



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LAURA FERNANDA PEREIRA DA SILVA

**DIMENSIONAMENTO DE UMA REDE DE AR COMPRIMIDO PARA OS
LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS**

RUSSAS
2022

LAURA FERNANDA PEREIRA DA SILVA

DIMENSIONAMENTO DE UMA REDE DE AR COMPRIMIDO PARA OS
LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará Campus Russas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Federal do Ceará

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Laura Fernanda Pereira da.

Dimensionamento de uma rede de ar comprimido para os laboratórios de engenharia da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas / Laura Fernanda Pereira da Silva. – 2022.

91 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

1. Sistemas Pneumáticos. 2. Dimensionamento. 3. Equipamentos Pneumáticos. I. Título.

CDD 620.1

LAURA FERNANDA PEREIRA DA SILVA

DIMENSIONAMENTO DE UMA REDE DE AR COMPRIMIDO PARA OS
LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará Campus Russas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

Aprovada em: 06/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Sílvia Teles Viana
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Mara e Fernando.

A mim.

A minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Mara e Fernando, que me apoiaram na escolha do curso e me ajudaram a trilhar essa trajetória da melhor maneira possível.

Ao meu orientador, Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro, que esteve firmemente presente nessa caminhada. Agradeço a sua compreensão em estar disponível nos meus horários após o trabalho, em me apoiar quando o caminho se fez difícil e aos bons ensinamentos repassados.

Aos professores Dra. Sílvia Teles Viana e Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo, pelos ensinamentos, dicas profissionais, conversas e acompanhamento dos projetos durante o curso.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, cada um contribuiu para o meu crescimento profissional e pessoal.

As meus amigos e colegas de formação, Beatriz da Costa, Maria Samila e Marcos Rogério, que estiveram presentes ao longo desse período, compartilhando experiências, apoio, amizade e momentos de alegria, tornando essa jornada mais leve.

Ao técnico de engenharia mecânica da UFC de Russas, Marcos Ridiley, pelo auxílio na coleta de dados do laboratório.

Aos meus colegas de graduação em Engenharia Mecânica, pela boa convivência e companheirismo.

Á todos, os meus sinceros agradecimentos, foi um prazer inenarrável compartilhar essa jornada com vocês.

“Faça o teu melhor, na condição que você tem,
enquanto não tem condições melhores, para
fazer melhor ainda! ”

Mario Sergio Cortella

RESUMO

Com o advento da automatização de processos industriais, os sistemas pneumáticos participam de forma integral em procedimentos de fabricação, montagem e controle de linhas fabris. Fatores como disponibilidade do ar, fácil armazenamento, boa adaptabilidade em ambientes hostis, maior segurança de trabalho, facilidade de manutenção e baixo investimento de implementação, corroboram para sua utilização em aplicações industriais de diferentes ramos. A energia limpa e com produção ausente de poluentes, intensificam a importância da utilização de sistemas pneumáticos na busca pela racionalização do trabalho e automatização industrial, de forma sustentável, sem danos ao meio ambiente e aos colaboradores que participam do processo. Diante de elevada importância, os sistemas pneumáticos são objeto de estudos de diversos cursos de graduação. Para isso, é essencial que um curso bem estruturado possua disponibilidade de equipamentos que possibilitem a prática dos ensinamentos repassados em sala de aula, como automação pneumática e uso de equipamentos pneumáticos. Sabendo disso, este trabalho teve como objetivo dimensionar um sistema pneumático para o galpão de engenharia industrial da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas, visando o melhor *layout* da linha de distribuição do ar, atendendo as suas instalações atuais e futuras ampliações. Para isso, foram realizadas visitas ao galpão para coleta de dados, informações e interferências locais para posterior dimensionamento da rede. Os resultados apresentaram um sistema pneumático com vazão de operação de 109,63m³/h e a sua linha principal com diâmetro de 1.1/2", cobrindo a área das quatro unidades do galpão, com 11 pontos de consumo. Portanto, através deste trabalho, foi possível dimensionar uma rede que atendesse as necessidades do galpão de engenharia, além de definir os melhores equipamentos com boa relação custo-benefício para composição do sistema pneumático.

Palavras-chave: sistemas pneumáticos; dimensionamento; equipamentos pneumáticos.

