo menos 40cm com indicação da orientação de fluxo do fluido.

Relação de cores abaixo:

- Alaranjado segurança: Produtos químicos não gasosos;
- Amarelo ouro: Gases não liquefeitos;
- Azul real: Tubulação é pressurizada por ar comprimido.
- Branco: Vapor.
- Cinza claro: Vácuo
- Cinza escuro: Tubulações de eletrodutos;
- Cor de alumínio: Gases liquefeitos, inflamáveis e combustíveis de baixa viscosidade;
- Marrom canalização: Materiais fragmentados (minérios) e petróleo bruto;
- Preto: Indicado para produtos inflamáveis e combustíveis que tenham alta viscosidade;
- Verde emblema: Tubulações que utilizam água de uso industrial, excetuando a água destinada ao combate de incêndios;
- Vermelho segurança: Tubulações e demais equipamentos de combate a incêndio.
- Lilás: Indica tubulações utilizadas para Lixívia, Álcalis e Soda Cáustica.

Figura 16 – Cores das tubulações



Fonte: Engeteles - Cores das tubulações industriais.

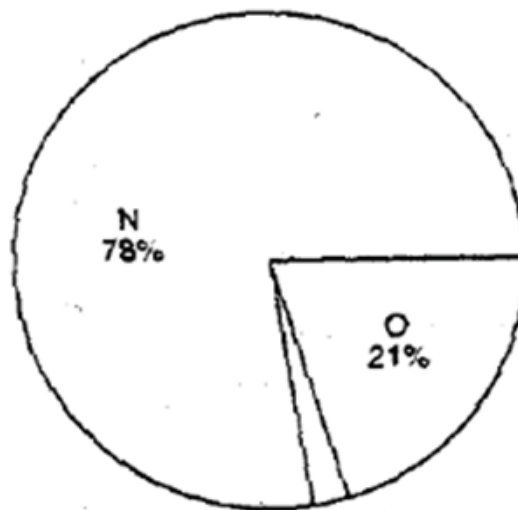
10 PROPRIEDADES DO AR

Apesar de não conseguirmos ver, é possível perceber o ar através dos ventos, pássaros e aviões que nele flutuam, além do impacto sobre o nosso corpo. Com isso, podemos concluir que o ar existe e ocupa lugar no espaço.

10.1 AR ATMOSFÉRICO E AR COMPRIMIDO

O Ar comprimido é o ar atmosférico condensado que armazena energia de pressão, através de um compressor que absorve energia mecânica para funcionamento. No processo de compressão, é produzido calor, já no processo de expansão, o ar perde calor. Esta energia é empregada, por exemplo, nos processos de fabricação industrial, na propulsão de equipamentos pneumáticos, exercendo funções de acionamento mecânico e transporte de materiais (KARMOUCHE, 2009). O ar é insípido, incolor e inodoro, e sua composição é uma mistura de gases (Figura 17) Oxigênio (21%), Nitrogênio (78%) e alguns gases raros (1%) (METALPLAN, 2010).

Figura 17 – Composição do ar



Fonte: Composição do ar atmosférico (SILVA, 2002)

Há também nessa composição a presença de água no estado de vapor, e a absorção do vapor d'água no ar depende da temperatura ambiente. O excesso de vapor d'água se condensa e se precipita, percebemos através da neblina e pingos, por exemplo. A umidade máxima do ar dá-se pela máxima massa de vapor d'água contida em um volume de ar em uma determinada temperatura. A umidade absoluta, é a quantidade real de vapor d'água presente em um determinado volume.

$$\varphi = \frac{f}{f_{máx}} 100\%$$

A Tabela 2 mostra a umidade máxima (f) absorvida pelo ar em função da temperatura:

Tabela 2 – Umidade absorvida pelo ar (ROLLINS, 2004).

T (°C)	f (g/cm ³)
-20	0,9
-10	2,1
0	4,9
10	9,4
20	17,2
30	30
40	51
50	83
60	130
80	292
100	800

Fonte: Umidade absorvida pelo ar (ROLLINS, 2004).

A umidade varia de acordo com a temperatura, sendo possível demonstrar a umidade máxima pela própria temperatura, intitulado temperatura de orvalho. A temperatura que um gás deve ser resfriado para que seja possível obter o vapor d'água condensado é chamado de ponto de orvalho.

10.2 UMIDADE

A presença de umidade pode causar diversos problemas em processos que utilizam o ar comprimido, alguns deles, a oxidação e o desgaste de peças. Em controles pneumáticos podem levar a defeitos na operação, danificando produtos e até mesmo paralisando a produção. A umidade sempre estará presente no processo para obtenção de ar comprimido, e a solução para tal é a determinação adequada do processo de secagem para suas finalidades.

10.3 COMPORTAMENTO DO AR COMPRIMIDO

Para melhor compreensão do comportamento do ar comprimido, é de suma importância entender o conceito de gás ideal.

10.4 GÁS IDEAL

Um gás ideal possui um número grande de moléculas (esferas rígidas) que apresentam movimento, aleatório ou desordenado, regido pelas Leis de Newton. Para Van Wylen (2009), com relação às propriedades gerais dos gases, entende-se que eles ocupam a totalidade de um volume disponível, produzindo forças devido à pressão exercida pelas moléculas em constante movimento. Em uma mistura de gases, cada um deles se comporta como se o outro não existisse, com isso, a pressão total pode ser entendida como a soma de todas as pressões.

