



**GABRIEL RIBEIRO CABRAL**

**REDIMENSIONAMENTO E MELHORIA DO SISTEMA DE AR  
COMPRIMIDO DO LABORATÓRIO LIFE TEST - ZF**

**LAVRAS – MG**

**2023**

**GABRIEL RIBEIRO CABRAL**

**REDIMENSIONAMENTO E MELHORIA DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO DO  
LABORATÓRIO LIFE TEST - ZF**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Felipe Oliveira e Silva

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Coordenadoria de Processos Técnicos  
da Biblioteca Universitária da UFLA**

Cabral, Gabriel Ribeiro

REDIMENSIONAMENTO E MELHORIA DO SISTEMA  
DE AR COMPRIMIDO DO LABORATÓRIO LIFE TEST -  
ZF / Gabriel Ribeiro Cabral. – Lavras : UFLA, 2023.

64 p. :

TCC–Universidade Federal de Lavras, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Oliveira e Silva.

Bibliografia.

1. TCC. 2. Monografia. 3. Dissertação. 4. Tese. 5.  
Trabalho Científico – Normas. I. Universidade Federal de  
Lavras. II. Título.

CDD-808.066

**GABRIEL RIBEIRO CABRAL**

**REDIMENSIONAMENTO E MELHORIA DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO DO  
LABORATÓRIO LIFE TEST - ZF  
RESIZING AND IMPROVEMENT OF THE COMPRESSED AIR SYSTEM AT THE  
LIFE TEST LABORATORY - ZF**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 09 de março de 2023.

Profa. DSc. Bruna Oliveira Passos e Silva Siqueira UFLA  
Prof. Dr. Felipe Oliveira e Silva UFLA

Prof. Dr. Felipe Oliveira e Silva  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2023**

*Dedico este trabalho a meus pais que estiveram sempre presente e me apoiaram em toda a minha vida, à minha namorada que me ajudou e incentivou de diversas formas, à toda minha família com grandes ajudas ao longo de minha vida, a todos os meus colegas de trabalho que me ensinaram muito na questão profissional e a todos os meus colegas de graduação, alunos e professores que me providenciaram o conhecimento para hoje estar aqui.*

## **AGRADECIMENTOS**

Sou grato por poder estudar algo que eu gosto, por ter pais com palavras de ensinamentos e grande sabedoria, pela vida e por todo aprendizado que ela me proporcionou e ainda proporciona e por ter pessoas incríveis na minha vida que me ensinam diariamente, seja me mostrando quando estou errado ou me apresentando outras formas de ver a vida. Agradecimentos em especial ao meu pai, por todas as palavras de sabedoria que me concede; minha mãe, pelo seu jeito sincero e amoroso; minha namorada, pelo seu carinho e lealdade; meu tio Dido e minha tia Dalva, por terem me acolhido em minha vinda para São Paulo e minha irmã, pelo seu apoio e suporte.

*Seu esforço não faz o menor sentido se você não acredita em si mesmo.  
(Maito Gai)*

## RESUMO

O presente trabalho visa apresentar um estudo de adaptação de uma rede pneumática já existente no laboratório de testes de válvulas e atuadores da empresa ZF CV Systems Brasil LTDA, e então avaliar as suas condições e características de utilização. Após concluída a avaliação da rede pneumática, pretende-se realizar um redimensionamento que proporcione melhorias, seja com uma melhor qualidade do ar comprimido fornecido, ou por meio de uma maior garantia na uniformidade das condições de uso. Além disso, pretende-se realizar um estudo descritivo sobre as propriedades do ar comprimido, suas características e ainda sobre todo processo de produção e tratamento do ar comprimido de uma rede pneumática. Por fim, propõe-se uma atualização da rede pneumática, bem como são apresentadas as vantagens à rede e a todos os componentes nos quais o ar comprimido é utilizado no âmbito do dimensionamento atualizado.

**Palavras-chave:** Pneumática. Dimensionamento. Ar comprimido. Laboratório. Sistema pneumático.

## **ABSTRACT**

The present work aims to present a study of adaptation of an existing pneumatic network in the laboratory for testing valves and actuators of the company ZF CV Systems Brasil LTDA, and then evaluate its conditions and characteristics of use. After completing the evaluation of the pneumatic network, it is intended to carry out a resizing that will provide improvements, either with a better quality of the supplied compressed air, or through a greater guarantee in the uniformity of the conditions of use. In addition, it is intended to carry out a descriptive study on the properties of compressed air, its characteristics and also on the entire process of production and treatment of compressed air from a pneumatic network. Finally, an update of the pneumatic network is proposed, as well as the advantages to the network and to all the components in which compressed air is used within the scope of the updated dimensioning.

**Keywords:** Pneumatic. Dimensioning. Compressed air. Laboratory. Pneumatic system.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Atuador de travagem. . . . .	12
Figura 2.1 – Compressibilidade do ar . . . . .	17
Figura 2.2 – Elasticidade do ar . . . . .	18
Figura 2.3 – Expansibilidade do ar . . . . .	18
Figura 2.4 – Difusibilidade do ar . . . . .	19
Figura 2.5 – Modelos de compressores . . . . .	21
Figura 2.6 – Central de tratamento e armazenamento do ar comprimido. . . . .	24
Figura 2.7 – Método de secagem de ar comprimido. . . . .	27
Figura 2.8 – Filtros de ar comprimido. . . . .	27
Figura 2.9 – Ação centrífuga em um filtro. . . . .	29
Figura 2.10 – Reservatório de ar comprimido. . . . .	30
Figura 2.11 – Prevenção e drenagem para o condensado. . . . .	32
Figura 2.12 – Unidade de condicionamento (Lubrefil) . . . . .	32
Figura 2.13 – Elementos componentes de uma rede pneumática. . . . .	34
Figura 2.14 – Rede de circuito aberto. . . . .	35
Figura 2.15 – Rede de circuito fechado. . . . .	36
Figura 2.16 – Rede de distribuição com tubulações derivadas das transversais. . . . .	36
Figura 2.17 – Curvatura recomendada da rede pneumática. . . . .	37
Figura 2.18 – Custos associados ao ar comprimido. . . . .	38
Figura 2.19 – Vazamento e perda de potência em furos. . . . .	38
Figura 2.20 – Comprimento de tubo equivalente à perda de carga por singularidades. . . . .	40
Figura 3.1 – Sistema de aquisição de dados Yokogawa MW100. . . . .	46
Figura 3.2 – Transdutor de pressão. . . . .	46
Figura 3.3 – Fonte de alimentação. . . . .	47
Figura 3.4 – Controlador PID. . . . .	47
Figura 3.5 – Utilização da fonte. . . . .	48
Figura 3.6 – Configuração para leitura de pressão da bancada. . . . .	49
Figura 3.7 – Tubulação antes da instalação da válvula. . . . .	50
Figura 3.8 – Tubulação após a instalação da válvula. . . . .	50
Figura 3.9 – Circuito controlador. . . . .	51
Figura 3.10 – Controlador instalado à rede. . . . .	51

Figura 4.1 – Exemplo de bancada de teste. . . . .	53
Figura 4.2 – Pressão de regime no momento do teste de ciclagem. . . . .	55
Figura 4.3 – Pressão mínima durante o teste de ciclagem. . . . .	55
Figura 4.4 – Rede pneumática em sua configuração atual. . . . .	57
Figura 4.5 – Rede pneumática em sua configuração atual em CAD. . . . .	58
Figura 4.6 – Pontos principais de necessidade de alimentação. . . . .	58
Figura 4.7 – Sugestão de nova configuração para a rede pneumática. . . . .	59
Figura 4.8 – Sugestão de nova configuração para a rede pneumática em CAD. . . . .	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Dados de estanqueidade da tubulação. . . . .	53
Tabela 4.2 – Comprimento equivalente das singularidades. . . . .	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>14</b>
2.1	Apanhado histórico	14
2.2	Características do ar comprimido	15
2.2.1	Composição do ar	15
2.2.2	Propriedades do ar comprimido	16
2.3	Produção e distribuição do ar	20
2.3.1	Compressores	20
2.3.2	Sistema de tratamento	22
2.3.3	Resfriador posterior	25
2.3.4	Secadores de ar	25
2.3.5	Filtros de ar	27
2.3.6	Reservatórios de ar	29
2.3.7	Purgadores	31
2.3.8	Unidade de condicionamento (Lubrefil)	32
2.4	Dimensionamento da rede pneumática	33
2.4.1	Layout da rede	33
2.4.2	Fugas e perdas de carga	37
2.4.3	Material	41
2.4.4	Diâmetro da tubulação	42
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>45</b>
3.1	Metodologia	45
3.2	Materiais	45
3.3	Métodos	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>52</b>
4.1	Cálculo do vazamento do laboratório	52
4.2	Queda de pressão atual	54
4.3	Cálculo do volume necessário do reservatório	56
4.4	Atualização da configuração da rede	56
4.5	Cálculo do diâmetro da rede atualizada	60
4.6	Escolha do material para a rede	61

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A principal atividade da empresa “ZF CV Systems Brasil LTDA” é a fabricação de peças e acessórios utilizados no sistema de freios de veículos automotores, em particular itens como válvulas, atuadores e compressores. O funcionamento destes itens está sempre relacionado com a utilização de ar comprimido, por isso, é de grande importância um controle em sua condição de aplicação, principalmente quando se trata de um uso contínuo. É fundamental que o ar comprimido apresente qualidade e uniformidade nas suas condições de uso, principalmente no ambiente de teste pós-produção. No laboratório de testes de válvulas e atuadores da empresa, existem testes com elevada demanda de ar comprimido, onde um dos testes com maior demanda é o do atuador de travagem que é apresentado na Figura 1.1. Esta condição torna a exigência de controle das condições uniformes mais desafiadora.

Figura 1.1 – Atuador de travagem.



Fonte: O Mecânico (2019)

Ao longo dos anos, o sistema pneumático do laboratório de testes da empresa foi sendo modificado e adaptado conforme o surgimento de novas necessidades. Dessa forma já não se sabe se o projeto inicial seria o mais adequado para o momento atual. Diante de tal realidade, parte-se da hipótese que o dimensionamento do atual sistema pneumático se encontra desatualizado, já que sua demanda evoluiu ao longo dos anos, abrindo margem para a otimização do sistema considerando a realidade atual e ainda considerando uma perspectiva futura de crescimento do laboratório.

Um sistema de ar comprimido bem dimensionado pode garantir todas as qualidades necessárias para um laboratório de teste e ainda proporcionar um menor custo para a empresa, já que, além de reduzir o consumo de energia, colabora no sentido de aumentar a vida útil dos equipamentos pneumáticos, uma vez que o ar comprimido de melhor qualidade é viabilizado. Além disso, todo sistema pneumático está sujeito a vazamentos, em geral, eles têm origens

diversas e são frequentes, sua presença leva a perdas significativas à rede que representam de 10% a 40% da demanda total. Dessa forma, o correto dimensionamento atua no sentido de facilitar a manutenção e ainda minimizar as perdas presentes (ELETROBRÁS, 2014).

Desta forma, este trabalho tem por objetivo propor o dimensionamento do sistema pneumático do laboratório de testes da empresa ZF CV Systems Brasil LTDA, tendo como motivação a importância de um sistema de ar comprimido bem dimensionado. Além disso, o trabalho apresenta o processo de produção de ar comprimido juntamente com as propriedades do ar, e por fim, avalia a necessidade de uma atualização no sistema de ar comprimido do laboratório de testes diante sua demanda de ar comprimido. Outra característica deste trabalho é que ele apresenta um estudo da demanda atual via medições, e também considera cálculos de projeção para demandas futuras do laboratório. Como consequência, proposto um novo dimensionamento conforme a demanda atual e a sua perspectiva de crescimento para os próximos anos.

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico com foco nas propriedades do ar e apresentação do processo de produção de ar comprimido. Posteriormente são apresentados os cálculos necessários para dimensionamento de uma rede pneumática e as condições de qualidade de produção. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia do trabalho, juntamente com os materiais e métodos utilizados nele. Já no Capítulo 4 são apresentados os cálculos referente ao dimensionamento, com obtenção do diâmetro da tubulação, definição do material e sugestão de atualização de *layout*. Por fim, no Capítulo 5 é apresentado a conclusão.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Apanhado histórico

O uso do ar comprimido está presente desde os tempos primitivos da humanidade, onde sua geração se dava com o uso da força dos pulmões do ser humano aliado ao uso de artefatos tais como ossos ocos ou bambus. O ar comprimido gerado neste período era utilizado principalmente nas fogueiras, as quais auxiliavam no cozimento de alimentos e na fundição de alguns metais (PAVANI, 2011),.

Posteriormente o método de obtenção do ar comprimido foi aperfeiçoado com o uso dos primeiros foles feitos de bexigas de animais. Este aprimoramento resultou em um ganho de potência no processo e ainda uma compensação devida à limitação dos pulmões (PAVANI, 2011). De acordo com Simões (2016), as primeiras máquinas com acionamento pneumático de que se tem conhecimento, foram criadas em Alexandria no século III a.C.. Foi contudo somente nos séculos XVI d.C. e XVII d.C. que surgiram as importantes descobertas consideradas como pilares para muitos dos fundamentos aplicados ainda hoje.

Para Pavani (2011), mesmo a pneumática sendo uma tecnologia relativamente antiga para o homem, seu aproveitamento na produção industrial só foi acontecer após 1950, e ainda hoje sua importância continua ganhando relevância, o que a torna quase indispensável para grande parte das implementações de automação industrial. Simões (2016), por exemplo, diz que “a utilização do ar comprimido para automação de processos é de grande importância tecnológica, sendo este empregado atualmente em toda e qualquer área e setor industrial na indústria moderna”. Isso evidencia a relevância que o uso do ar comprimido adquiriu nos mais diversos setores, além de uma ampla presença no cenário industrial. Além disso, outros benefícios da aplicação de redes pneumáticas são que elas podem proporcionar uma maior segurança, juntamente com um aumento de produtividade em produções de larga escala, além de possuir um baixo custo operacional de manutenção e implementação se comparada a outros sistemas (PAVANI, 2011).

Dessa forma, pode-se afirmar que a pneumática já estava presente nos primórdios da espécie humana mesmo sem o seu entendimento, e, ao longo dos séculos, sua compreensão evoluiu, tornando-a fundamental nos mais diversos setores industriais. O domínio da pneumática propiciou diversas vantagens para a produção em larga escala, graças à rapidez de resposta de seus sistemas e a possibilidade de automação de processos repetitivos.

## 2.2 Características do ar comprimido

### 2.2.1 Composição do ar

Prudente (2013) conceitua que “o ar é a mistura de gases que envolve o nosso planeta. A composição média do ar seco, ou seja, sem valor d’água é a seguinte: nitrogênio 78%, oxigênio 21% e gases raros 1%”. Os gases raros são também denominados de gases nobres, e são os elementos menos abundantes da atmosfera. Tal grupo é constituído dos elementos hélio, neônio, argônio, criptônio, xenônio, e de outros gases, tais como o dióxido de carbônio e o hidrogênio (PRUDENTE, 2013).

Para Silva (2020), o ar pode ser considerado uma mistura entre ar seco e vapor de água. A concentração máxima de vapor de água na constituição do ar é conhecida como ponto de orvalho, sendo ela, variável conforme a temperatura em que o ar se encontra. A concentração máxima de vapor de água, geralmente diminui à medida que a temperatura cai, e normalmente o ar não possui a concentração máxima de vapor de água nele (SILVA, 2020).

Bosch (2008), por outro lado, afirma que “se a temperatura é aumentada, mais água por volume pode ser armazenada. Se a temperatura é baixada, o vapor de água já não pode ser retido, então precipita na forma de condensação”. Assim, pode-se concluir que o ponto de orvalho é um valor de referência para estimar a quantidade de vapor de água que estaria contida no ar, mas que dificilmente é a quantidade real. Além disso, é possível afirmar que a temperatura é um dos fatores primordiais para o surgimento de condensado nas redes pneumáticas, por ser ela a responsável pela concentração de água no ar.

Silva (2020) também diz que a composição do ar pode variar de acordo com a região. Dessa forma ele pode se encontrar contaminado com partículas no estado sólido como poeiras ou fibras, também com partículas em seu estado líquido como aerossóis, nevoas ou neblinas, e com partículas no estado gasoso como gases ou vapores. A intensidade de contaminação é um fator que varia de acordo com a região, podendo ser mais ou menos intensa conforme as características do local, e deve-se sempre levar em consideração as características do ar o qual está sendo inserido o sistema pneumático para o devido tratamento de acordo com seu uso (SILVA, 2020).

## 2.2.2 Propriedades do ar comprimido

Uma das principais propriedades do ar comprimido para fins de uso em redes pneumáticas, é que ele pode ser armazenado e transportado por tubulações, além de poder executar trabalho por meio da conversão de energia através componentes tais itens como motores e cilindros (BOSCH, 2008). Segundo Bosch (2008) o ar comprimido é basicamente ar atmosférico pressurizado, o que o torna condutor de energia térmica e capaz de gerar fluxo de energia. Tal armazenamento de energia ocorre na forma de pressão e o torna apto a realizar trabalho.