ABSTRACT

With the advent of automation of industrial processes, pneumatic systems participate integrally in manufacturing, assembly, and control procedures of manufacturing lines. Factors such as air availability, easy storage, good adaptability in hostile environments, greater work safety, ease of maintenance, and low implementation investment, corroborate its use in industrial applications of different branches. Clean energy, with no pollutants produced, intensifies the importance of using pneumatic systems in the search for rationalization of work and industrial automation, in a sustainable way, without harming both the environment and the employees who participate in the process. Due to its high importance, pneumatic systems are the subject of study in several undergraduate courses. Therefore, a well-structured course must have the availability of equipment that allows the practice of the teachings passed on in the classroom, such as pneumatic automation and the use of pneumatic equipment. Knowing this, this work aimed to design a pneumatic system for the industrial engineering shed of the Federal University of Ceará Campus de Russas, aiming at the best layout of the air distribution line, meeting its current installations and future expansions. Therefore, there were visits to the shed to collect data, information, and local interference for subsequent network sizing. The results showed a pneumatic system with an operating flow of $109.63\text{m}^3/\text{h}$ and its main line with a 1.1/2" diameter, covering the area of the four units of the shed, with 11 consumption points. Therefore, through this work, it was possible to scale a network that would meet the needs of the engineering shed, in addition to defining the best equipment with a good cost-benefit ratio for the composition of the pneumatic system.

Keywords: pneumatic systems; dimensioning; pneumatic equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Unidade de produção, preparação e distribuição do ar comprimido	20
Figura 2 - Unidade de produção do ar comprimido.....	21
Figura 3 – Principais grupos de compressores industriais.....	22
Figura 4 – Representação esquemática de um compressor alternativo	23
Figura 5 – Mecanismo de compressão do compressor alternativo	23
Figura 6 – Fases de funcionamento de um compressor alternativo.....	24
Figura 7 – Compressor de palhetas.....	25
Figura 8 – Compressor de parafusos	26
Figura 9 – Etapas de compressão do compressor de parafusos.....	26
Figura 10 – Esquema de um compressor de lóbulos	27
Figura 11 – Principais componentes do compressor centrífugo.....	28
Figura 12 – Compressor centrífugo de múltiplos estágios	28
Figura 13 – Compressor axial.....	29
Figura 14 – Localização da central geradora.....	30
Figura 15 – Sistema de resfriamento do ar	31
Figura 16 – Filtro coalescente	32
Figura 17 – Processo de coalescência.....	33
Figura 18 – Processo de secagem por refrigeração	35
Figura 19 – Processo de secagem por adsorção	36
Figura 20 – Processo de secagem por absorção	37
Figura 21 – Reservatório de ar comprimido	38
Figura 22 – Efeitos do ar comprimido contaminado no sistema	39
Figura 23 – Unidade de conservação pneumática	40
Figura 24 – Conjunto Lubrifil	40
Figura 25 – Filtro.....	41
Figura 26 – Válvula reguladora de pressão	43
Figura 27 – Lubrificador.....	44
Figura 28 – Conexão de engate rápido	46
Figura 29 – Drenagem do sistema pneumático	46
Figura 30 – Fixação da tubulação a) por pendurais, b) por grampo	47
Figura 31 – Curvatura em rede de distribuição	47
Figura 32 – Inclinação da tubulação e tomadas de ar.....	48
Figura 33 – Componentes de uma rede pneumática.....	48
Figura 34 – Rede em circuito aberto	49
Figura 35 – Rede em circuito fechado.....	50
Figura 36 – Rede em circuito misto	50
Figura 37 – Atuador Pneumático	52
Figura 38 – Delineamento do projeto	54
Figura 39 – Planta baixa do galpão	55
Figura 40 – Faixa de operação de diferentes tipos de compressores.....	58
Figura 41 – Máquina universal e seu atuador pneumático.	59
Figura 42 – Retífica de corpos de prova e atuador pneumático 01	60
Figura 43 – Retífica de corpos de prova e atuador pneumático 02	61
Figura 44 – Exemplo de atuador pneumático - bancada	63
Figura 45 – Layout básico da linha principal e alimentação	66
Figura 46 – Tubo de aço galvanizado	71
Figura 47 – Compressor do tipo pistão - exemplo.....	73
Figura 49 – Localização da central geradora conforme Layout	73
Figura 50 – Lubrifil - exemplo	74