Uma vez que o vapor é produzido pela evaporação de líquidos, conforme a sua temperatura, está sujeito à evaporação até a pressão máxima de vapor, podendo ser considerado vapor saturado. Haja vista as leis físicas dos gases, os gases estudados podem ser compreendidos como vapores superaquecidos, não se aplicando ao vapor saturado.

Os termos gases reais e ideais são incessantemente utilizados na pneumática, sendo gás real o vapor superaquecido que evapora atingindo determinada temperatura, e o gás ideal não condensa no resfriamento até o zero absoluto. Mas, em consequência de o ponto de condensação

para os gases reais ser dado em temperaturas baixas e pressões altas, é possível denominar os gases reais como sendo ideais. Portanto, o estado de um gás é obtido através de dados de pressão (P), temperatura (T) em Kelvin, e volume (V), por meio da equação: $\frac{PV}{T} = cte$

Inserindo a massa na equação: $PV = mRT$

Onde, $R = 287 \text{ J/kg.K}$ (constante do gás para o ar).

Então, obtém-se a densidade: $\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT}$

10.5 PRESSÃO

Os gases são constituídos por moléculas em constante movimento, que exercem energia de pressão no ambiente em que está abrangido. Existem dois pontos de referência para as medidas de pressão, o zero absoluto (vácuo), e a pressão atmosférica. Os valores de pressão são determinados em relação ao nível de referência. Portanto, se o nível for zero absoluto, a pressão é absoluta, como na Figura 18.

Geralmente os medidores de pressão indicam uma diferença de pressão, entre a pressão medida e a pressão atmosférica local (pressão ambiente). Esses níveis de pressão que são medidos relativamente à pressão atmosférica, podem ser designados como pressões manométricas.

Com isso, $P_{abs} = P_{atm} + |P_{man}|$

Figura 18 - Pressões absoluta e manométrica, de acordo com os níveis de referência



Fonte: (FOX et al., 2006).

A pressão atmosférica ou barométrica se caracteriza pela presença de ar na camada gasosa que envolve a terra, variando conforme a densidade e altitude, e seu valor não é constante, podendo ser medida por meio de um equipamento conhecido como barômetro.

Na Tabela 3 é possível identificar as condições padrão da atmosfera nos EUA ao nível do mar, os valores são utilizados como base para a atmosfera-padrão.

Tabela 3 – Padrão da atmosfera nos EUA ao nível do mar

Propriedade	Símbolo	SI	Inglês
Temperatura	T		59°F
Pressão	p	101,3 kPa (abs)	14,696 psia
Massa específica	ρ		0,002377 slug/pé ³
Peso específico	γ	-	0,07651 lbf/pé
Viscosidade	μ	$1,789 \times 10^{-5}$ kg/(m.s)(Pa.s)	$3,737 \times 10^{-7}$ lbf.s/pé ²

Fonte: (FOX et al., 2006).

10.6 PREPARAÇÃO DO AR

Para que o funcionamento de equipamentos pneumáticos ocorra de forma correta, e para que ocorra o aumento da vida útil de seus componentes, é necessário o tratamento do ar até que

ele seja distribuído entre as máquinas. De acordo com Jesus (2012), o ar comprimido passa por diversas etapas indispensáveis antes de ser utilizado. Na Figura 19 é possível verificar um sistema típico de ar comprimido, que engloba os equipamentos necessários para uma distribuição de um ar comprimido de qualidade. A produção do ar comprimido ocorre na unidade de geração e após isso ele é distribuído pela fábrica. O ar passa por um tratamento de remoção de impurezas (filtro) e umidade após a compressão, para atender aos requisitos de qualidade da rede que se destina (SILVA,2002).

Figura 19 - Produção, distribuição e tratamento do ar comprimido



Fonte: (SILVA, 2002, p. 25)

10.7 QUALIDADE DO AR

Existem diferentes tipos de filtro, devido aos diferentes tipos de secadores. O ar comprimido resultante mesmo passando pelo processo de filtragem, ainda assim conterà pequenas concentrações de partículas sólidas, água e óleo. A norma internacional ISO-8573-1, segundo Metalplan (2006), é a referência para uso geral de ar comprimido. A Tabela 4 expressa as classificações do ar comprimido em relação às concentrações de partículas contaminantes.

Tabela 4 – Classes de qualidade pela norma ISO-8573-1

Classe de qualidade	Sólidos (μm)	Água ($^{\circ}\text{C}$)	Óleo (mg/m^3)
1	0,1	-70	0,01
2	1	-40	0,1
3	5	-20	1
4	15	3	5
5	40	7	25
6	x	10	x
7	x	Não especificado	x

Fonte: (METALPLAN, 2006).

11 NORMAS REGULAMENTADORAS

O projeto de dimensionamento de uma rede de ar comprimido é uma tarefa complexa e essencial que requer conformidade rigorosa com normas específicas para garantir a eficiência, segurança e durabilidade do sistema. Diversas normativas são aplicadas a fim de assegurar que a concepção e implementação da rede atendam aos mais elevados padrões de qualidade.

A norma ISO 8573, por exemplo, estabelece diretrizes para a qualidade do ar comprimido em termos de pureza, umidade e partículas. Ela define classes para a qualidade do ar, o que é crucial para garantir que o ar comprimido atenda aos requisitos específicos da aplicação final. Assegurar a conformidade com essas normas é vital para evitar problemas operacionais, prevenindo a contaminação de processos e danos a equipamentos.