O sistema de ar comprimido possui diversas vantagens em relação a outros sistemas, pois ele pode ser transportado por longas distância sem riscos, isto, nos casos em que exista a possibilidade de vazamentos e não haja o risco de explosão ou contaminação (BOSCH, 2008). Dessa forma, o sistema garante maior segurança para diversas aplicações, além de permitir o armazenamento sem maiores dificuldades em reservatórios. São as características do ar comprimido que lhe permitem realizar trabalho ao passo que seu armazenamento é o que garante uma forma de reserva de energia, sendo esta característica semelhante à função de uma bateria.

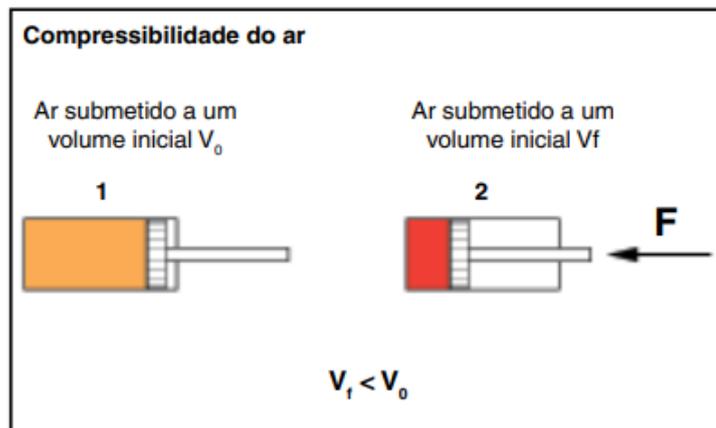
Outra vantagem do ar comprimido, é que caso o sistema pneumático apresente algum vazamento devido a elementos mal vedados, não haverá risco de poluição ambiental, já que haveria apenas a liberação de ar comprimido ao ambiente (FIALHO, 2004). Essa característica é ainda mais interessante para os setores onde existe uma maior preocupação com a possibilidade de contaminação dos produtos fabricados, como ocorre nos setores alimentícios e farmacêuticos (FIALHO, 2004).

Conforme mencionado, os fatores que tornam possível a utilização do ar como agente realizador de trabalho são suas propriedades físicas, logo o entendimento das mesmas indispensável para o funcionamento pleno do sistema pneumático e elaboração de melhorias e/ ou re-dimensionamentos. Uma das principais propriedades do ar é a compressibilidade (Figura 2.1), sendo ela comum a todos os gases. Essa característica é fundamental para a produção do ar pressurizado, pois é ela que permite que o ar, ao ser submetido por uma força exterior, sofra uma redução em seu volume e conseqüentemente tenha um aumento em sua pressão interna (PARKER, 2006).

Fialho (2004) afirma que, a característica do ar, de ocupar totalmente o ambiente em que ele se encontra, torna sua compressão possível, a qual é geralmente realizada por meios mecânicos. A compressão pode ser realizada em qualquer recipiente hermeticamente fechado:

quando comprimido o recipiente, o ar contido obterá uma pressão interna maior. O ganho de pressão na compressão é realizado à medida que o ar é comprimido, sendo apenas limitado pela resistência mecânica do compartimento onde o fluido está inserido e pela capacidade de exercer força sobre o recipiente (FIALHO, 2004).

Figura 2.1 – Compressibilidade do ar



Fonte: Parker (2006)

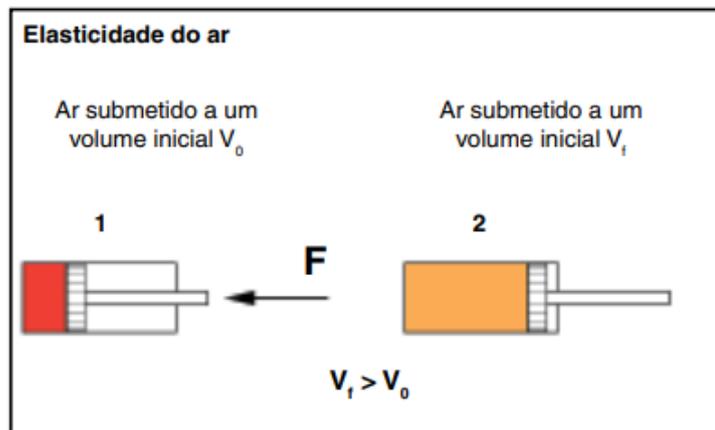
Fialho (2004) afirma que a compressibilidade, por outro lado, é a característica que impossibilita a utilização da pneumática em situações com velocidades uniformes ou com velocidades constantes. Assim, quando essas características forem primordiais para a aplicação, outras opções se tornam mais interessantes.

Além da compressibilidade, outra propriedade de grande importância do ar é a elasticidade (Figura 2.2), a qual permite que o ar retorne ao seu volume inicial após cessar uma força externa que esteja comprimindo seu volume (PARKER, 2006). Essa característica é amplamente explorada nos sistemas pneumáticos, já que durante a expansão existe a possibilidade de realização de trabalho. Além disso, ela também é explorada quando se deseja um retorno de posição após finalizado um esforço que comprima um volume de ar.

Outra característica do ar de grande relevância nos sistemas pneumáticos é a expansibilidade (Figura 2.3), a qual garante que o ar ocupe totalmente o volume onde o mesmo esteja inserido (PARKER, 2006). Nesse sentido, Fialho (2004) adiciona que: “o ar, bem como todos os gases, não tem forma definida, o que lhe permite adquirir a forma do recipiente que o contém, mudando-a ao menor esforço”. Por isso, em um sistema pneumático é a expansibilidade que garante que toda a tubulação de um volume fechado, esteja abastecida com o ar comprimido nas

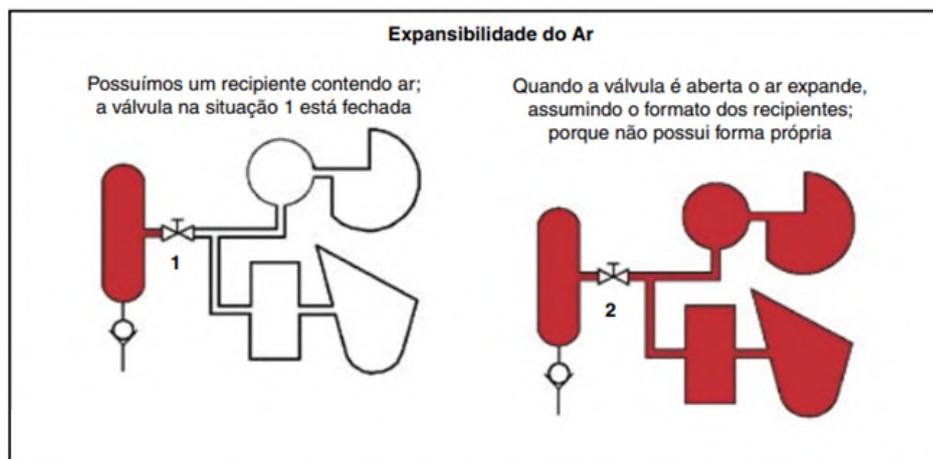
mesmas condições, e ao abrir uma válvula que dá acesso a uma ramificação, o ar comprimido naturalmente preencha as novas ramificações.

Figura 2.2 – Elasticidade do ar



Fonte: Parker (2006)

Figura 2.3 – Expansibilidade do ar



Fonte: Parker - Adaptado (2006)

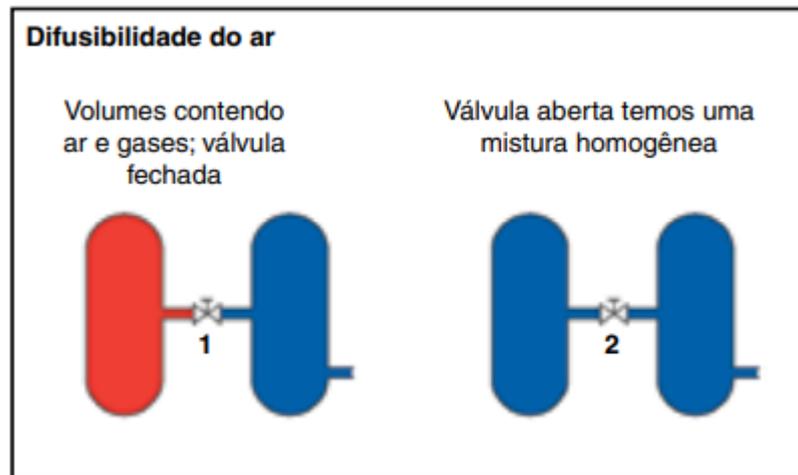
Parker (2006) também salienta a característica de difusibilidade (Figura 2.4), sendo a propriedade do ar de se misturar de forma homogênea a todo e qualquer meio gasoso que não esteja na condição saturada.

O ar como um fluido também possui a propriedade física denominada “viscosidade”, a qual indica a resistência do mesmo ao escoamento. Essa é uma característica do ar que o torna vantajoso em relação ao sistema hidráulico, já que sua viscosidade não é afetada pela variação de temperatura, assim, seu uso é mais seguro em condições extremas (FIALHO, 2004).

Segundo Fialho (2004), outras características que tornam o uso do ar comprimido vantajoso são: a quantidade quase ilimitada de ar a ser comprimido disponível na atmosfera, a

não necessidade de uma linha de retorno (diferente dos sistemas hidráulicos) e por último a condição do ar não poluir o ambiente em caso de escape das tubulações.

Figura 2.4 – Difusibilidade do ar



Fonte: Parker - Adaptado (2006)

Apesar de apresentar muitas vantagens, o uso do ar comprimido também apresenta alguns pontos negativos em sua aplicação. Um deles é a preparação, pois se essa etapa não for realizada adequadamente, haverá redução na vida útil dos equipamentos e de todo o sistema. Nesta etapa, deve-se atentar especialmente para a redução de impurezas e umidade do sistema (PAVANI, 2011).

Outras desvantagens do uso do ar comprimido é que ele é ruidoso, e como dito anteriormente, há uma grande dificuldade de se obter um controle preciso nos casos de necessidade de paradas imediatas, e velocidade reduzida por causa da sua alta compressibilidade (PAVANI, 2011). Outro fator limitante apresentado por Pavani (2011), é a pressão de trabalho, já que quando há necessidade de altas pressões, a opção de utilizar ar comprimido torna-se menos econômica.

Em geral os componentes dos sistemas pneumáticos são projetados para uma pressão máxima de 17 bar. Para este nível de pressão, as forças que podem ser obtidas são pequenas se comparadas a outros sistemas (PAVANI, 2011). No entanto, este fator também reduz a necessidade de materiais robustos na construção, tornando possível a construção de componentes com materiais menos resistentes e mais leves (geralmente baseados em liga de alumínio), o que torna o custo relativamente menor.

## 2.3 Produção e distribuição do ar

### 2.3.1 Compressores

Os compressores estão presentes em todos os processos de geração de ar comprimido. É neles que ocorre a transformação de ar atmosférico em ar comprimido, sendo este o processo de compressão. Por isso, sua escolha depende de características individuais a cada rede pneumática, como a pressão de regime e a vazão do ar comprimido que são necessárias a ela. Para Parker (2005), os compressores são definidos como: “máquinas destinadas a elevar a pressão de um certo volume de ar, admitido nas condições atmosféricas, até uma determinada pressão, exigida na execução dos trabalhos realizados pelo ar comprimido”. Assim, pode se afirmar que é nos compressores que ocorre a transformação da energia de alimentação, sendo elétrica ou mecânica, em energia de pressão, a qual torna o ar apto a realizar trabalho.

Existem formas eficientes e variadas de se comprimir o ar, o que resulta em uma ampla gama de modelos de compressores, cada qual caracterizado pelo seu princípio de funcionamento. Nesse sentido, é comum dividir os compressores em dois grandes grupos, de acordo com o método de compressão utilizado: os compressores dinâmicos e os compressores de deslocamento positivo (BOSCH, 2008).

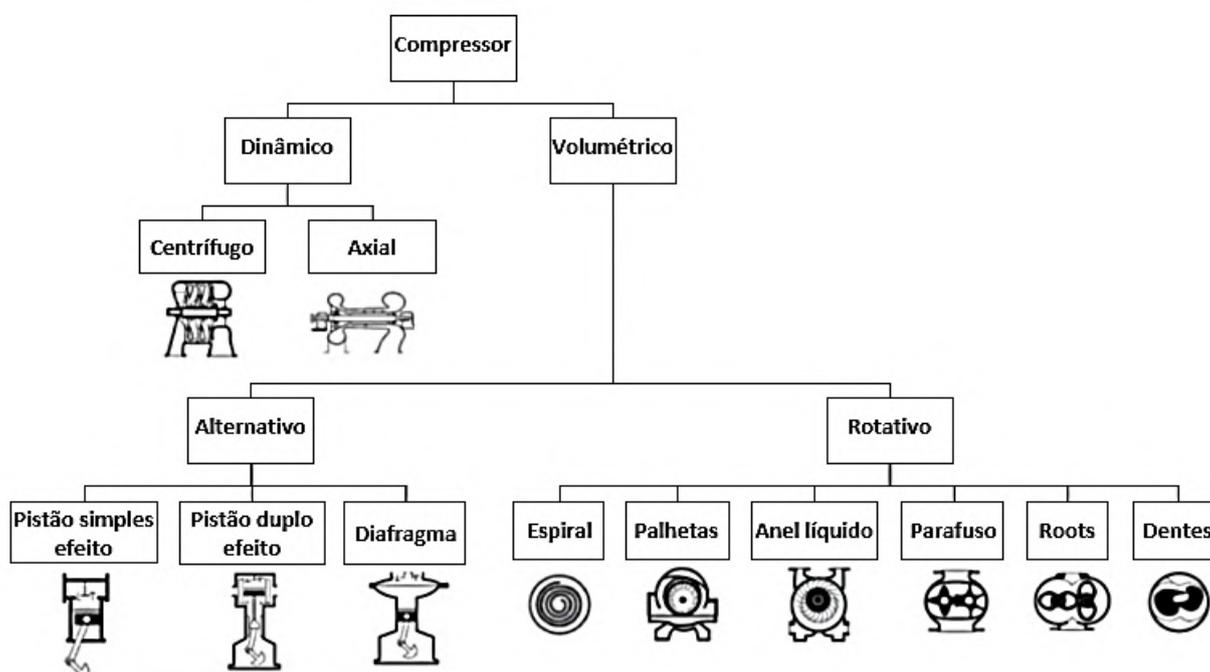
Os compressores dinâmicos, também conhecidos como turbocompressores, utilizam principalmente a conversão de energia cinética, por meio da rotação, para gerar ar comprimido e aumentar a pressão. No entanto, uma parte da energia transferida também pode ser dissipada na forma de calor (BOSCH, 2008). Este processo envolve duas peças principais: o impelidor e o difusor. O impelidor é uma peça rotativa composta por pás que transfere a energia proveniente do acionador, enquanto o difusor é um componente fixo responsável por converter a energia cinética recebida do impelidor em energia térmica, o que eleva a pressão do fluido em escoamento (BOSCH, 2008).

Segundo Henn (2006), devido ao elevado rendimento às dimensões reduzidas, os turbocompressores dominam a gama de grandes vazões e de grandes potências. Esse grupo é composto apenas por dois subtipos de compressores: centrífugos e axiais. De acordo com Silva (2020), os compressores dinâmicos do tipo centrífugo são amplamente utilizados no setor industrial devido à sua simplicidade, enquanto os compressores dinâmicos axiais são capazes de trabalhar com velocidades mais elevadas, resultando em vazões superiores e constantes. Além

disso, em comparação com outros compressores centrífugos equivalentes, os compressores dinâmicos axiais são menores e mais leves.

Os compressores de deslocamento positivo, por outro lado, são classificados em dois subtipos: rotativos ou alternativos. Esse grupo também é conhecido como compressores volumétricos e possui uma ampla variedade de modelos. Na Figura 2.5 é apresentado cada modelo de compressor em seu respectivo grupo.

Figura 2.5 – Modelos de compressores



Fonte: Silva (2020)

Segundo Parker (2001), o funcionamento dos compressores de deslocamento positivo “baseia-se fundamentalmente na redução de volume. O ar é admitido em uma câmara isolada do meio exterior, onde seu volume é gradualmente diminuído, processando-se a compressão”. Já Bosch (2008), diz que os compressores volumétricos têm como principal característica a capacidade de operar com o auxílio de um movimento rotativo, onde a elevação da pressão é obtida por meio da redução do volume ocupado pelo ar no sistema. Seu funcionamento ocorre de maneira cíclica, compreendendo as etapas de admissão, compressão e descarga.

O ciclo de funcionamento dos compressores de deslocamento positivo inicia-se com a admissão, onde o ar é admitido no interior da câmara de compressão, em seguida ocorre a etapa de compressão, reduzindo seu volume, e por fim, a descarga, com a liberação do ar comprimido para uso e preparação para o reinício do ciclo (BOSCH, 2008). Os compressores volumétricos

do tipo alternativo utilizam pistões para realizar a compressão, podendo ser de simples efeito, duplo efeito ou com diafragmas. Na indústria, os mais comuns são os de duplo efeito refrigerados a água, devido à sua maior eficiência, realizando a compressão em ambos os sentidos de movimento. No entanto, esse modelo apresenta um custo mais elevado em comparação com os compressores rotativos, além de demandar mais espaço e ser mais ruidoso (SILVA, 2020).