Figura 51 – Dreno - exemplo.....	75
Figura 52 – Engate rápido - exemplo	75
Figura 53 – Mangueira de ar comprimido - exemplo.....	75
Figura 54 – Layout do sistema pneumático do galpão	76
Figura 55 – Válvula registro da tubulação principal	76
Figura 56 – Linha de alimentação	77
Figura 57 – Linha de alimentação – constituintes	77
Figura 58 – Fixação da tubulação principal - exemplo	78
Figura 59 – Fixação aérea da tubulação principal - exemplo	78
Figura 60 – Tipo de fixação por área do galpão – exemplo	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação pressão x nº de estágios.....	24
Tabela 2 – Modelos de filtros	31
Tabela 3 – Consumo de ar dos equipamentos existentes.....	61
Tabela 4 – Consumo de ar das futuras instalações	64
Tabela 5 – Singularidades da linha tronco ou principal.....	67
Tabela 6 – Singularidades da linha de alimentação ou consumo	67
Tabela 7 – Variáveis da linha principal.....	68
Tabela 8 – Comprimento equivalente das singularidades da linha principal	68
Tabela 9 – Variáveis da linha de alimentação	69
Tabela 10 – Comprimento equivalente da linha de alimentação ou consumo.....	70
Tabela 11 – Vazão e pressão requeridas a unidade geradora	72
Tabela 12 – Características técnicas do compressor.....	72
Tabela 13 – Características técnicas do conjunto Lubrifil.....	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo geral	16
1.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Sistemas pneumáticos	17
2.1.1 <i>Aplicações</i>	17
2.1.2 <i>Vantagens</i>	18
2.1.3 <i>Desvantagens</i>	19
2.1.3 <i>Produção, preparação e distribuição de ar comprimido</i>	20
2.2 Produção do ar comprimido	20
2.2.1 Compressores	21
2.2.1.1 <i>Compressores alternativos</i>	22
2.2.1.2 <i>Compressores rotativos</i>	24
2.2.1.3 <i>Compressor de palhetas</i>	25
2.2.1.4 <i>Compressor de parafusos</i>	25
2.2.1.5 <i>Compressor de lóbulos</i>	26
2.2.1.6 <i>Compressores centrífugos</i>	27
2.2.1.7 <i>Compressores axiais</i>	28
2.2.1.8 <i>Dimensionamento de um compressor</i>	29
2.2.1.9 <i>Localização da central geradora</i>	30
2.2.2 Resfriadores	30
2.2.3 Filtro	31
2.2.3 Secadores	33
2.2.3.1 <i>Secagem por refrigeração</i>	34
2.2.3.2 <i>Secagem por adsorção</i>	35
2.2.3.3 <i>Secagem por absorção</i>	36
2.3 Reservatório de ar comprimido	37
2.4 Unidade de conservação – Lubrifil	39
2.5.1 Filtro	40
2.5.2 Válvula reguladora de pressão	42
2.5.3 Lubrificador	43
2.5 Distribuição do ar comprimido	44
2.5.1 Conexões, acessórios e elementos de fixação	45
2.5.1 Curvatura, inclinação, cor e tomadas de ar	47
2.5.1 Layout	49
2.5.2 Rede em circuito aberto	49
2.5.3 Rede em circuito fechado	49
2.5.4 Rede combinada	50
2.5 Dimensionamento das linhas de distribuição	51
2.5.1 Dimensionamento da linha principal	52
2.5.2 Dimensionamento das linhas secundárias	52
2.6 Consumo de ar em atuadores pneumáticos	52
3 METODOLOGIA	54
3.1 Coleta de dados	54
3.2 Futuras instalações	55
3.3 Layout Inicial	55
3.4 Variáveis de trabalho	56
3.4.1 Volume de ar corrente	56
3.4.2 Comprimento total da linha tronco	56

3.4.3	<i>Queda de pressão admitida</i>	56
3.4.4	<i>Número de pontos de estrangulamento</i>	57
3.4.5	<i>Pressão de regime</i>	57
3.5	Dimensionamento das linhas de distribuição	57
3.6	Unidade geradora	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	Instalações atuais	59
4.2	Instalações futuras	62
4.3	Consumo de ar total do sistema	65
4.4	Layout Inicial	65
4.5	Dimensionamento da rede pneumática	66
4.5.1	<i>Cálculo da linha principal</i>	67
4.5.2	<i>Cálculo da linha secundária</i>	69
4.5.3	<i>Rede de ar comprimido</i>	71
4.6	Dimensionamento da central geradora – Compressor	71
4.7	Unidade de preparação do sistema	72
4.8	Localização da central geradora – Compressor	73
4.9	Conservação do sistema – Lubrífil	73
4.10	Purgador, conexões e acessórios	74
4.11	Layout final	76
5	CONCLUSÃO	80

1 INTRODUÇÃO

A pneumática é o ramo da física que utiliza gases ou ar pressurizado como fonte de energia para realizar movimentos operacionais. O primeiro registro do uso da pneumática data do século I, quando o matemático grego Heron compartilhou sobre suas invenções com o uso do vento para transportar objetos. Entretanto, esse fenômeno apenas ganhou evidência no século XVI, quando o físico Otto Von Guericke inventou a primeira bomba de vácuo, utilizada para extrair gases de qualquer navio ao qual estivesse acoplada. (PARKER, 2011).

No Brasil, a difusão de redes de ar comprimido ganhou impulso na década de 1960, através da expansão da indústria automobilística, no qual demandava-se a produção de peças em série, possibilitando a aplicação de movimentos e operações repetitivas que requeriam tempo e custo de produção. (FIALHO, 2011).