Outra norma essencial é a ISO 11011, que trata da medição do desempenho dos sistemas de ar comprimido. Ela fornece diretrizes para a avaliação do consumo de energia, eficiência e desempenho global do sistema. Ao seguir essas orientações, os projetistas podem otimizar o projeto para alcançar eficiência energética máxima, resultando em benefícios tanto ambientais quanto econômicos.

No âmbito de materiais e construção, as normas ASME B31.1 e B31.9 especificam requisitos para o projeto, construção e inspeção de tubulações para transporte de fluidos, incluindo ar comprimido. Elas estabelecem padrões para garantir a integridade estrutural, segurança e eficiência do sistema, contribuindo para a prevenção de falhas e acidentes.

Além disso, normas de segurança ocupacional, como a NR-13, são fundamentais para orientar o dimensionamento de sistemas de ar comprimido, especialmente no que diz respeito à inspeção e manutenção de equipamentos. Garantir a conformidade com essas normativas é essencial para a segurança dos trabalhadores e a integridade do sistema como um todo.

Em síntese, a observância rigorosa das normas técnicas, ambientais e de segurança é um imperativo durante o projeto de dimensionamento de uma rede de ar comprimido. Essas normas não apenas estabelecem padrões para a qualidade do ar e eficiência energética, mas também promovem a segurança dos trabalhadores e a durabilidade do sistema, assegurando que o projeto atenda aos mais altos padrões de excelência e conformidade regulatória.

12 PROJETO DE DIMENSIONAMENTO DE UMA REDE DE AR COMPRIMIDO

O dimensionamento correto de uma rede de ar comprimido é de extrema importância para que não tenha interferência no processo de produção, para isso é necessário ter conhecimento da demanda de ar comprimido e pressão, além disso, é essencial que seja feita uma boa escolha de compressor, tubulação e acessórios, assim como fazer a previsão de crescimento da rede de ar comprimido e usar um fator de segurança.

12.1 ESTUDO DE CASO - INSPEÇÃO DAS LINHAS DE AR COMPRIMIDO DE UMA FÁBRICA DE FERTILIZANTES.

Efetuamos uma visita à instalação de uma fábrica de fertilizantes, onde tivemos a oportunidade de familiarizar-nos com o processo produtivo e examinar a atual rede de ar comprimido. Durante a visita, foram abordados os desafios existentes na operação. Identificamos a presença de água na linha e, ao conduzir uma inspeção visual, constatamos vários pontos de corrosão nas tubulações. Além disso, observamos que alguns trechos não estão devidamente pintados de acordo com as normas vigentes, evidenciando falhas no cumprimento dos padrões de manutenção. Pontos de vazamento também foram identificados, contribuindo para a perda de eficiência do sistema. Adicionalmente, constatamos que a falta de manutenção adequada compromete o funcionamento correto dos acessórios, como filtros e secadores. Esses elementos essenciais para a qualidade do ar comprimido não estão operando em sua capacidade máxima devido à negligência na manutenção, o que pode impactar negativamente na produtividade e na eficiência operacional da fábrica.

12.2 EVIDÊNCIAS

Consumo dos equipamentos da fábrica: 31,0m³/min

Compressores: são 3 unidades, sendo 1 compressor DSD 200 – KAESER – 200 CV – 24,48 m³/min. – 8,5 bar; e 2 compressores E 75 – 10,5 – ELGI – 100 CV – 12,5 m³/min. – 9,7 bar.

Figura 20 – Compressor ELGI (2 unidades)



Fonte: Aatoria.

Figura 21 – Compressor KAESER.



Fonte: Aatoria.

Figura 22 – Tubulação com pontos de corrosão



Fonte: Aatoria.

Figura 23 – Tubulação com pintura não conforme



Fonte: Aatoria.

Figura 24 – Acessórios da linha necessitando de manutenção



Fonte: Aatoria.

Figura 25 – Ponto de vazamento de ar



Fonte: Aatoria.

12.3 ESCOPO

Após a visita na fábrica para identificar os problemas e feito a discussão com o grupo, levantamos oportunidades de melhorias do sistema de ar comprimido.

Propomos realizar um dimensionamento da tubulação afim de verificar se está adequada, visando otimizar o fluxo de ar comprimido e garantir uma distribuição eficiente pelos diferentes setores da instalação. Esse processo contribuirá para a maximização da eficiência operacional, minimizando perdas e melhorando a performance global do sistema. Outra medida crucial é a substituição das linhas que apresentam sinais de corrosão. Esta ação não apenas visa evitar possíveis falhas estruturais, mas também assegura a integridade dos componentes, prolongando a vida útil do sistema e reduzindo custos com manutenção a longo prazo.

No que diz respeito à preservação e conformidade com padrões da NBR 6493, deverá ser feito a pintura da tubulação. Isso não só proporcionará uma camada protetora eficaz contra corrosão, mas também garantirá a conformidade com normas técnicas, contribuindo para a segurança e a durabilidade do sistema. Além disso, recomendamos a instalação de filtros e separadores de água e óleo. Esses dispositivos desempenham um papel fundamental na qualidade do ar comprimido, removendo impurezas que podem comprometer o desempenho dos equipamentos e prolongando a vida útil dos componentes, além de garantir um ambiente de trabalho mais seguro.

Em resumo, as ações propostas visam não apenas corrigir questões identificadas durante a inspeção, mas também estabelecer medidas preventivas para garantir a eficiência, segurança e durabilidade do sistema de ar comprimido na fábrica.