Os compressores do tipo alternativo são ideais para aplicações que requerem pressões de descarga elevadas, pois permitem a opção de compressores com vários estágios de compressão. Por exemplo, em um compressor de dois estágios, o ar é comprimido no primeiro estágio, produzindo ar pressurizado, que passa então pelo segundo estágio para uma nova compressão, resultando em um aumento ainda maior na pressão do ar comprimido. À medida que se aumenta o número de estágios, também se aumenta a capacidade de obter pressões mais elevadas. No entanto, vale destacar que o uso de múltiplos estágios pode tornar o compressor mais complexo e mais caro (FIALHO, 2004).

Se tratando agora dos compressores volumétricos rotativos, Souza (2016) diz que, seu uso é mais viável quando existe alta demanda de vazão. Além disso, eles apresentam uma grande variedade de formas de compressão, como os compressores de *roots*, dentes, parafuso, anel líquido, espiral e palhetas, sendo o compressor de parafuso o mais utilizado na indústria. Isso ocorre devido ao seu baixo custo inicial, menor tamanho e facilidade de manutenção. A Figura 2.5 apresenta alguns exemplos de compressores volumétricos rotativos.

Existem diversos tipos de compressores, e cada um deles é adequado para uma faixa específica de pressão e vazão. As vantagens e desvantagens de cada compressor podem variar de acordo com as necessidades do projeto. Por essa razão, a escolha do compressor adequado deve ser realizada considerando parâmetros como faixa de operação, vazão, rendimento e necessidade de manutenção, com o objetivo de atender às demandas do sistema de forma eficiente (PACCO, 2013).

### **2.3.2 Sistema de tratamento**

Como já mencionado anteriormente, o ar não é composto apenas por uma mistura de gases, mas também contém água e outros resíduos. Além disso, durante o processo de compressão, o ar pode ser contaminado por óleo ou partículas resultantes do desgaste dos compressores. Essa contaminação também pode ocorrer durante o processo de distribuição (FABIÁN,

2017). Segundo Parker (2005) “o compressor, ao admitir ar, aspira também os seus compostos e, ao comprimir, adiciona a esta mistura o calor sob a forma de pressão e temperatura, além de adicionar óleo lubrificante”.

Para ser utilizado em sistemas pneumáticos, o ar precisa estar em condições adequadas, ou seja, na pressão correta e livre de impurezas e umidade. A pressão é obtida por meio do compressor, enquanto a qualidade é assegurada pelo uso de dispositivos como purgadores, secadores e filtros. Dessa maneira, é possível garantir o excelente desempenho dos componentes do sistema, bem como uma vida útil prolongada (FIALHO, 2004). Segundo Silva (2020), “Os condensados gerados em todo o processo são extremamente perigosos, uma vez que podem conter partículas de pó, hidrocarbonetos, dióxido de enxofre, cobre, chumbo, ferro e outros contaminantes”. Por isso, é fundamental um processo de secagem após a compressão e fundamental a instalação de purgas de drenagem ao longo da linha, as quais fazem a remoção dos condensados gerados na rede e os direciona a uma central de tratamento.

Além disso, é necessário remover os contaminantes presentes no ar atmosférico, bem como aqueles gerados durante o processo de compressão, por meio do uso de elementos filtrantes. Esses contaminantes têm potencial para causar danos ou mesmo destruir os equipamentos tanto na central de produção quanto nos consumidores finais (SILVA, 2020). O mal preparo do ar causa diversos prejuízos ao sistema, tais como corrosão em tubulações, válvulas e outros componentes, além de um desgaste acelerado nas vedações e contaminação em silenciadores, afetando negativamente a vida útil dos componentes presentes no sistema (PAZ, 2012).

Além disso, a pressão e a temperatura que o ar se encontra potencializam os efeitos prejudiciais de todos esses contaminantes e a gradual queda de temperatura do ar ao longo do sistema provoca a condensação de alguns contaminantes que antes se encontravam em fase gasosa (FABIÁN, 2017).

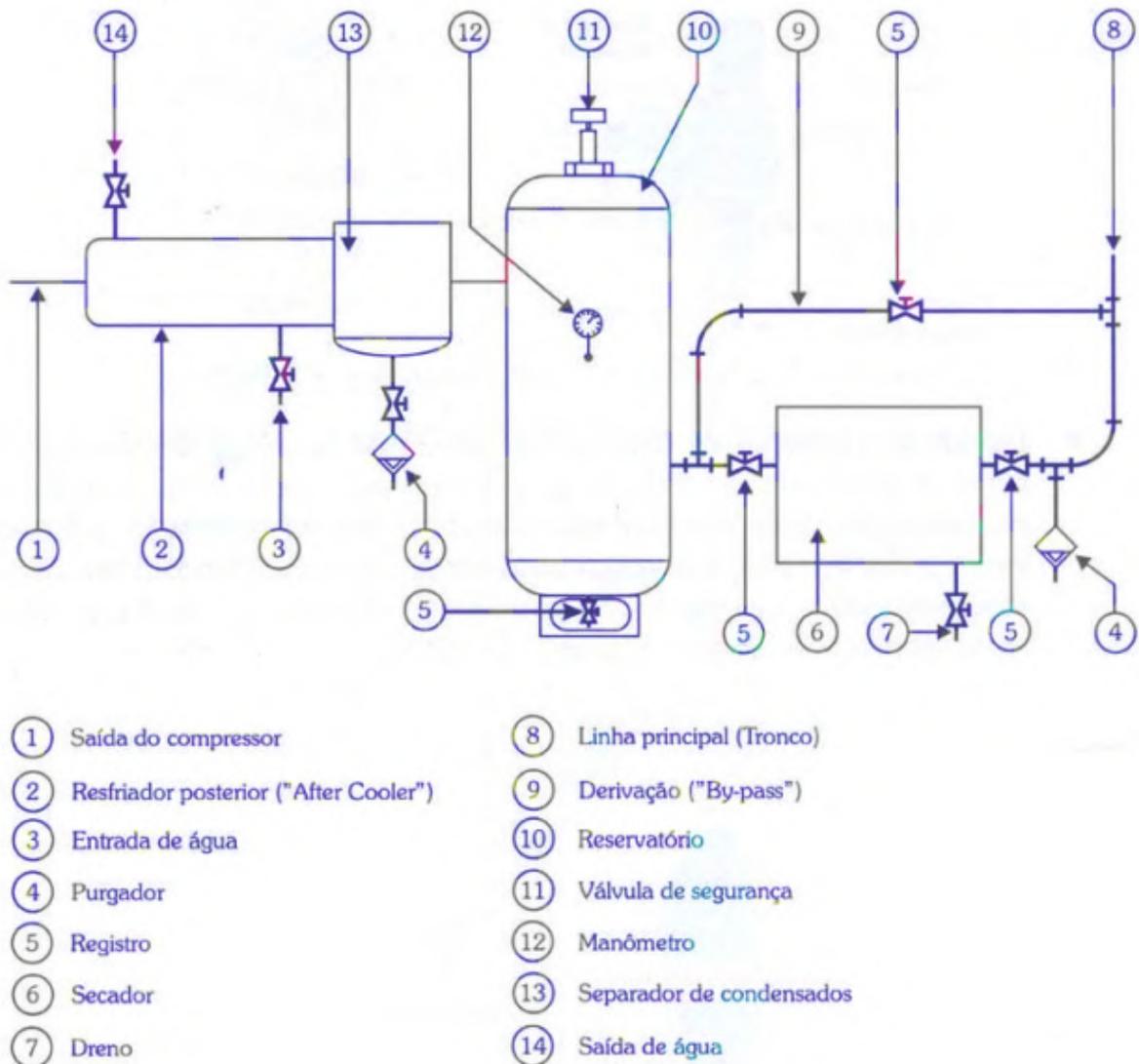
“Ao condensarem, esses contaminantes se encontrarão no fluxo de ar comprimido sob diferentes formas, desde um conjunto amorfo, no caso de um filete condensado depositado nas partes inferiores da tubulação e dos equipamentos, passando por pequenas gotas e chegando até aerossóis microscópicos dispersos entre as moléculas do ar comprimido. Estas substâncias provocam danos à integridade do sistema e, posteriormente, à devida aplicação para a qual o ar foi preparado. (FABIÁN, 2017, p. 30)”

A fim de evitar danos nos equipamentos do sistema pneumático ou dos consumidores finais, é necessário contar com um sistema de tratamento do ar comprimido após a compressão. A preparação do ar envolve a redução da sua temperatura pós-compressão, a eliminação do

condensado e a remoção de partículas sólidas. Além disso, é fundamental controlar a pressão e adicionar lubrificante ao ar para garantir o melhor desempenho do sistema. (PARKER, 2001).

Na Figura 2.6 são apresentados os itens de uma central de tratamento e armazenamento de ar comprimido:

Figura 2.6 – Central de tratamento e armazenamento do ar comprimido.



Fonte: Fialho (2004)

A utilização de uma central de tratamento e armazenamento de ar comprimido é indispensável em todo sistema pneumático. Sua presença permite que o sistema opere em condições favoráveis ao mesmo tempo que prolonga sua vida útil (PARKER, 2005). Normalmente, a produção de ar comprimido é realizada por um único sistema que fornece o ar comprimido a partir de um reservatório para diversos pontos de trabalho através de uma rede de distribuição. É importante realizar o tratamento prévio do ar comprimido antes e depois do armazenamento

no reservatório e garantir o funcionamento e a manutenção adequada de todos os elementos da central de tratamento (SOUZA, 2016).

### **2.3.3 Resfriador posterior**

Quando o ar sai do compressor, sua temperatura tende a aumentar devido ao processo de compressão. Para evitar problemas no sistema, é essencial que o ar passe por um resfriador posterior que reduza sua temperatura aos níveis adequados para a rede. Esse processo permite a eliminação de vapor de água e óleo presentes no ar e previne a dilatação térmica, que poderia ser causada pelo aumento da temperatura de descarga do ar (PARKER, 2005).

Segundo Souza (2016), “Os arrefecedores são trocadores de calor, instalados na saída do compressor para reduzir a temperatura do ar comprimido uma vez que ela pode chegar até 130°C, reduzindo para níveis próximos da temperatura ambiente”. Existem dois tipos de arrefecedores de ar: os de refrigeração a ar e os de refrigeração a água. O segundo tipo é geralmente mais eficiente, pois é capaz de retirar cerca de 75% a 90% do vapor de água e óleo presentes no ar (SOUZA, 2016).

### **2.3.4 Secadores de ar**

O ar ambiente em sua constituição possui umidade a qual pode condensar e causar danos aos equipamentos do sistema pneumático. Para evitar isso, é necessário realizar o processo de secagem do ar. Existem três métodos para realizar a secagem do ar: condensação, difusão e absorção. O método de condensação é o mais comum e eficiente, onde a umidade é removida por meio de resfriamento do ar até que ocorra a condensação da umidade, a qual pode ser eliminada por um purgador. (SILVA, 2020). Este método consiste basicamente num ciclo frigorífico, em que a refrigeração do ar comprimido causa a condensação do vapor de água que está contido nele. Este método acaba se tornando limitado a valores acima de 0°C, já que em temperaturas inferiores à água congelaria e obstruiria a passagem do ar (SILVA, 2020).

Bosch (2008) diz que: “ao diminuir as temperaturas, a capacidade do ar para armazenar água é reduzida”, por isso, a condensação ocorre por uma redução na capacidade de armazenar umidade do ar, processo este chamado de condensação criogênica. Parker (2005) ainda ressalta que deve-se dar atenção a temperatura da água fornecida para o resfriamento do ar, pois “se

o fluido refrigerante for circulado com uma temperatura elevada ou se o volume necessário de água para o resfriamento for insuficiente, o desempenho do resfriador poderá ser comprometido”. Outro método de secagem por condensação é o método por alta pressão, onde realiza-se a compressão do ar acima da pressão exigida antes de ser resfriado e descomprimido à pressão de trabalho. Com a redução do volume e o aumento da pressão, a capacidade de armazenar água se torna menor, e uma grande quantidade de condensado é precipitada (BOSCH, 2008, p. 15).

Dentro dos métodos de secagem por condensação, o criogênico possui as características de ter uma alta eficiência de secagem e economia, além de uma baixa perda de pressão no secador, enquanto o processo por alta pressão é econômico apenas para baixa vazão, mas não necessita de equipamentos criogênicos e ainda tem alto consumo de energia (BOSCH, 2008).

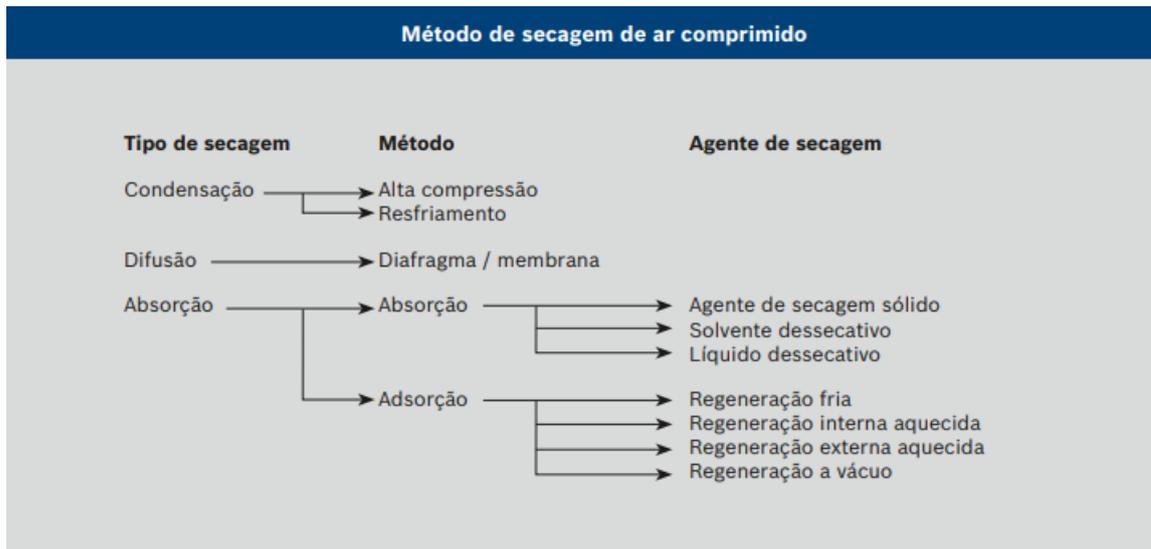
Além destes métodos de secagem apresentados, existe o método de secagem por difusão, o qual é descrito por Bosch (2008) na citação a seguir:

“o ar comprimido úmido flui por dentro das fibras ocas (fluxo interno). O vapor de água contido no ar comprimido sai pelas paredes dessas fibras. Do fluxo principal (de ar seco) do compressor, uma corrente de ar é expurgada e descomprimada. Visto que a umidade atmosférica máxima depende do volume, a umidade atmosférica relativa cai e o ar expurgado se torna muito seco. (BOSCH, 2008)”

Por fim, temos o método de secagem por absorção ou adsorção, que consiste no uso de materiais dessecantes, como sílica gel, seiva molecular ou alumina ativa, pelos quais o ar passará. A secagem ocorre graças ao poder de atração entre as moléculas de água e esses materiais que as adsorvem, tornando o ar extremamente seco. (SILVA, 2020). Apesar de possuir uma grande eficiência em remover água do ar e não necessitar de abastecimento energético, a capacidade de absorção dos materiais dessecantes se reduz com tempo; dessa forma, há necessidade de sua troca periódica. Outro fator limitante deste método é a possibilidade de o ar comprimido levar os materiais dessecantes para o interior do sistema, o que pode danificar os componentes devido aos efeitos corrosivos que o agente dessecante possui (BOSCH, 2008).

De acordo com Maldaner (2016) os secadores são dispositivos considerados de alto investimento para empresa, sendo o secador por refrigeração o mais usado na indústria. Eles podem representar o valor de 25% do custo total da instalação da rede pneumática, no entanto, o seu custo é compensado pelos diversos benefícios que eles trazem graças à redução dos danos causados pelo ar úmido. Na Figura 2.7, são apresentados os tipos de secagem em conjunto com seus métodos utilizados.

Figura 2.7 – Método de secagem de ar comprimido.



Fonte: Bosh (2008)

### 2.3.5 Filtros de ar

Para garantir a qualidade do ar, deve-se evitar a presença de partículas sólidas e líquidas com a utilização de filtros. O processo de filtragem é responsável por eliminar impurezas do ar e ainda auxiliar na remoção de água do sistema. Um modelo de filtro é apresentado na Figura 2.8

Figura 2.8 – Filtros de ar comprimido.



Fonte: MetalPlan (2016)

Segundo Bosch (2008), “a capacidade de separação do filtro é medida pela eficiência do filtro. Por isso, o filtro tem sempre que especificar o tamanho mínimo dos grãos/impurezas (em microns -  $\mu\text{m}$ ) que ele é capaz de eliminar”. Dessa forma, a capacidade de filtragem é indicada

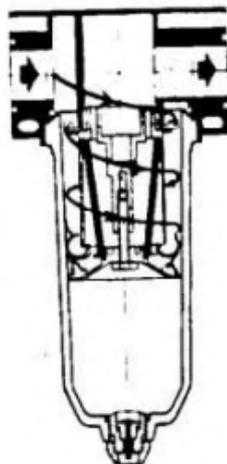
pela diferença de concentração de impurezas no ar antes e depois de passar pelo filtro. Para Parker (2001) filtro é definido como "um aparato para separar os contaminantes presentes em fluido. O filtro de ar comprimido aparece geralmente em três posições diferentes: antes e depois do secador de ar comprimido e também junto ao ponto de uso".