Santos e Silva (2009) relatam três aplicações do ar comprimido: energia, processo e controle. O uso energético desse recurso é verificado em operações que produzem movimento e/ou exercem uma força. Para processo, é definido quando o ar comprimido está no funcionamento de equipamentos e procedimentos como: combustão, refrigeração, aeração etc. As operações de controle ocorrem quando o ar comprimido comuta, inicia, abre, fecha, para, modula, dentre outros comandos operacionais.

Com a ascensão tecnológica das indústrias e a busca incessante por meios de automação que racionalizem os trabalhos manuais, garantindo qualidade, eficácia de produção e segurança dos operadores, os sistemas pneumáticos revolucionaram o desenvolvimento fabril. Suas aplicações variam em setores comerciais: a indústria de embalagens manuseia a fonte de energia para produzir movimentos de prensa e recorte, a indústria de alimentos e bebidas aplicam no transporte e separação dos seus ingredientes, a indústria automotiva possui linhas de montagem pneumática, e a indústria química e petroquímica utilizam sistemas de controle para abrir, fechar e modular válvulas de processo.

Portanto, devido à importância e recorrente aplicabilidade dos sistemas pneumáticos nas indústrias, operações cotidianas e nos meios de controle, o seu estudo tornou-se um item obrigatório nas grades curriculares de diversos cursos de engenharia. Para tanto, o estudo teórico e a prática em laboratório fornecem o conhecimento necessário ao aluno para entendimento e simulação das possibilidades de trabalho desse sistema. Dessa forma, o presente estudo buscou dimensionar um sistema pneumático que atenda as demandas necessárias dos laboratórios, possibilitando o uso dos equipamentos pneumáticos e concretização de estudos científicos das áreas de engenharia dos cursos de graduação da universidade.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho consiste no dimensionamento e seleção de uma rede de ar comprimido para o galpão de engenharia da Universidade Federal do Ceará Campus Russas.

1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral do presente trabalho, os seguintes objetivos específicos deverão ser satisfeitos:

- Dimensionar as tubulações e componentes para produção, preparação e distribuição do sistema pneumático, considerando a demanda de pressão e vazão requeridas das instalações atuais e futuras ampliações do galpão;
- Selecionar os componentes e acessórios da rede de ar comprimido com base na demanda de pressão e vazão requeridas;
- Modelar o *layout* da linha principal e secundária do sistema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão, inicialmente, será apresentado a definição de um sistema pneumático, suas aplicações, vantagens e desvantagens e suas condições de operação para obtenção de um sistema com boa eficiência energética. Posteriormente, será explicado o processo de produção, seus equipamentos e componentes necessários para tal, assim como para preparação e distribuição do sistema de ar comprimido. Por fim, será apresentado como realizar o cálculo do dimensionamento das linhas principal, secundária e de alimentação.

2.1 Sistemas pneumáticos

O termo pneumática é derivado do grego Pneumos ou Pneuma (respiração, sopro) e é definido como a parte da Física que se ocupa da dinâmica e dos fenômenos físicos relacionados com os gases ou vácuos (PARKER, 2006). Um sistema pneumático é composto pela união de equipamentos e componentes que utilizam um meio gasoso, geralmente o ar comprimido, para realizar movimentos de controle e transmissão de energia necessários para automatização de processos.

Esses sistemas são comumente utilizados em diversos ramos industriais, tais como a indústria petroquímica, automotiva e automatizações gerais. Schluter (2018) relata que esse demasiado uso pode ser atribuído ao baixo custo de implementação do sistema, segurança e versatilidade em aplicações de processo.

2.1.1 Aplicações

Silva (2002) pontua,

Atuadores pneumáticos são utilizados quando estão envolvidas cargas da ordem de até uma tonelada onde se deseja movimentos de duas posições (início e fim) limitadas por batentes mecânicos, como em máquinas de fixação ou transporte de peças, ou quando se deseja altas rotações.

Por isso, os sistemas pneumáticos desempenham um papel essencial no desenvolvimento industrial, necessários principalmente na automatização de processos, pois possuem velocidade nos movimentos de trabalho e podem substituir a mão de obra humana em operações repetitivas, gerando eficiência nas linhas produtivas e o consequente aumento de produtividade e redução dos custos operacionais. (PARKER, 2007).

Suas aplicações perpassam além do cenário industrial, através do funcionamento de um elevador predial, acionamento dos freios de um automóvel, válvulas de contenção, sistema de abertura/fechamento de portas e nos sistemas de força em máquinas de grande porte, como empilhadeiras, guindastes e enchedeiras.