13 RESULTADOS

13.1 MATERIAL DA TUBULAÇÃO

Ao analisar as condições ambientais da instalação da tubulação em um contexto fabril suscetível à exposição a agentes químicos corrosivos, foram considerados critérios cruciais, tais como resistência mecânica e custo-benefício. Foi realizada uma comparação entre as propriedades técnicas e os custos associados aos materiais disponíveis: aço inoxidável, alumínio, PEAD e aço carbono.

Diante dessas avaliações, o material escolhido para atender às exigências específicas do projeto é o aço carbono galvanizado. Esta decisão fundamenta-se em suas características de resistência mecânica, custo-benefício favorável, baixa necessidade de manutenção e eficaz proteção contra corrosão.

13.2 PINTURA DA TUBULAÇÃO

Em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela NBR 6493, a tubulação do projeto de ar comprimido será implementada na tonalidade azul. Essa escolha não apenas atende aos requisitos normativos, mas também se alinha à prática reconhecida internacionalmente de padronizar cores para identificação visual em instalações industriais.

A coloração azul foi selecionada não apenas por sua aderência às normas, mas também por sua capacidade comprovada de facilitar a rápida identificação do sistema. Essa padronização visual contribui para minimizar riscos durante operações, manutenções e inspeções, promovendo, assim, um ambiente de trabalho mais seguro e eficiente.

13.3 CONSUMO DE AR

No desenvolvimento do projeto em questão, é fundamental esclarecer que as informações relativas ao consumo de ar de cada equipamento foram obtidas por meio de um estudo realizado por uma empresa terceirizada especializada nesse tipo de análise. Vale

ressaltar que a empresa responsável pela condução desse estudo foi contratada especificamente para fornecer dados precisos e abrangentes sobre o consumo de ar dos equipamentos em questão. Contudo, é importante destacar que, embora tenhamos recebido os resultados detalhados desse estudo por parte da empresa contratada, não tivemos acesso direto aos documentos ou processos internos que compõem a metodologia empregada para a obtenção desses dados. A transparência nesse processo é crucial para assegurar a integridade das informações utilizadas no desenvolvimento do projeto, garantindo assim uma base sólida e confiável para as futuras etapas.

O consumo total (Q_t) pelos equipamentos da fábrica é de 31,0 m³/hora, conforme a tabela a seguir, com os valores de consumo por cada máquina:

Tabela 5 - Consumo de ar por equipamento.

Equipamentos	Quantidade	Vazão em m³
G2	1	8 m ³ /h
G3	1	9 m ³ /h
Máq. 11	1	3 m ³ /h
Máq. 12	1	3 m ³ /h
Máq. 14	1	4 m ³ /h
Máq. 16	1	4 m ³ /h
	Consumo Total	31,0 m³/h

Fonte: Aatoria

Para o cálculo da vazão total de ar, será considerado um percentual de 20% de previsão de crescimento e um fator de segurança de 20%. Dados os valores, a vazão de ar com os critérios aplicados (Q_a) é a seguinte:

$$Q_a = Q_t \times 1,2 \times 1,2$$

$$Q_a = 31,0 \times 1,2 \times 1,2$$

$$Q_a = 44,64 \text{ m}^3/\text{hora}$$

13.4 DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO

13.4.1 Dimensionamento da linha principal de ar comprimido

Para o cálculo do dimensionamento da linha principal, a partir do layout temos que o comprimento total (L_1) é igual a 71,82 metros e adotaremos a pressão de 8kgf/cm² devido a necessidade dos equipamentos.

A escolha da fórmula para o dimensionamento do diâmetro interno em sistemas pneumáticos é essencial para garantir a eficiência e o desempenho adequado dos componentes envolvidos. O livro "Automação Pneumática", de Arivelto Bustamante Fialho, é uma fonte valiosa que fundamenta a seleção dessas fórmulas, oferecendo uma abordagem prática e teórica sobre o projeto de sistemas pneumáticos. Fialho destaca a importância de considerar fatores como vazão, pressão e comprimento da tubulação ao determinar o diâmetro interno adequado. A escolha criteriosa desses parâmetros impacta diretamente na eficiência energética, na resposta dinâmica do sistema e na minimização de perdas por atrito. Assim, a utilização da fórmula recomendada no livro proporciona uma base sólida para o dimensionamento, contribuindo para a otimização do consumo de ar, a prevenção de falhas e a maximização da vida útil dos componentes pneumáticos, aspectos cruciais na concepção e implementação de sistemas pneumáticos industriais.

O diâmetro interno mínimo da tubulação será obtido através da seguinte equação:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q_a^{1,85} \times L_1}{P \times \Delta P}}$$

Onde:

P – Pressão de trabalho = 8kgf/cm²

ΔP – Variação de Pressão Admissível = 0,3 kgf/cm² (valor considerado para até 500m)

L_1 – Comprimento total = 71,82 metros

Qa – Vazão total = 44,64 m³/hora

Substituindo os valores temos:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 44,64^{1,85} \times 71,82}{8 \times 0,3}} = 22,36 \text{ mm}$$

O diâmetro interno mínimo calculado é igual a 22,36 mm, consultando a tabela 6 de tubos de aço carbono galvanizado DIN2440, o diâmetro interno igual ou imediatamente superior encontrado é de 1" onde possui 27,2mm.