A filtragem é essencial antes do uso do secador para remover impurezas sólidas e líquidas que não foram totalmente eliminadas no resfriador. Isso ajuda a proteger o secador contra o excesso de óleo vindo do compressor, o que poderia prejudicar sua eficiência e causar problemas de impregnação no equipamento. Além disso, quando se utiliza um secador por adsorção, é importante garantir que não haja contaminação do material do secador, o que pode levar à obstrução de seus poros e prejudicar sua reativação. Por isso, a filtragem antes do secador deve ser cuidadosamente realizada para garantir um bom desempenho do equipamento (PARKER, 2001).

Outro ponto positivo no uso do filtro pré-secador, é que com sua ajuda na eliminação do condensado, ocorre também uma redução no consumo de energia do secador, pois este não precisa resfriar um condensado já eliminado do sistema (METALPLAN, 2017). A eliminação de impurezas sólidas contidas no ar no filtro pré-secador chega ao tamanho de até 3  $\mu\text{m}$ , enquanto óleo e água são eliminados apenas em quantidades reduzidas. Mesmo assim eles aliviam a carga dos filtros posteriores e dos secadores no caso de condições elevadas de impurezas (BOSCH, 2008). Além disso, é conveniente a instalação de outro filtro após o secador para eliminar a umidade residual e as partículas sólidas sobressalentes, principalmente para o caso de ser utilizado um secador por adsorção, pois seu processo de funcionamento libera partículas sólidas produzidas pela abrasão do material adsorvedor (PARKER, 2001).

Por fim, é de extrema importância o emprego do filtro nos pontos de uso, pois eles previnem que contaminantes oriundos da tubulação cheguem ao ponto da aplicação final. Para sistemas sem tratamento prévio os filtros instalados no ponto-de-uso são ainda mais recomendados (METALPLAN, 2017). O processo de filtragem em um filtro atua de duas formas: pela ação da força centrífuga (Figura 2.9) e pela passagem do ar através de um elemento filtrante, que pode ser de bronze sinterizado ou malha de náilon (PARKER, 2001). A filtração mais fina é realizada pelo elemento filtrante, o qual possui porosidade na ordem de 30 a 70  $\mu\text{m}$ , enquanto a eliminação pela ação da força centrífuga ocorre previamente pela rotação do ar gerando uma força centrífuga como mostrado na Figura 2.9 (SILVA, 2002).

Figura 2.9 – Ação centrífuga em um filtro.



Fonte: Escola Politécnica da USP (2016)

### 2.3.6 Reservatórios de ar

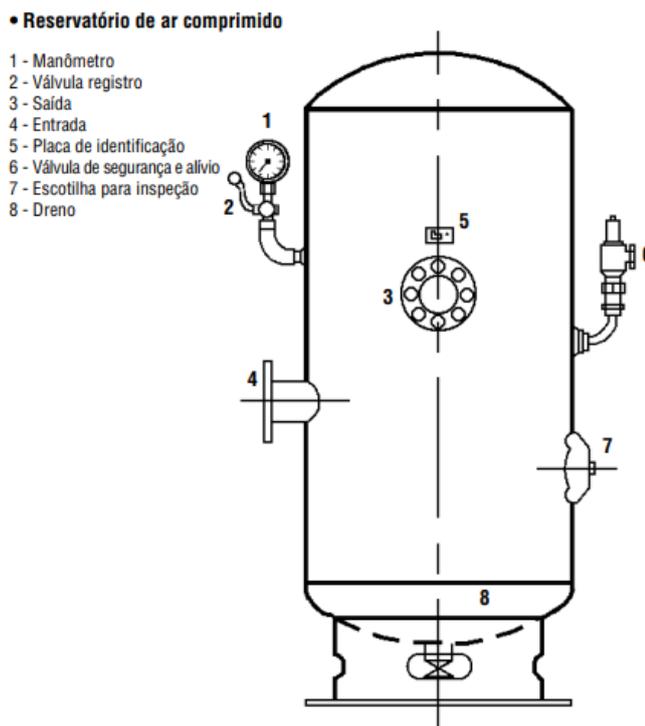
Após passar pelo processo de tratamento, o ar comprimido é direcionado para um reservatório (Figura 2.10), que tem como objetivo compensar picos de demanda, reduzir variações de pressão e arrefecer o ar, além de auxiliar na remoção de condensados. É importante que o reservatório tenha capacidade maior que a pressão máxima do sistema, considerando uma margem de segurança, e que possua dispositivos como purga, manômetro e uma válvula de segurança. (SILVA, 2020). Além disso, é recomendável que o reservatório seja instalado próximo ao ponto de uso para garantir uma distribuição eficiente do ar comprimido e evitar perdas de carga. Por fim, é importante realizar manutenções periódicas para garantir a integridade do reservatório e seus dispositivos. Dessa forma, é possível assegurar a qualidade do ar comprimido e o bom desempenho do sistema como um todo (SILVA, 2020).

A fabricação de reservatórios deve sempre seguir padrões designados por normas, sendo no Brasil eles devem possuir conformidade com a norma PNB 109 da ABNT, com base na qual Parker (2001) recomenda: "Nenhum reservatório deve operar com uma pressão acima da pressão máxima de trabalho permitida, exceto quando a válvula de segurança estiver dando vazão; nesta condição, a pressão não deve ser excedida em mais de 6% do seu valor".

Os reservatórios de ar comprimido são basicamente acumuladores de ar, eles garantem o consumo de ar por um tempo determinado, permitindo que os compressores funcionem em alívio ou sejam desligados, reduzindo assim o consumo de energia. Além disso, os reservatórios são fundamentais para garantir o funcionamento da rede em casos de alta demanda, o que

é comum em sistemas com compressores intermitentes (SGANZERLA, 2018). Para garantir a segurança, é importante que a pressão no reservatório esteja sempre com, no mínimo, 1 bar acima da pressão máxima produzida pelo compressor, e que a válvula de segurança esteja preparada para essa condição (BOSCH, 2008). Essa precaução evita possíveis explosões ou danos ao equipamento.

Figura 2.10 – Reservatório de ar comprimido.



Fonte:Parker (2001) Adaptado

Para Parker (2001), a instalação dos reservatórios deve ocorrer de maneira que seus drenos, conexões e aberturas de inspeção tenham fácil acesso, e de preferência em um local com sombra e fora da sala de compressores, o que facilita a remoção de condessados e óleos. Como o condensado segue a gravidade, geralmente ele consiste no ponto mais baixo dos reservatórios, pois isso deve haver um dreno em seu ponto mais baixo de forma a possibilitar a remoção de condensado acumulado, e ainda é ideal que a remoção seja feita a cada 8 horas de trabalho preferencialmente de forma automática (PARKER, 2001).

Para definir a capacidade de um reservatório, é necessário considerar a vazão e o tipo de compressor instalado. Em sistemas com compressores de pistão, o volume do reservatório é definido igual a 20% da vazão total do sistema ao longo de um minuto. Nos casos onde se utiliza compressores rotativos o dimensionamento este valor é reduzido para 10% (METALPLAN, 2017). Segundo Metalplan (2017), com o volume total de armazenamento de ar definido é reco-

mendável dividir este valor em dois reservatórios menores de mesma capacidade, instalando-os um após o compressor e o outro após o filtro.

Essa configuração de um reservatório com ar úmido e outro com ar puro e seco traz um ajuste perfeito para alívio de carga aos compressores, garante uma proteção aos seus rolamentos e os resguarda contra possíveis vazamentos de óleo do compressor. A utilização de um segundo reservatório é fundamental para garantir a proteção aos equipamentos de tratamento de ar contra picos e pulsações que viriam de um único reservatório (METALPLAN, 2017).

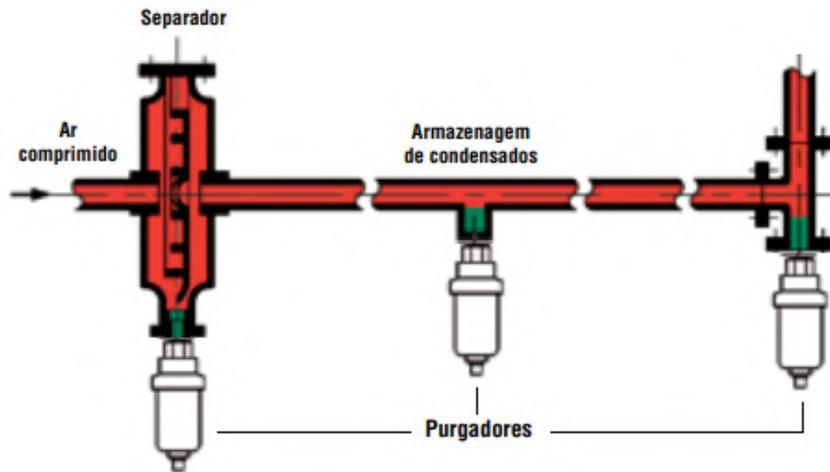
### **2.3.7 Purgadores**

No sistema pneumático, é comum ocorrer variações de temperatura ao longo da tubulação, devido à grande área de ocupação e às variações da temperatura ambiente. Essas variações podem ocorrer de forma diferente e variável ao longo do ano, dependendo das estações do ano (FIALHO, 2004). A presença de condensado é um problema que surge em decorrência da variação de temperatura ao longo da tubulação. Para evitar danos, é recomendável a utilização de purgadores no final das linhas verticais e próximos aos pontos de consumo, para recolher o condensado. (FIALHO, 2004).

Segundo Metalplan (2017), os purgadores são itens destinados a realizar a drenagem dos líquidos condensados do sistema pneumático, eles podem ser acionados de forma manual ou automática por acionamento elétrico ou mecânico. Em relação aos purgadores eletrônicos, eles podem ser utilizados aliados a um temporizador digital ou a um sensor de umidade. Mesmo com todo o tratamento realizado no ar comprimido, ainda existe a necessidade de utilizar purgadores nas linhas pneumáticas, pois segundo Fialho (2004), “o ar que fica retido nas tubulações sofre, em parte, em função de diferenças de temperatura e pressão, principalmente durante os meses de inverno, pequena condensação, devendo assim ser eliminada pelos purgadores.”

A fim de auxiliar a drenagem do condensado, é interessante a construção de bolsões que retêm o condensado e o enviam para o purgador próximo. E no caso da rede ser relativamente grande, é recomendado a instalação de mais purgadores, intercalando-os de 20 a 30 metros de distância entre eles (PARKER, 2001). Algumas sugestões de localização dos purgadores são apresentadas por Parker (2001) na Figura 2.11, onde as localizações mais indicadas são no secador, nos bolsões para armazenagem de condensados e onde há uma elevação de tubulação.

Figura 2.11 – Prevenção e drenagem para o condensado.

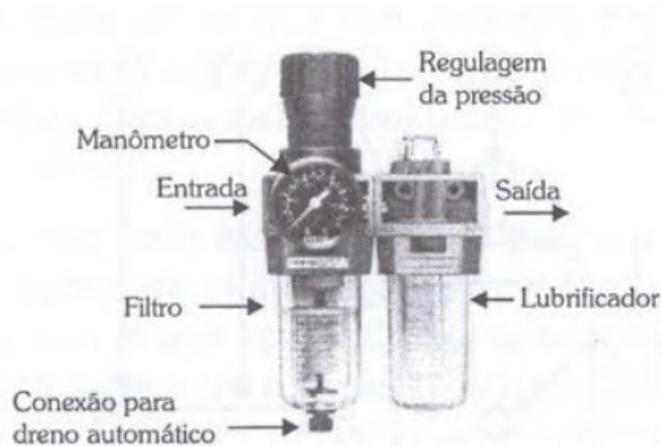


Fonte:Parker (2001) Adaptado

### 2.3.8 Unidade de condicionamento (Lubrefil)

Segundo Parker (2001), “após passar por todo o processo de produção, tratamento e distribuição, o ar comprimido deve sofrer um último condicionamento, antes de ser colocado para trabalhar, a fim de produzir melhores desempenhos”. Esse último tratamento é realizado pelo lubrefil, cujo objetivo é realizar ajustes nas características do ar de forma adequada a cada máquina pneumática posterior a ele. O lubrefil (Figura 2.12) tem por função realizar uma última filtragem e ainda lubrificar o ar; dessa forma sua utilização garante uma ótima qualidade ao ar comprimido. Este dispositivo também conta com um regulador de pressão e um manômetro, possibilitando assim o controle sobre a pressão de saída (FIALHO, 2004).

Figura 2.12 – Unidade de condicionamento (Lubrefil)



Fonte:Fialho (2004)

A introdução de uma pequena quantidade de óleo auxilia na lubrificação de partes mecânicas dos componentes pneumáticos, o que garante um ganho de vida útil nos itens da rede (PARKER, 2001). Além disso, cada equipamento possui sua pressão de trabalho e é recomendável que seja sempre um valor abaixo da pressão de regime da rede, pois o uso de uma pressão próxima à de regime apresenta oscilação por causa das variações de temperatura da rede e diferentes vazões as quais a rede pode ser submetida. Assim, o uso de uma pressão menor garante uma alimentação com pressão estável já que a pressão de regime geralmente apresenta flutuações. Essa redução de pressão é realizada pela válvula redutora presente no lubrefil (FIALHO, 2004).

A instalação do lubrefil é recomendada sempre nas linhas destinadas à alimentação de cada equipamento, e também é recomendável que ela seja acompanhada de um registro que possibilite o isolamento da linha, facilitando assim a realização da troca do elemento filtrante. Além disso, o lubrefil deve ser munido de um dreno para a remoção do condensado contido nele sem necessitar o desligamento de toda a linha (FIALHO, 2004).

## **2.4 Dimensionamento da rede pneumática**

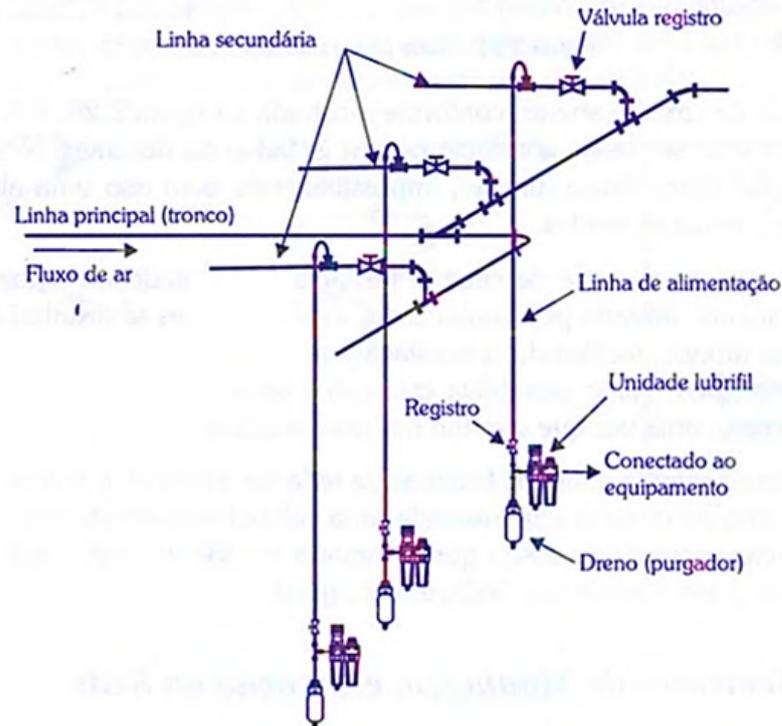
### **2.4.1 *Layout* da rede**

Após o processo de produção e tratamento do ar comprimido, ele ainda precisa ser distribuído até os consumidores finais. O sistema de distribuição deve ser projetado visando à menor queda de pressão possível e ainda facilitar a remoção de condensado (PRUDENTE, 2013). Segundo (PARKER, 2001), “a rede de distribuição de ar comprimido compreende todas as tubulações que saem do reservatório, passando pelo secador e que, unidas, orientam o ar comprimido até os pontos individuais de utilização”. A função básica da rede de distribuição é interligar a fonte de produção com os equipamentos consumidores do ar comprimido, e devido ao seu volume considerável, ela também funciona como um reservatório para demandas próximas (PARKER, 2001).

Na Figura 2.13, são apresentados os componentes da rede pneumática, a qual é composta por linhas principais, secundárias e de alimentação. Na linha principal são conectadas as linhas secundárias, que por sua vez, através de sua parte superior são conectadas às linhas de alimentação onde se encontra o lubrefil na outra extremidade. A conexão das linhas de alimen-

tação com a linha secundária é realizada pela parte superior a fim de evitar que o condensado chegue até o ponto de alimentação, visto que a água condensada fica precipitada na parte baixa da tubulação graças à gravidade (FIALHO, 2004).

Figura 2.13 – Elementos componentes de uma rede pneumática.