Na indústria automotiva os sistemas pneumáticos estão presentes nas linhas de montagem, através do uso de máquinas de perfurar, montar, mover e prensar peças. Nas indústrias de alimentos e bebidas, o uso de máquinas que abastecem, acondicionam e embalam os produtos utilizam atuadores pneumáticos como configuração principal do sistema. Na indústria de produção de bens, o uso dos sistemas pneumáticos ocorre por meio da movimentação de produtos como seleção, organização, posicionamento e empilhamento de peças. Além disso, é amplamente utilizada em atividades de marcação, corte, prensa e etiquetagem de mercadorias. (PUMA BRASIL, 2020).

2.1.2 Vantagens

Fialho (2004) relata que, em relação a hidráulica, o uso da pneumática é o método mais simples, de melhor eficiência e menor custo aplicados a problemas de automatização. Sua fonte inesgotável de combustível, o ar comprimido, pode ser utilizado e descartado sem a necessidade de linhas de retorno. Além disso, a armazenagem do ar comprimido é realizada em reservatórios com pressostato para sinalização da pressão de trabalho, acionando o compressor da linha para ajuste, apenas em redução ou aumento do set point de pressão, otimizando o seu uso.

A temperatura do ar comprimido não afeta o funcionamento do sistema, permitindo condições seguras de operação até mesmo em condições extremas. No quesito segurança, os sistemas pneumáticos trabalham com pressões no range entre 6 e 12 bar, o que minimiza a possibilidade de explosão e incêndio e, conseqüentemente, reduz os riscos de acidentes de trabalho.

Apesar das baixas pressões de operação comparado a outros sistemas, a pneumática possibilita que seus elementos sejam solicitados até a carga máxima sem sofrer danos estruturais, retornando para o funcionamento após cessar a resistência imposta. Os componentes e elementos do sistema pneumático apresentam menor robustez, dessa forma, os materiais aplicados possuem menor investimento para implementação quando comparados a outros sistemas mecânicos.

Conforme Parker (2007), os sistemas pneumáticos geralmente utilizam o ar comprimido, um fluido limpo e não poluente, que não apresenta riscos de danos ambientais, tornando-o um excelente sistema para trabalho em linhas de produção alimentícia e farmacêutica. Além disso, a sua implementação pode ser facilmente realizada através de pequenas modificações em máquinas convencionais aliados a disponibilidade de um compressor. Devido a sua simplicidade, os sistemas pneumáticos não requerem operários superespecializados para o seu controle e manipulação. Ambientes hostis que possuem poeira, atmosfera corrosiva, oscilações de temperatura, umidade, submersão em líquidos, raramente prejudicam os componentes pneumáticos se esses forem projetados para tal finalidade.

2.1.3 Desvantagens

Fialho (2004) e Parker (2007) sinalizam que, diferentemente de outros sistemas, a pneumática necessita de uma preparação do ar comprimido para eliminação de impurezas e remoção da umidade, mantendo a qualidade do ar, minimizando os riscos de corrosão nos equipamentos, entrvamentos e desgastes nas partes móveis do sistema, obtendo assim, o máximo rendimento operacional. O custo para sua implementação, considerando as etapas de produção, preparação, distribuição e manutenção, podem ser expressivos em sistemas que requerem máxima pressão de trabalho. O range dessa pressão obtido pelos sistemas pneumáticos apresentam desvantagens em relação á hidráulica, visto que, as forças obtidas possuem valores menores e carecem de maiores diâmetros nos êmbolos, limitando as suas aplicações em atividades de alta demanda operacional.

Parker (2007) relata que os sistemas pneumáticos não atingem altas velocidades de trabalho em virtude das propriedades físicas do ar, portanto, em determinadas aplicações, faz-se necessário recorrer a sistemas mistos (hidráulica e pneumática), conseqüentemente, o seu investimento se torna significativo.

A alta compressibilidade do ar impossibilita paradas repentinas e velocidades de trabalho constante, portanto, a pneumática não dispõe boa precisão nos movimentos e não permite o controle de velocidade contínua em ciclos de operação repetitivos. Ademais, o escape de ar realizado após o movimento de um atuador pneumático ou exaustão do ar para atmosfera, geram altos ruídos, sendo fundamental a instalação de silenciadores nos orifícios de escape para minimizar o impacto auditivo.

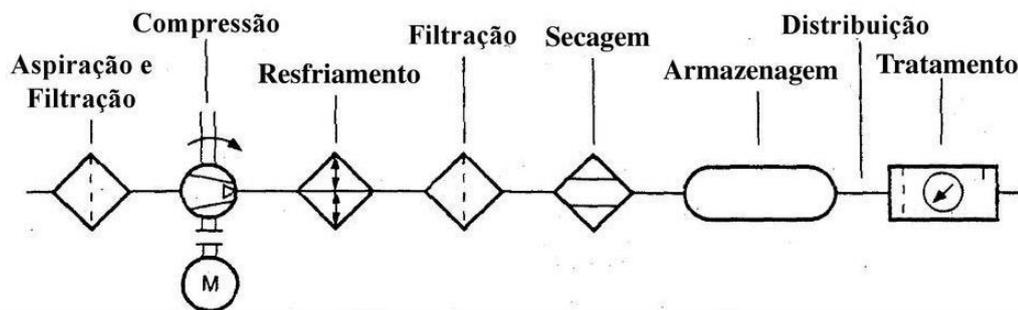
Consoante com o exposto, os sistemas pneumáticos apresentam aspectos positivos e negativos que podem ser ressaltados em comparação a outros sistemas. Portanto, cabe