Com o diâmetro nominal da tubulação definido, podemos calcular o comprimento equivalente para as válvulas e conexões, conforme layout. Na tabela 6 a seguir, temos os comprimentos equivalentes das válvulas e conexões da rede principal:

Tabela 6 – Diâmetros de tubos de aço carbono DIN 2440

Tubo DIN 2440			
Nominal	Externo	Interno	Parede
1/4"	13,5mm	8,8mm	2,35mm
3/8"	17,2mm	12,5mm	2,35mm
1/2"	21,3mm	16mm	2,65mm
3/4"	26,9mm	21,9mm	2,65mm
1"	33,7mm	27,2mm	3,25mm
1 1/4"	42,4mm	35,9mm	3,25mm
1 1/2"	48,3mm	41,8mm	3,25mm
2"	60,3mm	53,9mm	3,65mm

Notas: Tubo de aço carbono com costura DIN 2440 / NBR 5580 – Preto ou galvanizado.

Fonte: Autorialia

Para calcular o comprimento total geral (Lt), devemos somar o comprimento total (L1) com o comprimento equivalente (L2) que está na tabela 7.

$$L_t = L_1 + L_2$$

$$L_t = 71,82 + 13,04 = 84,86 \text{ metros}$$

Tabela 7 – Comprimento equivalente das conexões da rede principal

Tipo de conexão	Quantidade	Comprimento equivalente unitário	Comprimento equivalente total
Válvula esfera 1"	18	0,33m	5,94 m
Curva 90° de 1"	3	0,5 m	2 m
Tê bilateral de 1"	4	1,7 m	5,1 m
Comprimento total equivalente (L2) =			13,04 m

Fonte: Aatoria

Verificando o diâmetro interno:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q_a^{1,85} \times L_t}{P \times \Delta P}}$$

Onde:

P – Pressão de trabalho = 8kgf/cm²

ΔP – Variação de Pressão Admissível = 0,3 kgf/cm² (valor considerado para até 500m)

Lt – Comprimento total geral = 84,86 metros

Qa – Vazão total = 44,64 m³/hora

Substituindo os valores temos:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 44,64^{1,85} \times 84,86}{8 \times 0,3}} = 23,12 \text{ mm}$$

Sendo assim, o diâmetro nominal de 1" atende aos requisitos para a linha principal.

13.5 DIMENSIONAMENTO DA LINHA SECUNDÁRIA - ABASTECIMENTO DO GALPÃO DA FÁBRICA

Para o cálculo do dimensionamento da linha secundária que faz o abastecimento do galpão da fábrica, a partir do layout temos que o comprimento total (L1) é igual a 280,0 metros e adotaremos a pressão de 8kgf/cm² devido a necessidade dos equipamentos.

O diâmetro interno mínimo da tubulação será obtido através da seguinte equação:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q_a^{1,85} \times L_1}{P \times \Delta P}}$$

Onde:

P – Pressão de trabalho = 8kgf/cm²

ΔP – Variação de Pressão Admissível = 0,3 kgf/cm² (valor considerado para até 500m)

L1 – Comprimento total = 280,0 metros

Qa – Vazão total = 44,64 m³/hora

Substituindo os valores temos:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 44,64^{1,85} \times 280,0}{8 \times 0,3}} = 29,36 \text{ mm}$$

O diâmetro interno mínimo calculado é igual a 29,36 mm, consultando a tabela 6 de tubos de aço carbono galvanizado DIN2440, o diâmetro interno igual ou imediatamente superior encontrado é de 1. 1/4" onde possui 35,9mm.

Com o diâmetro nominal da tubulação definido, podemos calcular o comprimento equivalente para as conexões, conforme layout anexo. Na tabela 8 a seguir, temos os comprimentos equivalentes das conexões da linha secundária:

Tabela 8 – Comprimento equivalente das conexões da linha secundária de abastecimento do galpão.

Tipo de conexão	Quantidade	Comprimento equivalente unitário	Comprimento equivalente total
Tê bilateral de 1.1/4"	8	2,3 m	18,4 m
Comprimento total equivalente (L2) =			18,4 m

Fonte: Aatoria

Verificando o diâmetro interno:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q_a^{1,85} \times L_t}{P \times \Delta P}}$$

Onde:

P – Pressão de trabalho = 8kgf/cm²

ΔP – Variação de Pressão Admissível = 0,3 kgf/cm² (valor considerado para até 500m)

L_t – Comprimento total geral = 298,4 metros

Q_a – Vazão total = 44,64 m³/hora

Substituindo os valores temos:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 44,64^{1,85} \times 298,4}{8 \times 0,3}} = 29,74 \text{ mm}$$

Sendo assim, o diâmetro nominal de 1.1/4" atende aos requisitos para a linha secundária.

13.6 DIMENSIONAMENTO DA LINHA DE ENTRADA NO TANQUE PULMÃO

Para o cálculo do dimensionamento da linha de entrada no tanque pulmão, a partir do layout temos que o comprimento total (L_1) é igual a 287,33 metros e adotaremos a pressão de 8kgf/cm² devido a necessidade dos equipamentos.