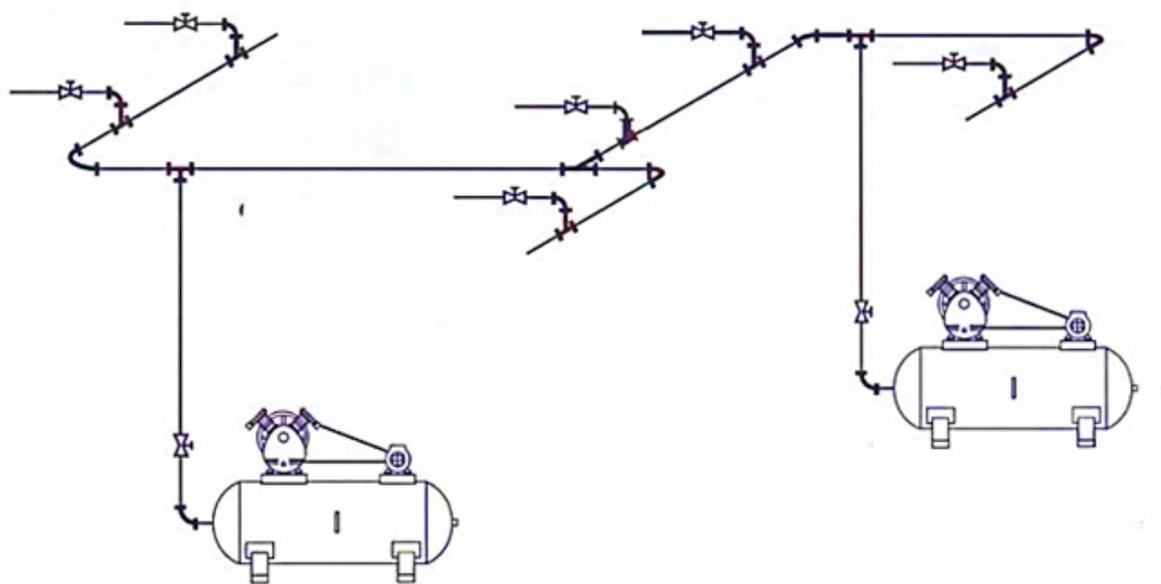
Fonte: Fialho (2004)

Para o devido dimensionamento, primeiramente é necessário definir quais serão os pontos da área de trabalho por onde a rede pneumática deverá passar e quantos pontos de alimentação deverão existir. Assim, deve-se definir se a rede será uma configuração de circuito fechado ou de circuito aberto e escolher de maneira a se obter maior eficiência em sua distribuição (FIALHO, 2004). A rede de circuito aberto (Figura 2.14) possui a característica do ar fluir em uma única direção, o que inviabiliza uma alimentação uniforme em todos os pontos de consumo. Assim esta configuração é mais utilizada quando se deseja abastecer locais isolados ou distantes (FIALHO, 2004). Um ponto positivo desta configuração é que ela possibilita uma alimentação direta ao ponto de alimentação, o que permite que a distribuição ocorra no menor tempo possível, propiciando uma menor queda de pressão. Além disso, também há uma redução nos custos do sistema, pois há uma menor necessidade de tubos (SILVA, 2020).

Outra configuração possível é a rede de circuito fechado (Figura 2.15), sendo ela a mais utilizada pela maioria das indústrias. Nesta configuração o ar flui nos dois sentidos, o que

garante uma alimentação uniforme ao longo de toda a rede (SILVA, 2020). Já para Fialho (2004), esta configuração é vantajosa, pois ela se distribui ao longo de toda a extensão do local, o que facilita a instalação de novos locais de consumos que viriam a surgir, além de ainda possibilitar a uniformidade na pressão de alimentação de todos os pontos ao longo da rede. Esta configuração apresenta as melhores características para uso industrial, no entanto ela também é a mais cara, principalmente se houver redes transversais (Figura 2.16) ao longo do anel. Além disso, a separação do condensado é dificultada, já que o fluxo circula em duas direções dependendo do local de consumo (PARKER, 2001).

Figura 2.14 – Rede de circuito aberto.



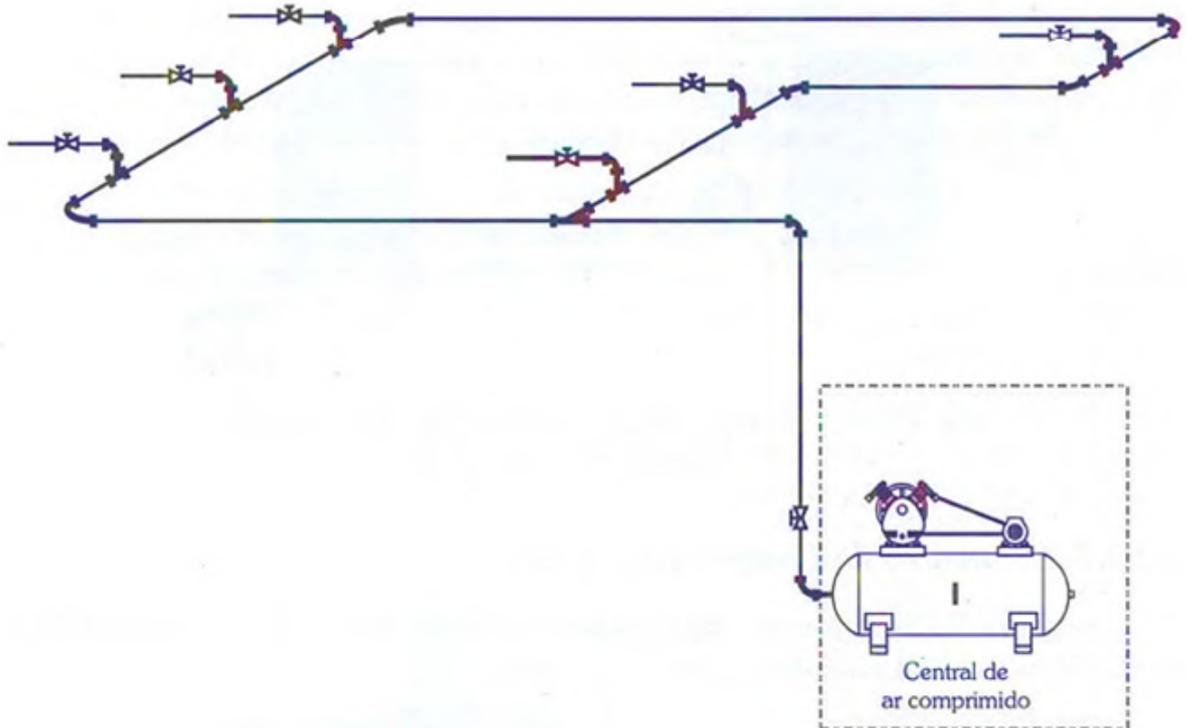
Fonte:Fialho (2004)

A configuração deve ser escolhida de forma a considerar as necessidades da rede e facilitar as manutenções futuras, com a possibilidade de isolar regiões com a instalação de registros para que não haja a necessidade de um desligamento geral, e ainda possuir o menor percurso com poucos pontos de estrangulamento (FIALHO, 2004). Para Parker (2001), as válvulas de fechamento na linha de distribuição pois são de grande importância, principalmente nas grandes redes, são elas que permitem que outras áreas não sejam atingidas simultaneamente quando isolamentos das regiões forem necessários, como nos casos de manutenções ou realização de modificações.

Outro fator de importância são as curvaturas presentes na linha (Figura 2.17), as quais devem ser realizadas com o maior raio possível, visando evitar grandes perdas por turbulências.

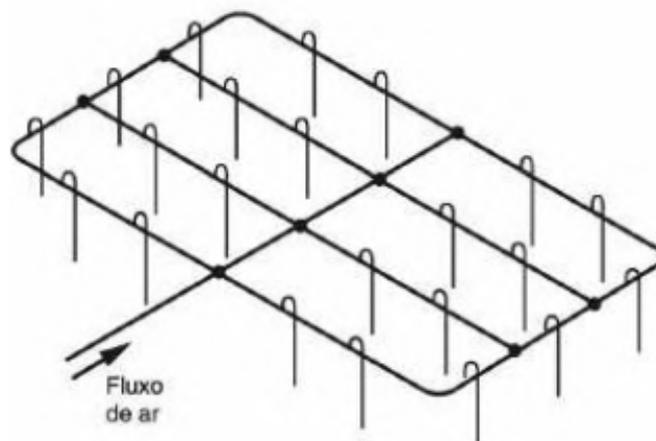
O ideal é que a curvatura possua um raio mínimo de duas vezes o diâmetro externo da tubulação (PARKER, 2001).

Figura 2.15 – Rede de circuito fechado.



Fonte: Fialho (2004)

Figura 2.16 – Rede de distribuição com tubulações derivadas das transversais.

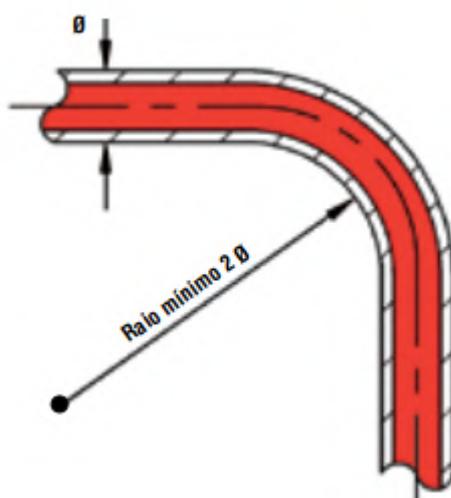


Fonte: Prudente (2015)

Por fim, Parker (2001) ainda recomenda que a rede tenha uma inclinação de 0,5 a 2% do comprimento linear da tubulação no sentido do fluxo, a qual favorece o recolhimento de condensado e das impurezas presente na rede. Além disso, deve-se prever uma identificação

na tubulação pneumática, para a qual Fialho (2004) diz que: “em conformidade com o boletim NB-54/80 da ABNT, toda a rede pneumática deve ser pintada em azul, sendo em tonalidade de acordo com a classificação 2.5PB 4/10 do sistema Munsell.”

Figura 2.17 – Curvatura recomendada da rede pneumática.



Fonte: Parker (2001)

#### 2.4.2 Fugas e perdas de carga

As fugas de ar comprimido são responsáveis por perdas significativas na rede, podendo alcançar valores em torno de 10 a 15% do consumo total, e em casos mais extremos, até 25 a 40%. Embora não representem um risco para a segurança, essas fugas aumentam consideravelmente os custos, já que a produção e tratamento do ar respondem por cerca de 80% do custo total da rede. Estes valores são apresentados na Figura 2.18 (SILVA, 2020).

Para Bosch (2008), pode-se estimar a perda no sistema de redes novas em um valor de 5% do volume total de ar fornecimento, enquanto nas redes antigas este valor pode chegar até 25%. Sendo assim, as perdas da rede aumentam com o tempo de vida das instalações, aumentando a necessidade de manutenção à medida que elas envelhecem.

Parker (2001) diz que, a fuga do ar comprimido ocorre através de pequenos furos, acoplamentos com folgas, vedações defeituosas e outras formas de vazamento, as quais, quando somadas, resultam em um valor elevado de vazamento total da rede. Parker (2001) ainda apresenta uma relação de perda de potência na pressão de regime de 6 bar por diâmetro de cada furo na Figura 2.19.

Figura 2.18 – Custos associados ao ar comprimido.



Fonte:Silva (2020)

Figura 2.19 – Vazamento e perda de potência em furos.

Tamanho real	Diâmetro do furo		Escape do ar em			Potência necessária para compressão	
			588,36 kPa	6 bar	85 psi		
	mm	pol	m <sup>3</sup> /s	l/s	c.f.m	Cv	kW
•	1	3/64	0,001	1	2	0,4	0,3
●	3	1/8	0,01	10	21	4,2	3,1
●	5	3/16	0,027	27	57	11,2	8,3
●	10	3/8	0,105	105	220	44	33

Fonte:Parker (2001)

Mesmo pequenos vazamentos que parecem insignificantes podem causar perdas expressivas de pressão quando somados, o que pode levar a uma redução significativa na eficiência do sistema pneumático (MALDANER, 2016). Por esse motivo, é recomendável implementar um programa periódico de verificação e mitigação de fugas em toda a rede. Além disso, os operadores devem ser instruídos a informar os responsáveis quando detectarem fugas no sistema (SILVA, 2020).

Parker (2001) apresenta alguns métodos de manutenção para prevenção de fugas, tais como: substituição de juntas de vedação defeituosas, engates, mangueiras, tubos e válvulas, aperto das conexões, restauração das vedações nas uniões roscadas; eliminação dos ramais de distribuição fora de uso, entre outras técnicas que possam ser necessárias. Devido à quantidade de formas pelas quais o ar pode escapar do sistema, é impossível eliminar todos os vazamentos

na rede. No entanto, é possível reduzir essas perdas por meio da adoção de práticas periódicas de manutenção, realizadas pelo menos de 3 a 5 vezes por ano (PARKER, 2001). Silva (2020) também diz que: “as fugas ocorrem em qualquer parte do sistema, contudo existem zonas problemáticas para o seu aparecimento, nomeadamente ligações, vedantes, válvulas, ligações rápidas, acessórios e terminais”, sendo estas as zonas de maior importância nas verificações da rede. Já Bollmann (1997) relata que “os custos de compressão do ar são altos devido ao baixo rendimento global dos compressores, causado pela limitação do seu rendimento termodinâmico e pelas suas significativas perdas volumétricas, além do atrito mecânico”.

A detecção de fugas nas redes ainda ocorre de forma bastante primitiva; nos locais com alto ruído ou de difícil acesso ela ocorre basicamente com a detecção de sons sibilantes, sendo eles dificilmente audíveis no ambiente industrial. Outro método utilizado é através de espuma de sabão, onde ela é pulverizada sobre uma área suspeita e caso houver o surgimento de bolhas o vazamento é confirmado (SILVA, 2020).

Além disso, também deve-se considerar as perdas de cargas existentes na rede. Elas são causadas pelos possíveis estrangulamentos existentes e também em função do atrito interno, por isso, ao longo do sistema pneumático existe uma gradual redução de pressão (FIALHO, 2004). Segundo Prudente (2013), “a queda de pressão ocorre devido em parte à viscosidade do fluido, ao atrito nas paredes da tubulação pneumática e à mudança rápida de direção do fluido devido aos pontos de estrangulamento.”

Os pontos de estrangulamentos são chamados de singularidades e alguns de seus exemplos são as curvas, os registros, os têes e outros, cujas presenças garantem a distribuição de ar comprimido da melhor forma. As singularidades devem ser convertidas em um comprimento equivalente com a utilização de tabelas para encontrar a perda de carga total do circuito pneumático (FIALHO, 2004). Na Figura 2.20 é representada a equivalência em metros das singularidades presentes na rede.

De acordo com Fialho (2004), para uma condição satisfatória de desempenho do sistema pneumático, a queda não deve ser superior a 0,3 kgf/cm<sup>2</sup> (0,294 bar) e em redes de grande porte este valor pode ser de no máximo até 0,5 kgf/cm<sup>2</sup> (0,49 bar). Já para Prudente (2013), uma instalação dimensionada de forma correta possui uma queda de pressão até o ponto de utilização entre 0,1 a 0,3 bar, sendo a queda máxima admissível de aproximadamente 5% da pressão de regime. Além disso, Prudente (2013) também diz que a velocidade do ar comprimido internamente deve ser inferior a 10 m/s. Já Silva (2020) diz que “as perdas de carga são consequência

direta do aumento de velocidade do fluido no interior da tubagem (...) e devem ser tidas em consideração porque, para além de terem um custo significativo, estão presentes durante todo o ciclo de vida da instalação”.

Figura 2.20 – Comprimento de tubo equivalente à perda de carga por singularidades.

Válvulas		Comprimento equivalente das singularidades (metros)						
		Diâmetro interno tubos (mm)						
		25	40	50	80	100	125	150
Válvula gaveta		3-6	5-10	7-15	10-25	15-30	20-50	25-60
Válvula de membrana		1,2	2,0	3,0	4,5	6	8	10
Válvula angular		0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5
Cotovelo 90°		1,5	2,5	3,5	5	7	10	15
Cotovelo R=d		0,3	0,5	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5
Cotovelo R=2d		0,15	0,25	0,3	0,5	0,8	1,0	1,5
Derivação a T		2	3	4	7	10	15	20
Redução		0,5	0,7	1,0	2,0	2,5	3,5	4,0

Fonte:Prudente (2013)

Por isso, é fundamental que as redes de ar comprimido sejam dimensionadas de forma correta, pois dessa forma garante-se uma queda de pressão reduzida, bem como uma minimização nas fugas da rede. Com isso, haverá uma maior economia de energia, já que evitar-se-á que o compressor produza mais ar para suprir as perdas e ainda entregará a pressão mínima necessária aos consumidores finais (SILVA, 2020). Bollmann (1997) diz que existem duas maneiras de determinar o valor de vazamento perdido pela tubulação, sendo uma delas por queda de pressão, onde se isola a rede ou parte dela, e então se mede a queda de pressão em um intervalo de tempo.