salientar a importância de uma sinuosa avaliação da aplicação de trabalho, para que a demanda seja atendida, mantendo uma boa relação custo-benefício e condições eficientes de operação.

2.1.3 Produção, preparação e distribuição de ar comprimido

Fialho (2004) descreve que, para um sistema de ar comprimido funcionar corretamente, com eficiência energética e qualidade de operação, isto é, com o mínimo desgaste dos componentes e acessórios, faz-se necessário assegurar algumas exigências de qualidade do ar para sua utilização. Algumas dessas são: pressão e vazão mínima de trabalho, ausência de impurezas, teor de partículas sólidas e ausência de umidade. Esses fatores devem ser devidamente controlados através do sistema de produção e preparação do ar comprimido, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Unidade de produção, preparação e distribuição do ar comprimido



Fonte: Silva, (2002).

2.2 Produção do ar comprimido

O sistema de produção ou unidade geradora possui o objetivo de aspirar o ar atmosférico e comprimi-lo em um compressor, esse eleva a sua pressão até um valor determinado à realização de trabalho (CORADI, 2011).

O compressor é a máquina responsável por transformar energia mecânica em energia pneumática através da diminuição do espaço físico ocupado pelo ar ou aumento de energia cinética do fluido, gerando o aumento de pressão necessário ao processo. A taxa de compressão geralmente é 1:7, isto é, o ar atmosférico é aspirado a 1 bar e comprimido até 7 bar. (SILVA, 2002).

No momento de compressão do ar, os átomos que o compõe terão menos espaço para transitar, assim, o número de colisões dessas moléculas aumentam significativamente, ocasionando o seu aumento de temperatura. Haja vista que, os componentes e equipamentos de

um sistema pneumático possuem temperatura mínima e máxima de operação para que a vida útil do sistema seja mantida, faz-se necessário o resfriamento do ar comprimido a fim de mantê-lo na temperatura ideal de trabalho durante o seu percurso na linha de distribuição.

Para mais, o ar possui em sua composição química a água em forma de vapor, no qual também passará pelo compressor ao longo do processo de geração do ar comprimido, portanto, ao sofrer variação de pressão e temperatura, o vapor poderá ser condensado na extensão das linhas principal e secundária, podendo gerar perda dos componentes e impossibilidade de aplicação em operações específicas como pintura, pulverizações e transporte de produtos em pó. Nesse viés, o uso de secadores é indispensável para obtenção de um ar limpo e seco. (SILVA, 2002).

Por fim, a depender da aplicação do sistema pneumático, esse pode exigir um grau de pureza acentuado, o que demanda um recorrente controle de contaminação. (METALPLAN, 2017). Para isso, o uso de filtros antes e após o compressor é de suma importância para atingir as premissas de boa qualidade do ar, necessários a um sistema eficiente de produção. A Figura 2 representa esse ciclo e seus componentes.

Figura 2 - Unidade de produção do ar comprimido



Fonte: Silva, (2002).

2.2.1 Compressores

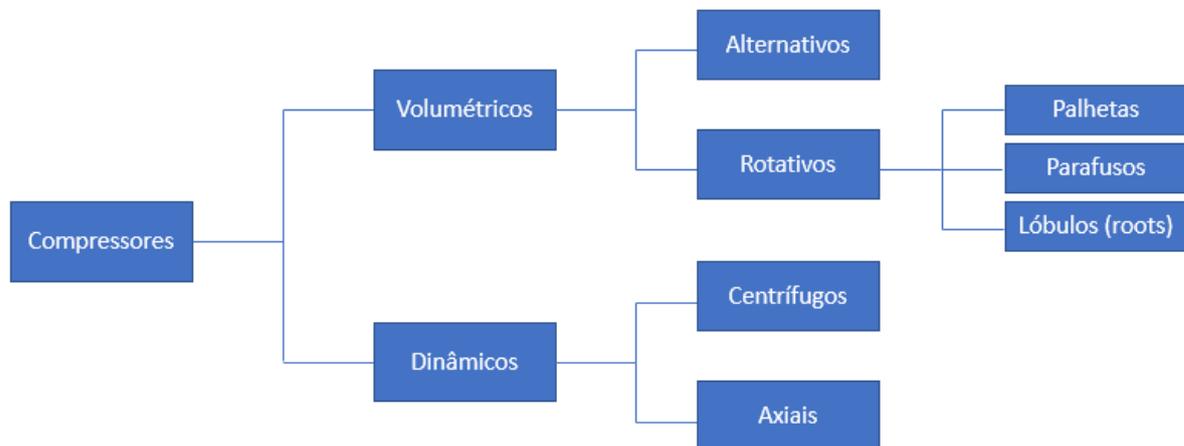
Fialho (2011), define duas principais categorias de compressores pelo princípio de funcionamento: deslocamento positivo (compressores volumétricos) e deslocamento dinâmico.