O diâmetro interno mínimo da tubulação será obtido através da seguinte equação:

$$\phi_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q_a^{1,85} \times L_1}{P \times \Delta P}}$$

Onde:

P – Pressão de trabalho = 8kgf/cm²

ΔP – Variação de Pressão Admissível = 0,3 kgf/cm² (valor considerado para até 500m)

L_1 – Comprimento total = 287,33 metros

Q_a – Vazão total = 44,64 m³/hora

Substituindo os valores temos:

$$\phi_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 44,64^{1,85} \times 287,33}{8 \times 0,3}} = 29,51 \text{ mm}$$

O diâmetro interno mínimo calculado é igual a 29,51 mm, consultando a tabela 6 de tubos de aço carbono galvanizado DIN2440, o diâmetro interno igual ou imediatamente superior encontrado é de 1. 1/4" onde possui 35,9mm.

Com o diâmetro nominal da tubulação definido, podemos calcular o comprimento equivalente para as válvulas e conexões, conforme layout anexo. Na tabela 9 a seguir, temos os comprimentos equivalentes das válvulas e conexões da linha de entrada no tanque pulmão:

Tabela 9 – Comprimento equivalente das conexões da linha de entrada do tanque pulmão.

Tipo de conexão	Quantidade	Comprimento equivalente unitário	Comprimento equivalente total
Válvula esfera 1.1/4"	1	0,46 m	0,46 m
Curva 90° de 1.1/4"	2	1,1 m	2,2 m
Comprimento total equivalente (L2) =			2,66 m

Fonte: Aatoria

Verificando o diâmetro interno:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q_a^{1,85} \times L_t}{P \times \Delta P}}$$

Onde:

P – Pressão de trabalho = 8kgf/cm²

ΔP – Variação de Pressão Admissível = 0,3 kgf/cm² (valor considerado para até 500m)

L_t – Comprimento total geral = 289,99 metros

Q_a – Vazão total = 44,64 m³/hora

Substituindo os valores temos:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 44,64^{1,85} \times 289,99}{8 \times 0,3}} = 29,57 \text{ mm}$$

Sendo assim, o diâmetro nominal de 1.1/4" atende aos requisitos para a linha de entrada do tanque pulmão.

13.7 DIMENSIONAMENTO DA LINHA DE SAÍDA NO TANQUE PULMÃO

Para o cálculo do dimensionamento da linha de saída no tanque pulmão, a partir do layout temos que o comprimento total (L1) é igual a 208,04 metros e adotaremos a pressão de 8kgf/cm² devido a necessidade dos equipamentos.

O diâmetro interno mínimo da tubulação será obtido através da seguinte equação:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q_a^{1,85} \times L_1}{P \times \Delta P}}$$

Onde:

P – Pressão de trabalho = 8kgf/cm²

ΔP – Variação de Pressão Admissível = 0,3 kgf/cm² (valor considerado para até 500m)

L1 – Comprimento total = 208,04 metros

Qa – Vazão total = 44,64 m³/hora

Substituindo os valores temos:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 44,64^{1,85} \times 208,04}{8 \times 0,3}} = 27,66 \text{ mm}$$

O diâmetro interno mínimo calculado é igual a 27,66 mm, consultando a tabela 6 de tubos de aço carbono galvanizado DIN2440, o diâmetro interno igual ou imediatamente superior encontrado é de 1. 1/4” onde possui 35,9mm.

Com o diâmetro nominal da tubulação definido, podemos calcular o comprimento equivalente para as válvulas e conexões, conforme layout anexo. Na tabela 10 a seguir, temos os comprimentos equivalentes das válvulas e conexões da linha de entrada no tanque pulmão:

Tabela 10 – Comprimento equivalente das conexões da linha de saída do tanque pulmão.

Tipo de conexão	Quantidade	Comprimento equivalente unitário	Comprimento equivalente total
Válvula esfera 1.1/4"	1	0,46 m	0,46 m
Curva 90° de 1.1/4"	2	1,1 m	2,2 m
Comprimento total equivalente (L2) =			2,66 m

Fonte: Aatoria

Verificando o diâmetro interno:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q_a^{1,85} \times L_t}{P \times \Delta P}}$$

Onde:

P – Pressão de trabalho = 8kgf/cm²

ΔP – Variação de Pressão Admissível = 0,3 kgf/cm² (valor considerado para até 500m)

L_t – Comprimento total geral = 210,7 metros

Q_a – Vazão total = 44,64 m³/hora

Substituindo os valores temos:

$$\varnothing_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 44,64^{1,85} \times 210,7}{8 \times 0,3}} = 27,74 \text{ mm}$$

Sendo assim, o diâmetro nominal de 1.1/4" atende aos requisitos para a linha de saída do tanque pulmão.

13.8 DIMENSIONAMENTO DAS LINHAS QUE ABASTECEM AS MÁQUINAS

Para o cálculo do dimensionamento das linhas que abastecem as máquinas, a partir do layout temos que o comprimento total (L1) é igual a 20,0 metros para cada máquina e adotaremos a pressão de 8kgf/cm² devido a necessidade dos equipamentos.

O diâmetro interno mínimo da tubulação será obtido através da seguinte equação:

$$\phi_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q_a^{1,85} \times L_1}{P \times \Delta P}}$$

Onde:

P – Pressão de trabalho = 8kgf/cm²

ΔP – Variação de Pressão Admissível = 0,3 kgf/cm² (valor considerado para até 500m)

L1 – Comprimento total = 20,0 metros

Qa – Vazão total = 44,64 m³/hora

Substituindo os valores temos:

$$\phi_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 44,64^{1,85} \times 20,0}{8 \times 0,3}} = 17,32 \text{ mm}$$

O diâmetro interno mínimo calculado é igual a 17,32 mm, consultando a tabela 6 de tubos de aço carbono galvanizado DIN2440, o diâmetro interno igual ou imediatamente superior encontrado é de 3/4” onde possui 21,9 mm.