A Equação (2.1) é apresentada por Bollmann (1997) para obtenção do nível de vazamento, sendo ela aplicada com base na queda de pressão da rede.

$$Q_{VN} = \frac{V(P_1 - P_2)}{(t \cdot P_0)} \cdot \frac{T_0}{T_a} \quad (2.1)$$

Onde  $Q_{VN}$  é o vazamento de ar nas condições de acordo com a ISO 6358 em  $m^3/min$ ,  $P_1$  e  $P_2$  são os valores de pressão medidas no início e no fim do intervalo em bar,  $P_0$  é a pressão atmosférica em bar,  $V$  é o volume de ar comprimido em  $m^3$ ,  $T_0$  é a temperatura absoluta da condição técnica normal com valor constante de 293 K e  $T_a$  é a temperatura absoluta do meio ambiente em K.

Além disso, outra maneira de se determinar o nível de vazamento da rede, é através do método de tempos de ligação dos compressores, onde por meio de cálculos utilizando o tempo que o compressor fica ligado e desligado, é possível se obter um valor de vazamento através da fração da capacidade do compressor (Bollmann, 1997).

### 2.4.3 Material

A escolha do material para a tubulação da rede pneumática deve ser realizada considerando as condições nas quais a rede se encontra, dando preferência a materiais resistentes a oxidação, já que a possibilidade de presença de condensado internamente é grande (PARKER, 2001). O material da rede pode ser o aço carbono, aço inoxidável ou alumínio, variando a melhor escolha conforme a temperatura ambiente e as especificações de qualidade do ar exigidas (SILVA, 2020).

O aço carbono é mais utilizado quando a exigência de qualidade do ar não é tão rigorosa. Este é geralmente utilizado em indústrias pesadas, enquanto os aços inoxidáveis são utilizados quando a exigência de qualidade é maior, geralmente em indústrias farmacêuticas, alimentícias e eletrônicas (SILVA, 2020). Outra opção de material para a tubulação é o alumínio, o qual é utilizado principalmente em instalações industriais, pois ele permite maior rapidez e simplicidade com sua aplicação (SILVA, 2020).

Segundo Telles (2001), nas aplicações mais antigas o uso de aço carbono e aço galvanizado nas tubulações de ar comprimido eram mais comuns, mas hoje eles têm sido substituídos pelo uso de materiais plásticos devido ao seu baixo custo. Os materiais plásticos são mais leves possuem alta resistência a corrosão, além de serem de fácil manuseio de montagem. Contudo eles não resistem tão bem ao calor, tem baixa resistência mecânica, e ainda coeficiente de di-

latação térmica elevado, por isso a escolha de sua aplicação deve ser considerada conforme as condições de uso (TELLES, 2001).

Para Bosch (2008), os materiais das tubulações com o uso de aço podem ser feitos com aço perfilado, aço sem costura e aço inoxidável, onde o aço inoxidável é o que apresenta a melhor entrega de qualidade e ainda tem a maior capacidade de operação com pressão, chegando a até 80 bar e temperatura máxima de trabalho de 120°C. Por outro lado, o aço perfilado é o mais barato e com rápida instalação, mas suas juntas podem apresentar vazamentos ao longo do tempo, necessitando uma maior manutenção, e precisam ser galvanizados para aplicações sem secador, já que são sensíveis à corrosão. Sua capacidade de operação pode ser de 10 a 80 bar e eles também possuem temperatura máxima de trabalho de 120°C (BOSCH, 2008).

O aço sem costura também apresenta a característica de ser mais barato, mas sua aplicação exige maior experiência, pois eles precisam ser soldados ou colados, por isso seu vazamento é minimizado. Eles possuem a pressão de operação de 12,5 a 25 bar e temperatura máxima de 120°C, além disso, tem baixa resistência à corrosão, necessitando o uso de secador caso não sejam galvanizados (BOSCH, 2008). Já para as tubulações secundárias Parker (2001), recomenda a utilização de tubos sintéticos como tubos de polietileno, náilon e poliuretano, já que estes apresentam uma maior flexibilidade em conjunto com sua alta resistência mecânica.

#### **2.4.4 Diâmetro da tubulação**

Um sistema pneumático dimensionado corretamente garante uma melhor eficiência e propicia uma maior confiabilidade à rede. Esses fatores garantem que as necessidades sejam atendidas da melhor forma e ainda com uma redução no consumo de energia (SGANZERLA, 2018). Além disso, o projeto bem realizado garante diversos benefícios na qualidade do fornecimento de ar comprimido tais como: baixa queda de pressão, menor número de vazamentos na rede e maior facilidade na realização de manutenções à rede (METALPLAN, 2017).

Segundo Prudente (2013) “por dimensionamento de uma tubulação geralmente se entende o cálculo do diâmetro da tubulação, linha tronco (principal), mais as derivações necessárias para alimentar os vários pontos no interior de uma fábrica”. Por isso, é preciso estimar o consumo de ar comprimido da rede na realização do dimensionamento e considerar que haverá um aumento gradativo ao longo dos anos. Dessa forma, é recomendável que se tenha um fator de correção nos cálculos, caso contrário, ao haver necessidades futuras certamente as despesas

serão maiores (BOSCH, 2008). Para Silva (2020), o crescimento da demanda é proveniente de um aumento na produção que é acompanhada de alterações do *layout* não previstos na elaboração do projeto. Assim, ao elaborar o dimensionamento é importante considerar expansões futuras, de forma a facilitar os pontos de expansão mantendo uma facilidade de manutenção.

Os parâmetros necessários para a realização do cálculo do diâmetro da tubulação são: o comprimento total da rede, a vazão do sistema, perdas admissíveis, pressão de regime e os pontos de estrangulamento (PRUDENTE, 2013). A vazão do sistema é a quantidade de ar em  $m^3$  por hora que é consumida pela rede considerando a situação de vazão máxima da rede, e considerando expansões futuras, sendo o valor obtido multiplicado pelo fator de ampliação (FIALHO, 2004). O cálculo da vazão total é apresentado por Silva (2020), e é obtido somando todas as vazões parciais de cada dispositivo da rede, sendo calculado através da Equação (2.2).

$$Q = \sum Q_p [m^3/h] \quad (2.2)$$

A pressão de regime é definida como a pressão efetivamente entregue pelo compressor e se distribui ao longo de toda a linha, sendo então a pressão no reservatório da rede (FIALHO, 2004). O comprimento total é obtido pela soma de todo o comprimento retilíneo da tubulação e do comprimento equivalente das singularidades presentes na rede conforme a tabela apresentada na Figura 20 (SILVA, 2020). Assim, o comprimento total para o cálculo do diâmetro da tubulação é definido através da Equação (2.3).

$$L_T = L_R + L_S [m] \quad (2.3)$$

Por fim, deve-se estabelecer uma queda de pressão máxima admissível para a rede, sendo os valores ideais entre  $0,3 \text{ kgf/cm}^2$  ( $0,294 \text{ bar}$ ) a  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$  ( $0,49 \text{ bar}$ ) de queda no reservatório, enquanto para pontos a partir de  $500 \text{ m}$  de distância, deve-se adotar o valor de  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$  (FIALHO, 2004). Para uma condição satisfatória de desempenho da rede, Fialho (2004) recomenda que os valores de queda não exceda  $0,3 \text{ kgf/cm}^2$ , a não ser em grandes redes, onde este valor pode chegar ao máximo de  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ .

Com todos os parâmetros obtidos é possível então definir o diâmetro interno mínimo necessário que atenda da melhor forma a demanda da rede considerando expansões futuras (FIALHO, 2004). Tal cálculo é dado pela Equação (2.4).

$$d = 10. \left[ \sqrt[5]{\frac{1,663784.10^{-3}.Q^{1,85}.L_t}{\Delta P.P}} \right] \quad (2.4)$$

Na Equação (2.4) onde  $L_t$  é comprimento total em metros,  $\Delta P$  representa a queda de pressão admissível em  $\text{kgf/cm}^2$ ,  $P$  é a pressão de regime da rede em  $\text{kgf/cm}^2$  e  $Q$  é a vazão em  $\text{m}^3/\text{h}$ . O resultado é obtido em mm (FIALHO, 2004).

A eficiência do sistema de ar comprimido depende de vários fatores além dos cálculos de dimensionamento, por isso é de extrema importância que além da adequada realização deste último, sejam realizadas práticas como: uma seleção adequada do compressor, uma apropriada localização da central de compressores, um controle de qualidade do ar comprimido, um controle na minimização de perdas e fugas, uma periodicidade nas manutenções à rede e principalmente a sensibilização coletiva de boas práticas quanto ao uso do ar comprimido (SILVA, 2020).

### **3 METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Metodologia**

O presente estudo tem como finalidade realizar uma pesquisa aplicada, na medida em que utiliza conhecimento da pesquisa fundamental para resolver seus problemas. Quanto ao objetivo, sua classificação é descritiva, pois através dela busca-se um melhor tratamento dos objetivos e uma maior apreciação da pesquisa, além disso, a pesquisa demandou técnicas padronizadas de coleta de dados. A abordagem para a análise dos dados obtidos no desenvolver do trabalho foi pelo método quali-quantitativo, pois conta com análises matemáticas para determinadas averiguações e também conta com o senso crítico do autor na definição e verificação da viabilidade de aplicação dentro do ambiente de estudo. Quanto ao método para chegar à conclusão do trabalho, definiu-se o método hipotético dedutivo, estabelecendo hipóteses previamente, e então, analisando-as na prática para fins de validação. Por fim, seu procedimento foi um estudo de caso, onde foi feita uma análise de um sistema em que poderá ser expandido futuramente, e também teve como necessidade uma pesquisa bibliográfica, já que foram utilizados materiais já previamente publicados como livros, monografias e outras fontes como base para o presente trabalho.

#### **3.2 Materiais**

Para a realização da pesquisa foi necessário uma unidade de aquisição de dados. O dispositivo utilizado para esta função foi o sistema de aquisição de dados no modelo MW100 da fabricante Yokogawa semelhante ao da Figura 3.1.

O dispositivo fornece uma taxa de aquisição de 100 Hz, gerando assim 1 dado a cada 10 ms, o que o torna uma ótima plataforma de aquisição e registro de dados de forma escalável e com alto desempenho. Além disso, o dispositivo oferece operação autônoma, em rede ou com o uso de um computador (YOKOGAWA, 2017).

Para a aquisição dos dados foi necessário a utilização de um transdutor de pressão (Figura 3.2), cujo funcionamento consiste na transformação de uma variável física, que é a pressão, em um sinal elétrico que pode ser tanto em corrente quanto em tensão. O dispositivo utilizado para esta função foi o transdutor modelo TKC1EB02D da Gefran com faixa de medição de 0 a

20 bar, sinal de saída de 0 a 10 V, classe de precisão de 0,6% e tensão de alimentação de 15 a 30Vcc (GEFRAN, 2008).

Figura 3.1 – Sistema de aquisição de dados Yokogawa MW100.



Fonte:Yokogawa (2017)

Figura 3.2 – Transdutor de pressão.



Fonte:Gefran (2008)

Para a alimentação do transdutor de pressão e do sistema de aquisição de dados (Figura 3.3), foi utilizado uma fonte de alimentação ajustável, a qual é um instrumento que realiza o ajuste tanto da tensão quanto da corrente de saída de forma controlada, possibilitando assim a alimentação da forma mais adequada aos itens (JBM INSTRUMENTOS, 2020).

Para o monitoramento da rede, utilizou-se um controlador PID 600 (Figura 3.10) fabricado pela GEFTRAN com a opção de uso de alarmes e funções configuráveis, conectado a um

transdutor de pressão semelhante ao já citado anteriormente e a um LED, onde o transdutor se encontrava conectado à rede pneumática.

Figura 3.3 – Fonte de alimentação.



Fonte:Hikari (2013)

Figura 3.4 – Controlador PID.



Fonte:Gefran (2008)

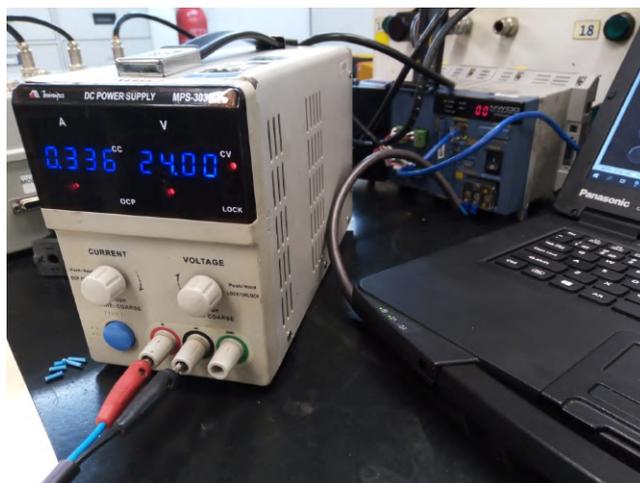
Para a análise e tratamento dos dados foi utilizado o aplicativo Excel do Microsoft Office 365. Os dados gerados pelo sistema de aquisição da Yokogawa podem ser extraídos para Excel, dessa forma seu tratamento neste ambiente foi facilitado. Além disso também se utilizou o aplicativo Excel para a realização de todos os cálculos efetuados ao longo da elaboração do estudo.

Por fim, se utilizou o *software* Inventor Professional disponibilizado para estudantes, sendo uma ótima ferramenta para projetos de engenharia com CAD 3D, auxiliando assim a realização do desenho do sistema pneumático e do laboratório. O desenho permite uma melhor visualização da rede pneumática contribuindo para uma melhor elaboração do projeto.

### 3.3 Métodos

Inicialmente, a fonte de alimentação (Figura 3.5) foi utilizada para converter a corrente alternada (AC - *Alternating Current*), proveniente da rede elétrica, em corrente contínua (DC - *Direct Current*), a fim de fornecer energia elétrica adequada ao transdutor de pressão e ao sistema de aquisição de dados. O transdutor de pressão necessitava de uma tensão de alimentação entre 15 e 30 Vcc, enquanto o sistema de aquisição de dados solicitava uma tensão entre 12 e 28 Vcc. Por isso, a fonte de alimentação foi regulada para uma tensão de 24 Vcc, que foi suficiente para o funcionamento adequado de ambos os dispositivos. Em seguida, o transdutor de pressão foi conectado à rede pneumática por meio de um engate rápido fêmea localizado na tubulação pneumática, após ser rosqueado a um pino de engate rápido macho, essa configuração de montagem é apresentada na Figura 3.6.

Figura 3.5 – Utilização da fonte.

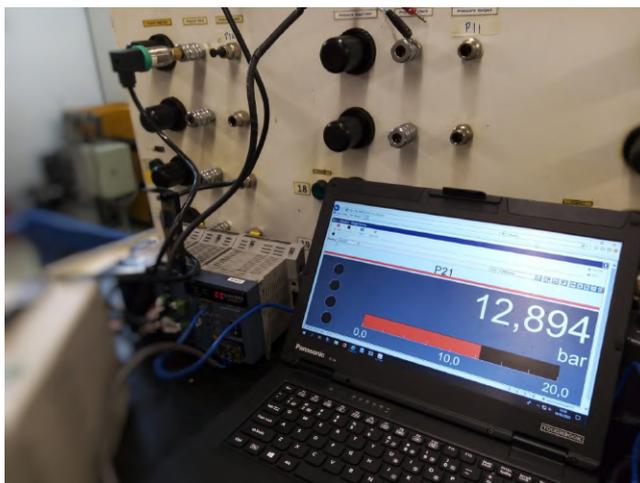


Fonte: Autor (2023)

Após conectar o transdutor ao sistema pneumático, foi ligado ao sistema de aquisição de dados para monitorar a rede. Para medir vazamentos, foi necessário interromper temporariamente a alimentação de cada bancada e adquirir dados de variação de pressão durante 5 minutos. Além disso, os pontos de medição precisaram ser isolados do restante do sistema

pneumático para facilitar a localização dos vazamentos e permitir o funcionamento das outras bancadas durante as medições. Como uma das bancadas não tinha uma válvula de isolamento, foi instalada uma válvula globo em um ponto da tubulação para possibilitar o seu isolamento sem interromper o fluxo nas demais bancadas. Essa instalação também permitiu a desenergização da bancada sem interromper o fluxo de ar no restante do laboratório, facilitando futuras manutenções. O ponto de instalação da válvula é representada na Figura 3.7 e na Figura 3.8.

Figura 3.6 – Configuração para leitura de pressão da bancada.



Fonte:Autor (2023)

A partir dos dados de pressão obtidos aplicou-os na Equação (2.1) e estimou-se então o vazamento total de cada bancada e a somatória destes valores foi usada para estimação do vazamento total da rede. Para o desenho do *layout* atual, realizou-se a medição do laboratório e das tubulações já existentes, e então definiram-se os pontos primordiais de alimentação a serem mantidos de forma que o novo *layout* passasse por estes pontos. Além disso, consultou-se o engenheiro responsável pelo laboratório de testes sobre a queda de pressão admissível para os testes de acordo com o qual obteve-se o valor de queda de pressão admissível de 0,2 bar utilizada no cálculo do diâmetro. Assim o diâmetro foi calculado com os valores obtidos e aplicados na Equação (2.4).