O primeiro grupo refere-se aos compressores que possuem como princípio de trabalho a conversão da energia mecânica em energia de pressão, através da admissão de um volume de gás definido, seguido da redução do volume ocupado pelo fluido, geralmente por meio de movimentos rotacionais, e conseqüente aumento de pressão do fluido. Por fim, a liberação do gás através de uma válvula de descarga para a linha de distribuição e consumo.

O segundo grupo é composto por compressores que convertem energia cinética em energia de pressão, através da passagem do gás por impulsores dotados de velocidade que compõe um órgão rotativo denominado impelidor. Após o aumento de velocidade, o gás é expelido radialmente e enviado a um difusor, componente que retarda o escoamento do fluido e transforma a energia cinética em entalpia, aumentando a sua pressão e liberando-o para consumo. (PARKER, 2006). Os compressores dinâmicos são denominados também de volume de controle, pois executam o processo de compressão de maneira contínua.

Para cada categoria existem diferentes tipos de compressores que estão dispostos na Figura 3.

Figura 3 – Principais grupos de compressores industriais

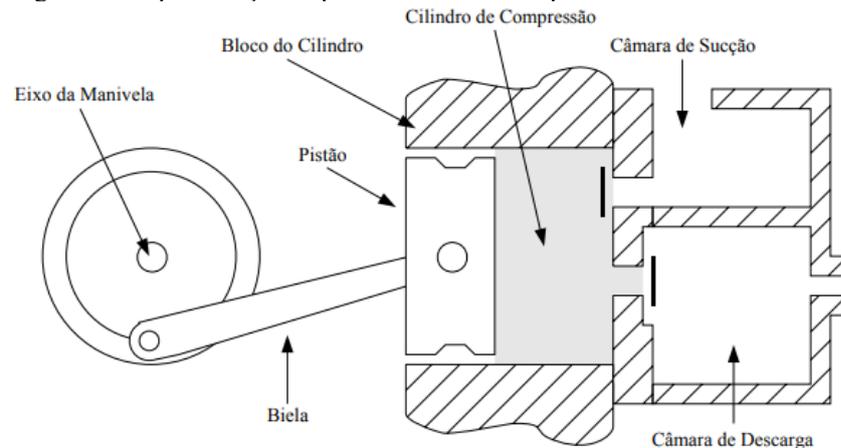


Fonte: Adaptado de Fialho (2004).

2.2.1.1 Compressores alternativos

Os compressores alternativos são equipamentos dotados de um sistema biela-manivela e são compostos por um ciclo de admissão, compressão, descarga e expansão. Nesse ciclo, o movimento rotacional é convertido em movimento translacional através de um êmbolo ligado a uma haste, esse por sua vez está ligada a um virabrequim e é acionado por um motor a combustão ou elétrico. (PARKER, 2006). (Figura 4).

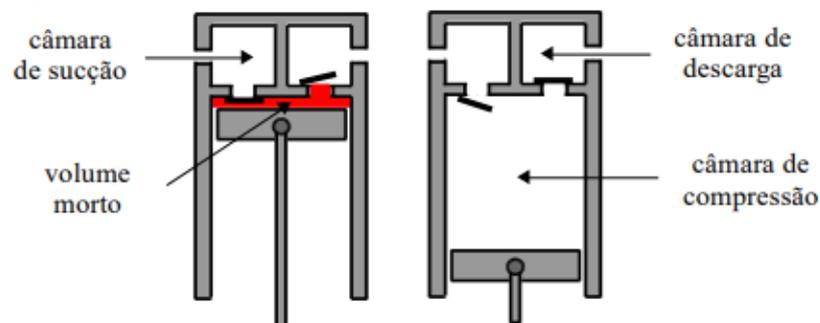
Figura 4 – Representação esquemática de um compressor alternativo



Fonte: Pereira, (2006).