Com o diâmetro nominal da tubulação definido, podemos calcular o comprimento equivalente para as válvulas e conexões, conforme layout anexo. Na tabela 11 a seguir, temos os comprimentos equivalentes das válvulas e conexões da linha de entrada nas máquinas:

Tabela 11 – Comprimento equivalente das conexões da linha de entrada das máquinas.

Tipo de conexão	Quantidade	Comprimento equivalente unitário	Comprimento equivalente total
Válvula esfera 3/4"	1	0,27	0,27 m
Comprimento total equivalente (L2) =			0,27 m

Fonte: Aatoria

Verificando o diâmetro interno:

$$\phi_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q_a^{1,85} \times L_t}{P \times \Delta P}}$$

Onde:

P – Pressão de trabalho = 8kgf/cm²

ΔP – Variação de Pressão Admissível = 0,3 kgf/cm² (valor considerado para até 500m)

L_t – Comprimento total geral = 20,27 metros

Q_a – Vazão total = 44,64 m³/hora

Substituindo os valores temos:

$$\phi_{int.} = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 44,64^{1,85} \times 20,27}{8 \times 0,3}} = 17,36 \text{ mm}$$

Sendo assim, o diâmetro nominal de 3/4" atende aos requisitos para cada linha de abastecimento das máquinas.

13.9 TANQUE PULMÃO

Para o cálculo do tamanho do tanque pulmão da linha, temos que considerar que o volume do reservatório é de aproximadamente 10 a 20% a vazão do compressor em m³/min. Portanto a vazão atual dos três compressores que temos no sistema é de:

- Um compressor DSD 200 - KAESER - 24,48 m³/min.
- Dois compressores E 75 - ELGI - 12,5 m³/min x 2 compressores = 25 m³/min.

Somando os três compressores, teremos 49,48 m³/min, portanto se considerar 15% de vazão o volume do reservatório é:

$$49,48 \text{ m}^3/\text{min} \times 0,15 = 7,4 \text{ m}^3/\text{min}.$$

Com base nesse cálculo, foi determinado que um reservatório de 8m³ é adequado para atender aos requisitos do projeto. Essa abordagem visa garantir a capacidade suficiente de armazenamento para atender às demandas variáveis do sistema de compressores, otimizando a eficiência operacional e contribuindo para a estabilidade do fluxo de ar comprimido na linha.

14 ESCOLHA DE ACESSÓRIOS DA LINHA DE AR COMPRIMIDO

14.1 Filtro

Para a escolha do filtro foi levado em consideração para a aplicação, a necessidade de separador de água e óleo.

Será utilizado um conjunto de filtro lubrifil. Desta forma, podemos lubrificar a rede, regular a pressão e realizar a remoção de água na corrente de ar.

Figura 26 – Conjunto lubrifil



Fonte: Amazon.com.br

14.2 Sensores de monitoramento e controle

Integrar sensores em uma rede de ar comprimido é importante para garantir a eficiência operacional, segurança e confiabilidade do sistema.

Para esta rede, utilizaremos os sensores de:

- Vazão: Para garantir a vazão necessária de ar passa por um local em um determinado intervalo de tempo.

Figura 27 – Sensor de vazão



Fonte: Hi Tecnologia - Materiais.

- Pressão: Realizar a medição e monitoramento de pressão presente na linha.

Figura 28 – Sensor de pressão



Fonte: Hi Tecnologia - Materiais.

- Nível: Para o monitoramento de nível no reservatório.

Figura 29 – Sensor de vazão



Fonte: Hi Tecnologia - Materiais.

14.3 Válvulas

Existem várias considerações a serem levadas em conta ao escolher as válvulas para uma linha de ar comprimido, incluindo a taxa de fluxo desejada, a pressão de operação, o tipo de aplicação, a temperatura do ambiente e a presença de partículas sólidas.

Este processo de seleção não apenas influencia o desempenho operacional, mas também afeta diretamente a eficiência energética do sistema, a vida útil dos componentes e a manutenção geral.

Para este projeto, serão escolhidas as seguintes válvulas: Válvula de esfera DN 3/4", 1" e 1.1/4".

Figura 30 - Válvula de Esfera



Fonte: GodDistribuidor

14.4 Secador de ar

Será utilizado um secador de ar por refrigeração para atender as necessidades de aplicação.

Figura 31 - Secador de ar por refrigeração



Fonte: Kaeser Compressores - Produtos e soluções

15 CONCLUSÃO

Ao identificar e resolver questões críticas na fábrica de fertilizantes, como presença de água na linha e corrosão, a pesquisa destaca a importância da manutenção e da escolha cuidadosa dos materiais, evidenciando o aço carbono galvanizado como uma solução criteriosa.

A metodologia aplicada, integrando abordagens teóricas e práticas, resultou em cálculos precisos de vazão, dimensionamento da tubulação em conformidade com normas estabelecidas. A personalização do projeto para as linhas secundárias e máquinas, juntamente com a definição do tamanho do tanque pulmão, reflete a necessidade de adaptação às demandas específicas de cada setor, assegurando eficiência e segurança operacional.

Ao proporcionar uma visão abrangente, este estudo não apenas impulsiona o conhecimento em engenharia mecânica, mas também enfatiza a importância da previsão de crescimento futuro e da garantia de margens de segurança. Esses elementos contribuem não apenas para o desempenho adequado, mas também para a estabilidade e flexibilidade dos sistemas industriais, promovendo práticas eficientes e seguras no ambiente de trabalho.