No que diz respeito ao controlador, ele fazia parte de um sistema de monitoramento de pressão do laboratório, porém, se encontrava danificado. Logo foi necessária a troca do controlador para sua reativação. Ele é ligado a um transdutor de pressão e a um LED em sua saída relé; assim, quando a leitura do transdutor aciona o alarme estabelecido, o relé alimenta um LED e sinaliza que houve uma queda de pressão. Seu circuito é apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.7 – Tubulação antes da instalação da válvula.



Fonte:Autor (2023)

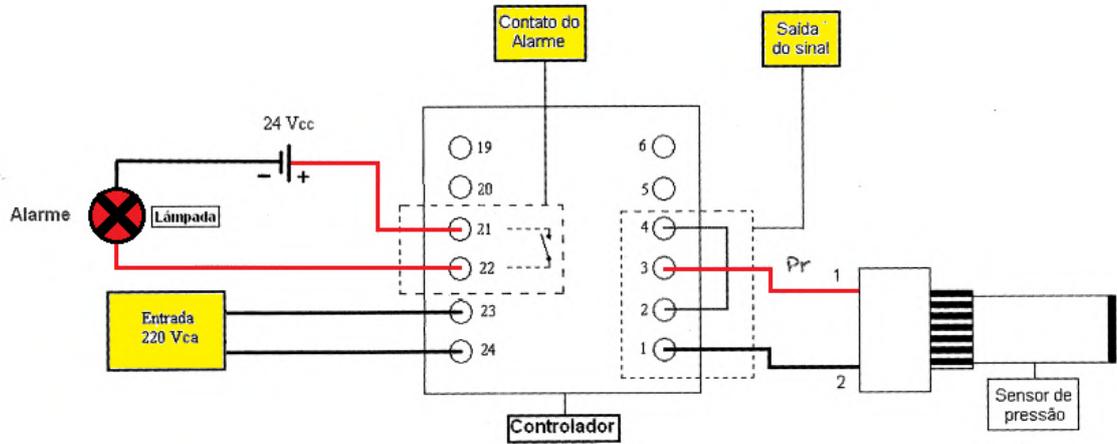
Figura 3.8 – Tubulação após a instalação da válvula.



Fonte:Autor (2023)

Assim, monitorou-se a queda de pressão da rede durante os testes de ciclagem, e verificou se ela era maior que o valor permitido.

Figura 3.9 – Circuito controlador.



Fonte:Autor (2023)

Figura 3.10 – Controlador instalado à rede.



Fonte:Autor (2023)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Cálculo do vazamento do laboratório

Inicialmente realizou-se uma avaliação do nível de vazamento do laboratório em sua condição atual, sendo, para isso necessário a obtenção da quantidade de ar comprimido em  $m^3$  que escapava da rede por minuto. Como se tratava de uma rede com muitas ramificações em circuito aberto, o cálculo de vazamento foi realizado de forma individual por bancada, e o vazamento total do laboratório foi definido como sendo o somatório de todos os vazamentos encontrados na rede.

Para o cálculo de vazamento de ar comprimido do laboratório, utilizou-se a Equação (2.1) com base na qual se realizou um monitoramento de pressão de forma individual; assim, cada bancada teve sua pressão monitorada por 5 minutos. Nesta ocasião, a bancada se encontrava pressurizada com a pressão máxima de 12.7 bar, com o acesso à alimentação interrompido pela válvula globo e ainda sem liberação de ar para fora da rede. Dessa forma a bancada deveria se manter pressurizada e sem uma queda de pressão caso não houvessem vazamentos na rede. Durante o monitoramento o transdutor de pressão se encontrava acoplado à rede realizando a leitura de sua pressão, a qual era enviada para o sistema de aquisição de dados da Yokogawa e registrada. Ambos os dispositivos se encontravam alimentados com a fonte em 24 V. Assim, obteve-se os valores de pressão ao longo de toda a verificação e com isso, aplicou-se os valores iniciais e finais de pressão durante o monitoramento, em conjunto com o tempo de aquisição e o volume considerado da bancada de 22 litros na Equação (2.1) proposta por Bollmann (1997). Um exemplo de bancada é apresentado na Figura 4.1.

Segundo Bollmann (1997), como a temperatura onde se encontravam as bancadas era de  $25^\circ\text{C}$ , os valores de  $T_a$  e  $T_0$  são próximos, podendo ser desconsiderados na Equação (2.1).

A aplicação da Equação (2.1) para a bancada 1 é apresentada a seguir:

$$Q_{VN} = \frac{0,022(12,505 - 10,466)}{(2,1,0325)} m^3/min \quad (4.1)$$

Assim obteve-se o valor de  $Q_{VN} = 22,136 m^3/min$

Em seguida replicaram-se os procedimentos anteriores para as demais bancadas do laboratório e então realizou-se a somatória destes valores para obter o valor total de vazamento

do laboratório. O vazamento de cada bancada e o valor de vazamento total do laboratório são apresentados na tabela apresentada na Tabela 4.1.

Figura 4.1 – Exemplo de bancada de teste.



Fonte:Autor (2023)

Tabela 4.1 – Dados de estanqueidade da tubulação.

Bancadas	Volume [m <sup>3</sup> ]	Volume [l]	Pi [bar]	Pf [bar]	T [min]	Vazamento [m <sup>3</sup> /min]	Vazamento [l /min]
Bancada 1	0,022	22	12,505	10,466	2	0,022	22,136
Bancada 2	0,022	22	12,353	11,724	2	0,007	6,829
Bancada 3	0,022	22	12,672	11,274	2	0,015	15,177
Bancada 4	0,022	22	12,673	12,406	2	0,003	2,899
Bancada 5	0,022	22	12,702	12,11	2	0,006	6,427
Bancada 6	0,022	22	12,76	10,413	2	0,025	25,479
Bancada 7	0,022	22	12,66	10,378	2	0,025	24,774
Bancada 8	0,022	22	12,6875	12,258	2	0,005	4,663
Bancada 9	0,022	22	12,5885	12,258	2	0,004	3,588
<b>Total</b>	<b>0,198</b>	<b>198</b>	<b>113,601</b>	<b>103,287</b>	<b>18</b>	<b>0,111970392</b>	<b>111,970</b>

Fonte:Autor (2023)

Como a análise de cada bancada foi realizada de forma individual, a localização de vazamento se tornou mais eficiente, pois assim identificou pontualmente as bancadas com vazamentos e reduziram-se os pontos de buscas de toda uma rede para apenas as bancadas com vazamentos consideráveis, reduzindo a busca de uma escala macro para uma escala micro.

## 4.2 Queda de pressão atual

A queda de pressão atual da rede foi obtida por simulação de um teste, no qual supões-se a maior demanda de ar comprimido possível. A simulação consistiu em acionamentos cíclicos, na qual ocorria um acionamento do dispositivo de freio com uma alimentação de ar comprimido e um retorno por mola após a exaustão do ar injetado.

O teste em questão era longo e ocorria ao longo de dias de forma cíclica com uma frequência de 15 acionamentos por minuto. Nele eram geralmente submetidos 6 atuadores de travagem de forma simultânea (Figura 1.1), sendo que sua capacidade máxima era de 25 produtos simultâneos com volume de 1 litro cada. Com essa informação foi possível obter o valor da vazão máxima necessária para o laboratório, a qual foi obtida multiplicando o número de acionamentos por minuto com a quantidade de amostras testadas simultaneamente e o volume de cada produto. Dessa forma, obteve-se o valor da demanda do laboratório da seguinte forma:

$$Q = 15 * 25 * 1 \text{ litros}/\text{min} \quad (4.2)$$

Resultando em um o valor de  $Q = 450 \text{ litros}/\text{min}$

A demanda máxima da rede foi de 450 litros por minuto, e considerando um fator de expansão de 1.3 para o laboratório, representando uma expansão de 30% em 10 anos, este valor foi multiplicado, resultando em uma demanda de 585 litros por minuto. Para fins de teste foram usados reservatórios de 1 litro com volume semelhante ao produto, já que a rede tinha ramificações em circuito aberto. Optou-se por verificar a queda de pressão em apenas uma bancada para avaliar a capacidade proporcional daquela ramificação. Como o laboratório tinha um total de 9 bancadas, a bancada em questão deveria ter capacidade para 1/9 da vazão máxima registrada, ou seja, 65 litros por minuto. Foram utilizados 4 reservatórios de 1 litro com frequência de 15 acionamentos por minuto para simular uma vazão próxima a essa.

Para monitorar a queda de pressão durante o teste, utilizou-se o controlador em conjunto com o transdutor de pressão, que estava acoplado à rede de uma das bancadas para o monitoramento. No controlador, foi criado um alarme para o valor de queda admissível, sendo que a variação admissível foi estabelecida em 0,2 bar, conforme definido pelo engenheiro de testes. Como a pressão de regime do laboratório era de 12,7 bar, a pressão mínima admissível foi estabelecida em 12,5 bar e ajustada no alarme do controlador. Esse valor adotado para a queda de pressão foi coerente com a literatura de referência, uma vez que Fialho (2004) indica um

valor de 0,294 para uma condição satisfatória de desempenho do sistema, enquanto Prudente (2013) sugere que a queda deve estar entre 0,1 e 0,3 bar. Então colocou-se os reservatórios em uma frequência de atuação de 15 ciclos por minuto simulando o teste e iniciou-se o monitoramento para verificar se haveria uma queda de pressão superior a admissível ao longo de 5 minutos, caso houvesse o controlador acionaria o LED vinculado a ele, o qual se encontraria acesa após a ciclagem. Na Figura 4.2 é apresentada a pressão antes da ciclagem e na Figura 4.3 é apresentada a queda durante o teste.

Figura 4.2 – Pressão de regime no momento do teste de ciclagem.



Fonte:Autor (2023)

Figura 4.3 – Pressão mínima durante o teste de ciclagem.



Fonte:Autor (2023)

Com uma variação menor que 0.2 bar, é possível concluir que a tubulação do laboratório é suficiente para a sua demanda máxima, já que apresentou uma queda de pressão inferior a pressão máxima admissível.

### **4.3 Cálculo do volume necessário do reservatório**

Com o volume de ar comprimido necessário para suprir a demanda de vazão máxima do laboratório obtido anteriormente, realizou-se o cálculo para o volume ideal do reservatório da rede. Segundo Metalplan (2017), o volume do reservatório deve ser de 10% da vazão total do sistema ao longo de um minuto, e para suprir a condição de demanda máxima, foi utilizado o valor de vazão desta condição de 585 l/ min, obtendo assim um volume do reservatório de 58,5 litros.

Como o ar já chega tratado ao laboratório, recomendou-se a instalação de um secador e fracionar este volume em dois reservatórios com 50% em cada um, sendo um antes do secador e outro após. Dessa forma, garante-se uma proteção contra picos e pulsações que viriam de um único reservatório (METALPLAN, 2017). De acordo com (PARKER, 2001), o uso de um reservatório ideal ainda garante à rede uma facilidade na remoção de condensado fornecendo ao sistema um ar com menor umidade. Já para Metalplan (2017), seu uso é fundamental já que ele propicia à rede uma carga de ar comprimido caso os compressores parem.

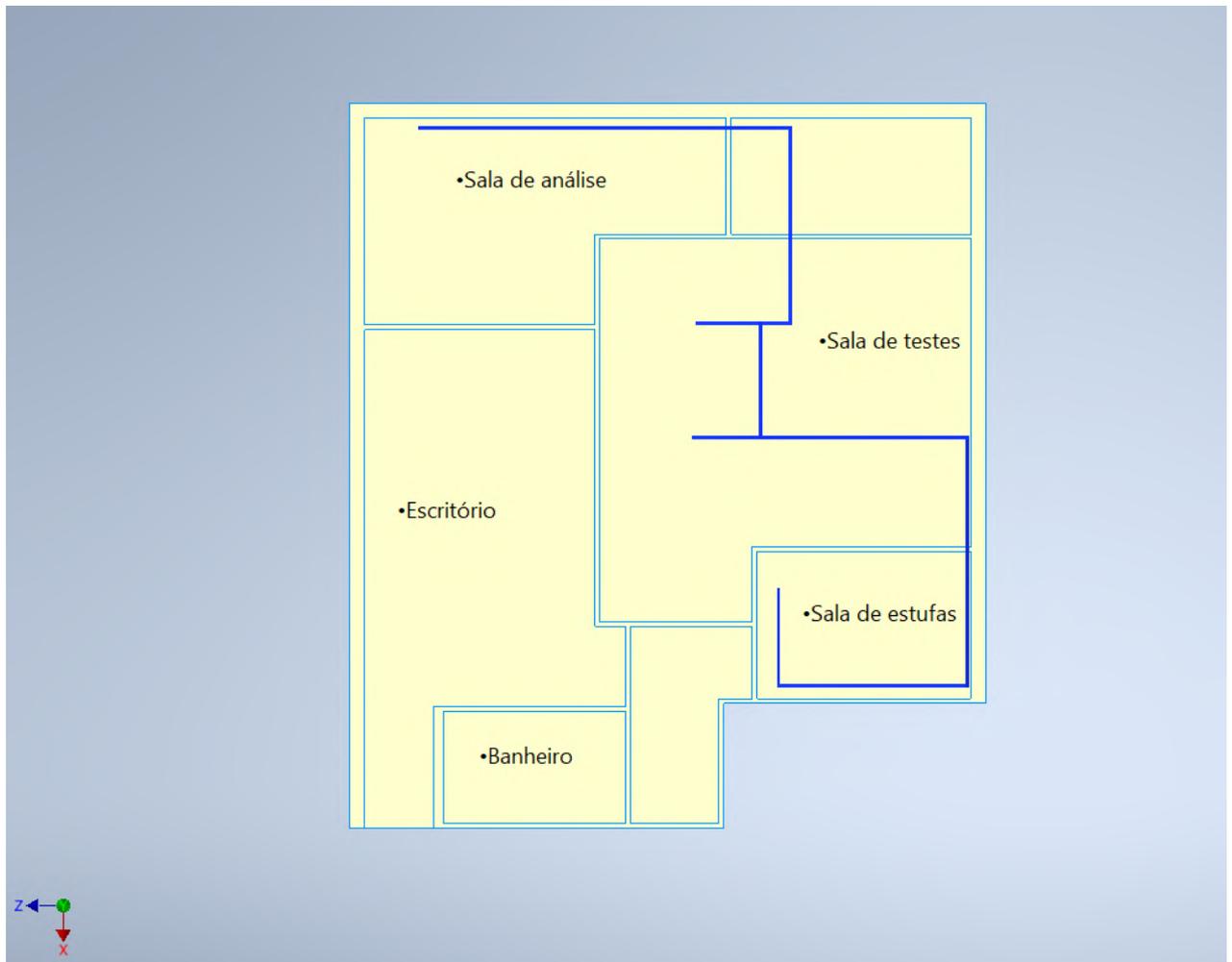
### **4.4 Atualização da configuração da rede**

A configuração atual da rede pneumática, se encontrava com várias ramificações em circuito aberto, sendo essa uma característica não recomendada para uma alimentação uniforme e não atrativa para o laboratório de testes. Logo, optou-se por elaborar uma atualização para circuito fechado. A configuração atual foi desenhada em CAD através do *software Inventor 2022* e é apresentada na Figura 4.4 e Figura 4.5

Para uma reelaboração da configuração da rede, Fialho (2004) sugere definir quais seriam os pontos principais por onde a rede pneumática deveria passar e quantos pontos de alimentação ela deveria ter. Dessa forma, definiu-se cada ponto de necessidade de alimentação, a saber: os locais com bancadas de teste para ciclagem e ainda as bancadas externas que eram uti-

lizadas para análises de funcionais dos produtos. A definição dos pontos principais de demanda por onde a rede deveria passar são representadas na Figura 4.6.

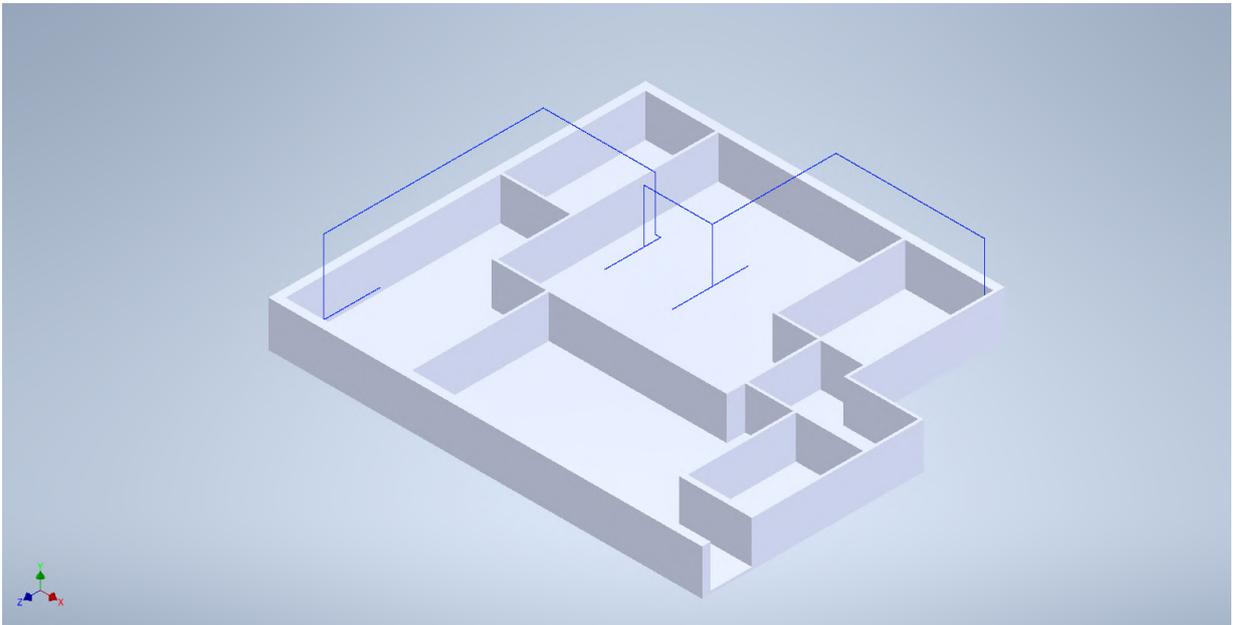
Figura 4.4 – Rede pneumática em sua configuração atual.