REFERÊNCIAS

- AL-WAKED, R.; ZOUGHAIB, A.; OULADSINE, M. **Energy Efficiency Improvement of a Screw Air Compressor System.** *Energies*, [S.l.], v. 11, n. 4, p. 897, 2018. DOI: 10.3390/en11040897.
- AL-WAKEEL, M.I., Khan, A., & Ahmed, S. (2018). Comparative Analysis of Compressed Air Lubricants and Their Impact on the Performance of Air Compressors. *Journal of Tribology*, 140(4).
- ASHRAE Handbook: **HVAC Systems and Equipment.** Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2016.
- Bégaud, X., & Desoutter, C. (2014). **A Brief History of Compressed Air.** In Handbook of Compressed Gases (pp. 1-14). Springer International Publishing.
- BRUNO, G.; MESSANA, A.; NUCARA, A. **Experimental Investigation on Oil-Lubricated Twin Screw Compressor Performances.** *Procedia Engineering*, [S.l.], v. 105, p. 141-148, 2015. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.05.016.
- Hirst, J. E. (2018). **Compressed Air and Gas Handbook (8th ed.).** McGraw-Hill Education.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8573-1:2010, Compressed Air - Part 1: Contaminants and Purity Classes.** Geneva, 2010.
- KANTOR, G. **Air Compressor Operation and Maintenance.** New York: McGraw-Hill, 2012.
- KUJAWSKI, D. et al. **Performance analysis of centrifugal compressors with the application of inlet guide vanes.** *Applied Thermal Engineering*, v. 102, p. 1211-1219, 2016.
- MANUAL DE AR COMPRIMIDO.** São Paulo: Atlas Copco, 2001.
- MAZUR, Z. **Pneumatic Handbook.** Boca Raton: CRC Press, 2001.
- MOLINA, M. A. **Motores Alternativos de Combustão Interna.** São Paulo: Blucher, 2014.
- SMITH, J. R. **Compressed Air Operations Manual.** New York: McGraw-Hill, 2017.
- SMITH, T. A. (2015). **Pneumatics, Compressed Air and Vacuum Technology.** In *Mechanical Engineer's Reference Book (12th ed., pp. 18.1-18.29).* Butterworth-Heinemann.
- SURESH, P.; VEERAPPAN, A. R. **Design and CFD Analysis of Centrifugal Compressor Impeller.** *Materials Today: Proceedings*, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 5131-5137, 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.514.
- ZAPPE, C. **Compressed Air Handbook: Technologies, Regulations, and Applications.** Boca Raton: CRC Press, 2015.
- WITEK, K. **Ar comprimido na indústria: quais são as otimizações energéticas?** Disponível em: <<https://www.metron.energy/pt/blog/ar-comprimido-industria/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

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.

METALPLAN. **Manual de Ar Comprimido**. São Paulo: Metalplan, 2006.

COMPRESSOR, Meu. **Vida útil do compressor**. Disponível em: <<https://blog.meucompressor.com.br/vida-util-do-compressor-de-ar-como-aumentar/>>. Acesso em: 20 de Out de 2023

PARKER. **Dimensionamento de redes de ar comprimido**. Jacareí: Parker Training, 2006.

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.

SILVA, E. C. N. **Apostila de Pneumática**. São Paulo: Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Poli (USP), 2002.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

VAN WYLEN, G. J. E. S. R. E. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 7ª Edição. ed. [S.l.]: Edgard Blucher Ltda., 2009.

Çengel, Yunus A.; Cimbala, John M. (2015). **Mecânica dos Fluidos**. 3ª ed. Porto Alegre, RS: AMGH Editora. p. 81

KAESER COMPRESSORES. **Secadores por refrigeração Kaeser para sistemas de ar comprimido**. Disponível em: <<https://br.kaeser.com/produtos-e-solucoes/tratamento-de-ar-comprimido/secadores/secadores-por-refrigeracao/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

COPCO, A. **Ar comprimido frio com um secador de ar por refrigeração** - Atlas Copco Brasil. Disponível em: <<https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/wiki/compressed-air-articles/refrigerant-dryer>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

ROBERTO, F. **Como determino o volume do reservatório adequado para minha rede de ar?** Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/como-determino-o-volume-reservat%C3%B3rio-adequado-para-minha-roberto>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

FAGUNDES, Patricia Junqueira. **Quais os tipos de sensores industriais**. Disponível em:<<https://materiais.hitecnologia.com.br/blog/quais-sao-os-tipos-de-sensores-industriais/>>. Acesso em: 21 de Out de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6493: Emprego de cores para identificação de tubulações**. Rio de Janeiro, p. 3. 1994. Acesso em: 21 de Out de 2023.

HANNIFIN, Parker. **Compressed Air and Gas Filtration Products**. Disponível em: https://www.parker.com/parkerimages/finitefilter/webstuff/2006_Bound_Catalog.pdf. Acessado em: 22 de Nov. 2023.

HANNIFIN, Parker. **Preparação para Ar Comprimido**. Disponível em: <https://www.parker.com/parkerimages/br/download/automation/pdf/1001_3_br/prep_ar_comprimido.pdf>. Acessado em: 22 de Nov. 2023.

Fialho, Arivelto Bustamente. *Automação Pneumática*. 2ª ed. São Paulo: Editora ERICA, 2006.