Fonte:Autor (2023)

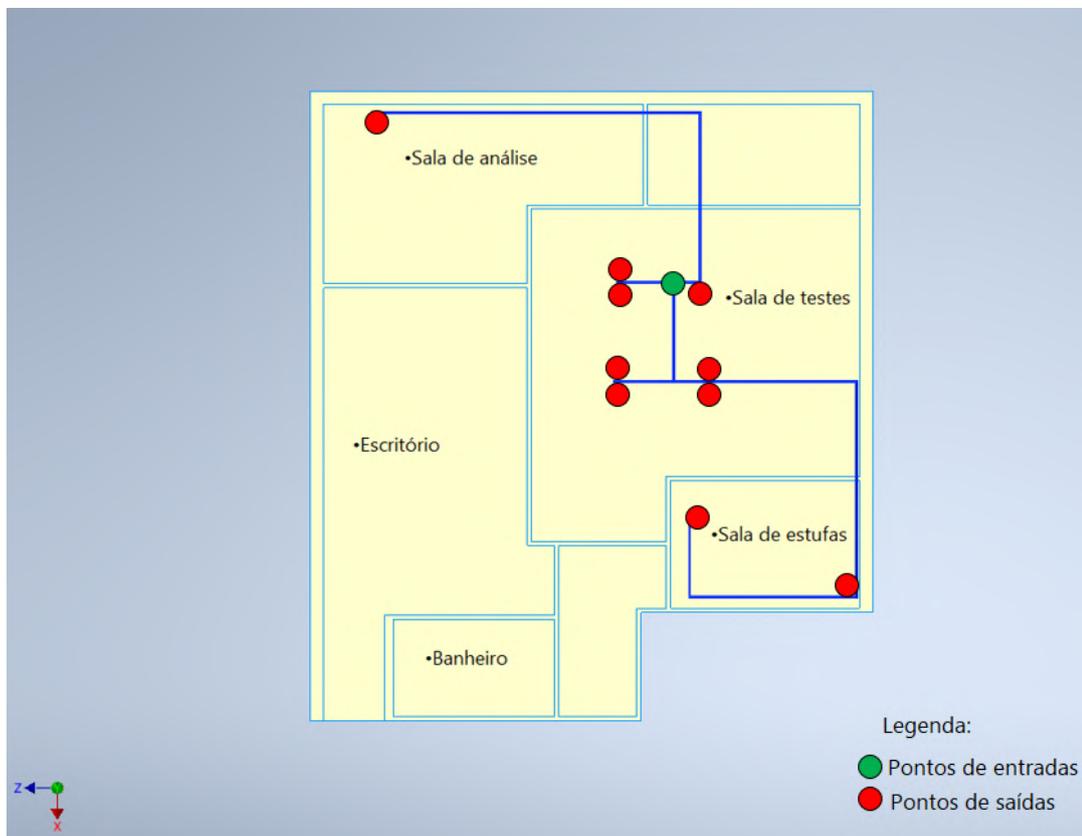
A partir disso, projetou-se um novo *layout* que envolveria todos esses pontos com a característica de ser em circuito fechado, garantindo uma maior estabilização e uniformidade no ar comprimido da rede. Esta nova configuração é apresentada na Figura 4.7 e Figura 4.8 .

Figura 4.5 – Rede pneumática em sua configuração atual em CAD.



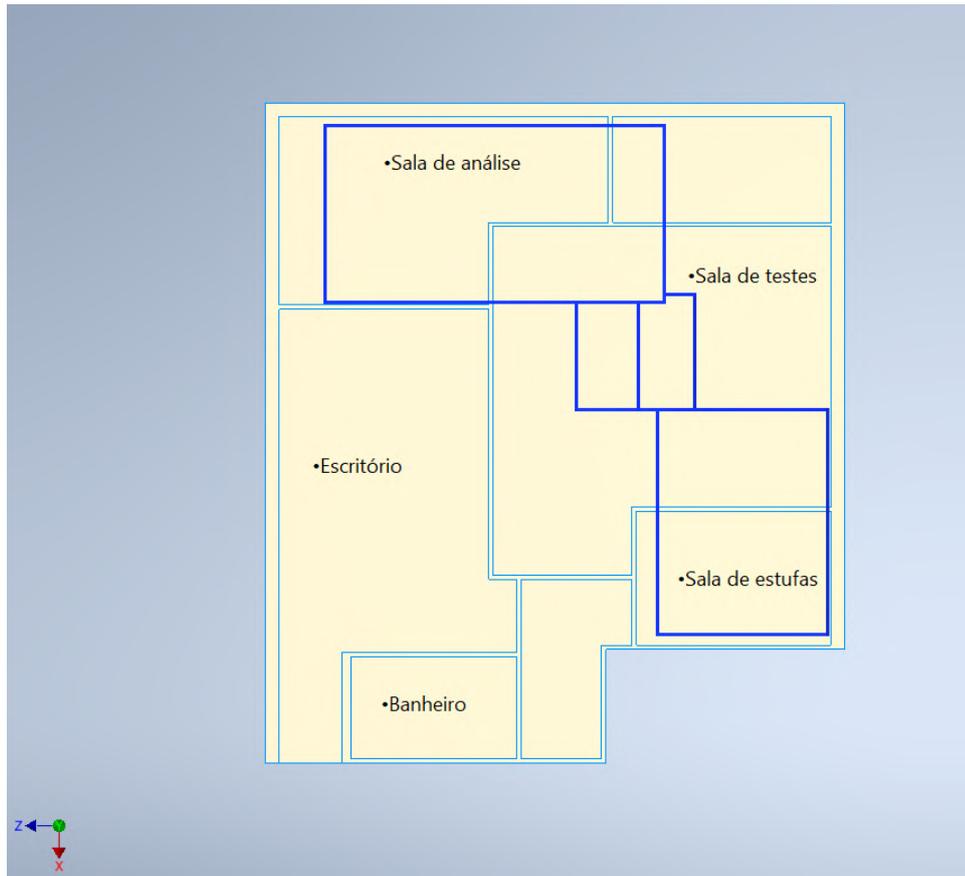
Fonte:Autor (2023)

Figura 4.6 – Pontos principais de necessidade de alimentação.



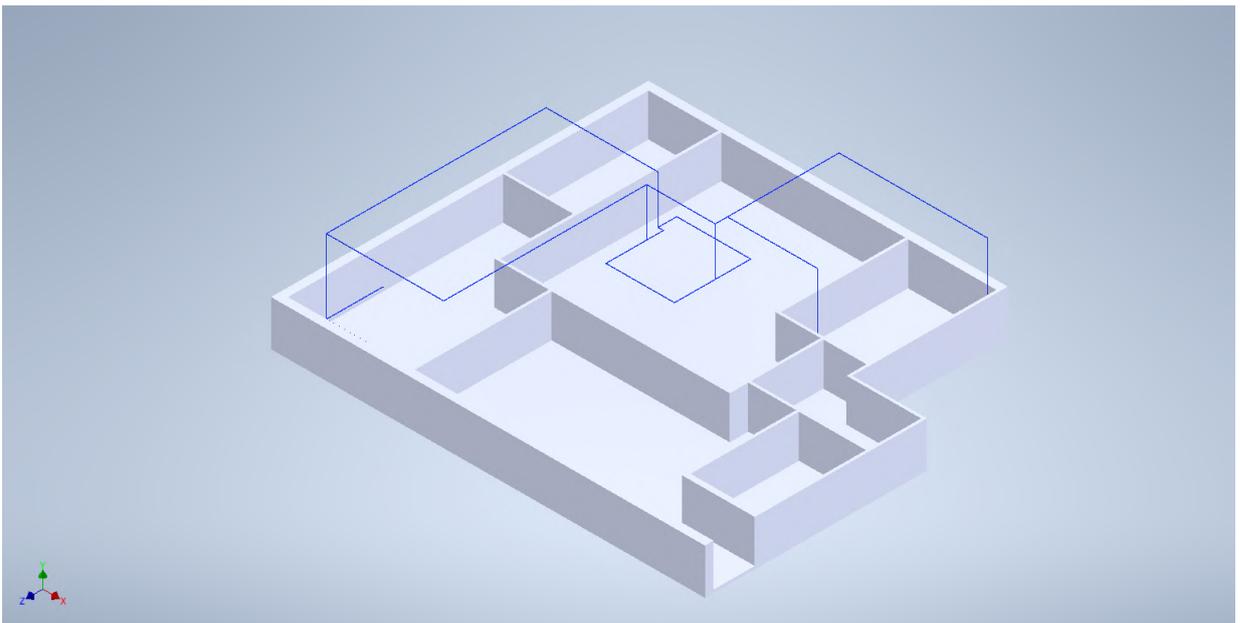
Fonte:Autor (2023)

Figura 4.7 – Sugestão de nova configuração para a rede pneumática.



Fonte:Autor (2023)

Figura 4.8 – Sugestão de nova configuração para a rede pneumática em CAD.



Fonte:Autor (2023)

#### 4.5 Cálculo do diâmetro da rede atualizada

Para a definição do diâmetro da rede pneumática foi necessário a utilização da vazão máxima da rede já encontrada previamente no valor de 585 m<sup>3</sup>/min, em seguida, iniciou-se realizando o cálculo do comprimento total da rede. Segunda Silva (2020) o comprimento total é encontrado a partir do somatório total do comprimento retilíneo da tubulação em conjunto com o comprimento das singularidades presentes na rede. Utilizando a atual configuração da rede, realizou-se a contagem de singularidades presentes nele e elaborou-se na Tabela 4.2., indicando a quantidade de singularidades e o comprimento equivalente total delas.

Tabela 4.2 – Comprimento equivalente das singularidades.

Singularidade	Comprimento equivalente [m]	Quantidade	Comprimento total [m]
Cotovelo	1,5	17	25,5
Conexão T	2	7	14
Redução	0,5	1	0,5
Total	-	-	40

Fonte: Autor (2023)

A partir disso, utilizou se a Equação (2.3) e obteve-se o valor do comprimento total da rede considerando o comprimento linear da rede no valor de 50 metros:

$$L_T = 50 + 40\text{metros} \quad (4.3)$$

Assim, obteve-se  $L_T = 90$  metros

Em seguida, com a queda de pressão já estabelecida anteriormente no valor de 0,2 bar e a pressão de regime da rede é em geral de 12,7 bar, onde esta apresenta flutuações podendo chegar a 13 bar, foi possível realizar o cálculo da Equação (2.4) para a definição do diâmetro interno mínimo em milímetros da rede atualizada e com o fator de expansão já considerado:

$$d = 10. \left[ \sqrt[5]{\frac{1,663784.10^{-3}.(65.(3600/1000))^{1,85}.90}{0,203943.12,9504}} \right] \quad (4.4)$$

Então, obteve-se um novo diâmetro de 42,39 mm. Em comparação com o diâmetro atual da rede, este é em partes de 25,4 mm (1”) e outras de 50,8 mm (2”), e o valor obtido se apresenta entre estes valores. Dessa forma, acredita-se que a queda de pressão no momento de teste foi menor, pois o controlador foi instalado em um ponto com diâmetro de 50,8 mm. Por isso, recomenda-se a atualização das partes de 25,4 mm para um diâmetro superior a 42,39 mm, para que, nos momentos de alta demanda, não haja uma queda de pressão superior à admissível.

#### **4.6 Escolha do material para a rede**

Por fim, realizou-se a escolha do material para a rede pneumática para garantir que o material atendesse às condições da rede e fosse a mais viável economicamente para esta demanda. A rede atual é de aço galvanizado e diante das opções apresentadas na seção 2.4.3 e por se tratar de uma rede de pequeno porte com maior necessidade de qualidade do ar comprimido, a opção de aço galvanizado foi mantida.

## 5 CONCLUSÃO

Após a elaboração do projeto, foi constatado que a tubulação atual é adequada para suportar a queda de pressão na condição de vazão máxima estabelecida, porém, as características de uma rede de circuito fechado oferecem mais vantagens se comparada a ela, já que oferece maior estabilidade, facilidade em sua manutenção e qualidade do ar comprimido. Por isso, concluiu-se que uma alteração na configuração da rede para circuito fechado proporcionaria vantagens ao laboratório de testes.

Além disso, foram identificados vazamentos na rede atual, o que motivou uma atualização na rede, visando facilitar a manutenção e reduzir sua periodicidade. A atualização permitiria a redução de vazamentos existentes, uma vez que as vedações seriam refeitas e os componentes atualizados.

Por fim, pode-se concluir que o trabalho alcançou o objetivo de fornecer uma melhor compreensão do sistema pneumático, obtendo valores coerentes com os resultados do laboratório e identificando oportunidades para melhorias que serão apresentadas à empresa como sugestão.

Para trabalhos futuros, é recomendável a realização de uma quantificação monetária dos custos gerados por uma rede desatualizada, levando em consideração a necessidade de trabalho adicional do compressor devido às perdas de carga e vazamentos presentes na rede.

Com esses dados, seria interessante realizar um cálculo de viabilidade econômica para atualizar o *layout* da rede, estabelecer uma periodicidade para reavaliá-la, avaliar a qualidade do ar nos consumidores finais e criar uma estimativa de vida útil da tubulação da rede.

Como o dimensionamento foi realizado no laboratório de testes de válvulas e atuadores, considera-se vantajoso em trabalhos futuros integrar a rede do laboratório de testes de compressores que fica localizado no andar inferior. No entanto, seria necessário realizar uma análise mais detalhada das demandas e condições de operação desta rede. Além disso, seria interessante aproveitar o ar comprimido gerado pelos compressores em testes que ali se encontram, a qual contudo, demandaria uma análise minuciosa do impacto desse aproveitamento nas condições de testes dos compressores.

**REFERÊNCIAS**

- Bollmann, A. **Manuais de cálculos em hidráulica e pneumática**. Florianópolis, 1997. Disponível em: <[https://laship.ufsc.br/calvazao/calvazao\\_manual.pdf](https://laship.ufsc.br/calvazao/calvazao_manual.pdf)>.
- BOSCH. **Tecnologia de ar comprimido**. São Paulo: [s.n.], 2008.
- ELETROBRÁS. **Eficiência energética em sistemas em sistemas em sistemas de ar c de ar comprimido**. Rio De Janeiro: PROCEL, 2014.
- FABIÁN, G. G. **Desenvolvimento de bancada didática voltada ao estudo de sistemas pneumáticos**. Fortaleza: Universidade Federal Do Ceará, 2017.
- FIALHO, A. B. **Automação Pneumática**. 2. ed. São Paulo: Érica Ltda., 2004.
- HENN, E. A. L. **Máquinas de fluido**. 2. ed. Santa Maria: UFSM, 2006.
- MALDANER, D. E. **Dimensionamento de uma rede de ar comprimido industrial**. Horizontina: Faculdade Horizontina, 2016.
- METALPLAN. **Manua de ar comprimido**. 6. ed. [S.l.: s.n.], 2017.
- PACCO, R. **Projeto de uma rede de ar comprimido industrial**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2013.
- PARKER. **Tecnologia pneumática industrial**. Jacareí: Parker Hannifin Corporation, 2001.
- PARKER. **Tecnologia eletropneumática industrial**. Jacareí: Parker Hannifin Corporation, 2005.
- PARKER. **Dimensionamento de redes de ar comprimido**. Jacareí: Parker Hannifin Corporation, 2006.
- PAVANI, S. A. **Comandos pneumáticos e hidráulicos**. Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.
- PAZ, J. H. **Dimensionamento de um sistema pneumático para uma máquina produtora de blocos de concreto**. Horizontina: Faculdade Horizontina, 2012.
- PRUDENTE, F. **Automação Industrial Pneumática Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos editora s/a site, 2013.
- SGANZERLA, H. A. **Análise e redimensionamento de uma rede industrial de distribuição de ar comprimido – estudo de caso em uma empresa de fundição**. Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, 2018.
- SILVA, A. G. D. **Otimização do procedimento de monitorização de fugas e das perdas de carga do sistema de ar comprimido**. Braga: Universidade Do Minho, 2020.
- SILVA, E. C. N. **Apostila de pneumática**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2002.
- SIMÕES, R. M. I. **Sistemas hidráulicos e pneumáticos**. [S.l.]: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2016.

SOUZA, G. P. D. **Dimensionamento de uma rede de ar comprimido para uma empresa de pequeno porte**. Manaus: Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Do Amazonas, 2016.

TELLES, P. C. S. **Tubulações industriais**. 10. ed. Rio De Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2001.