O funcionamento de um compressor alternativo está intimamente relacionado as válvulas de admissão e exaustão, essas estão localizadas na câmara de sucção e câmara de descarga, respectivamente. As válvulas permitem que o fluxo de ar seja admitido e descarregado à medida que o êmbolo se desloca dentro da câmara em sentido igual e oposto ao do cabeçote, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Mecanismo de compressão do compressor alternativo

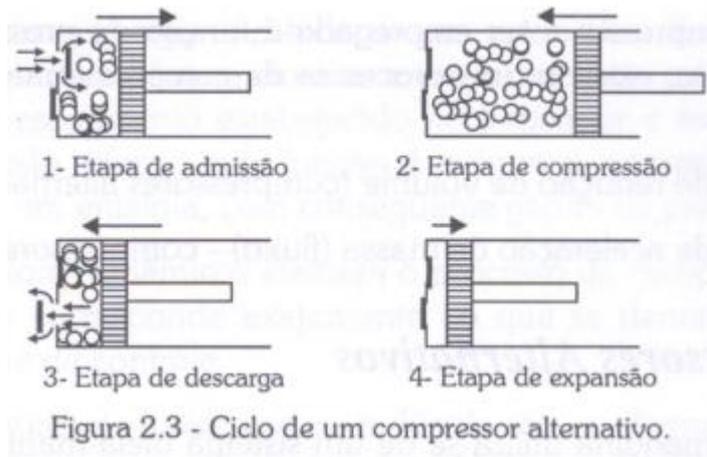


Fonte: Brancher, (2013).

Na etapa de admissão, o pistão inicia o trabalho no ponto morto superior e se desloca até o ponto morto inferior da câmara de compressão, de modo que a pressão na câmara de sucção exceda a pressão interna da câmara, ocorrendo assim, a abertura da válvula para dentro do cilindro, aspirando o gás de trabalho. Na etapa de compressão, a válvula de admissão se fecha e o êmbolo retorna ao ponto morto superior da câmara, durante esse curso, o gás é comprimido e a pressão na câmara de compressão se torna maior que a câmara de descarga, resultando na abertura da válvula de escape. Nesse momento, a etapa de descarga foi iniciada, liberando grande parte do gás presente na câmara, restando apenas um pequeno espaço entre o cabeçote e o pistão, denominado volume morto. Assim, a válvula de descarga se fecha e a de

admissão permanece fechada até que a pressão interna seja suficiente para sua nova abertura. Nesse ponto, o êmbolo retorna para o ponto morto inferior, denominado etapa de expansão, reiniciando o ciclo. A Figura 6 apresenta as quatro fases do funcionamento de um compressor alternativo. (FIALHO, 2011)

Figura 6 – Fases de funcionamento de um compressor alternativo



Fonte: Fialho, (2011).

A junção dessas quatro etapas compõe um estágio, esse é definido como a repetição sistemática das fases de admissão, compressão, descarga e expansão. Dependendo da pressão necessária de trabalho, alguns compressores alternativos possuem um ou mais estágios, reduzindo mais volume de gás e recebendo um ganho considerável de pressão.

Em compressores de múltiplos estágios, devido as repetitivas compressões, há um ganho de temperatura considerável nos seus componentes e no gás de trabalho, logo, faz-se necessário o uso de refrigeradores para diminuir a temperatura do óleo lubrificante, das válvulas e do gás de trabalho, além de evitar a deformação do bloco e do cabeçote. (PARKER, 2006). A Tabela 1 indica a relação pressão x nº de estágios dos compressores.

Tabela 1 – Relação pressão x nº de estágios

Pressão	Nº de estágios
Até 400 Kpa (4bar)	1
De 400 a 1500 Kpa (15 bar)	2
De 1500 a 15000 Kpa (150 bar)	3 ou mais

Fonte: Adaptado de Fialho, (2011).

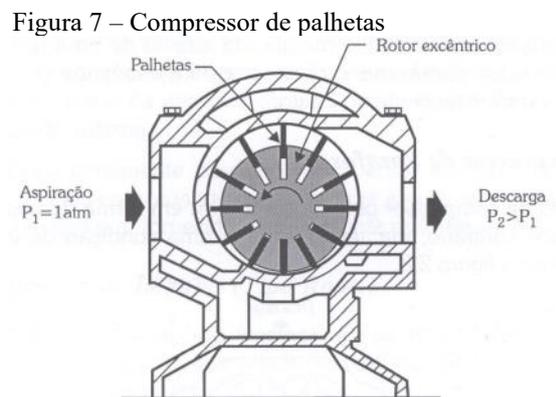
2.2.1.2 Compressores rotativos

Os compressores rotativos utilizam o movimento rotacional do seu eixo mecânico acionado por um motor elétrico, atrelado a elementos internos para succionar e comprimir o gás

de trabalho. (BRANCHER, 2013). Existem três grandes grupos de compressores rotativos: palhetas, parafusos e lóbulos.

2.2.1.3 Compressor de palhetas

Possui um rotor com rasgos radiais que armazenam palhetas retangulares que percorrem todo o seu comprimento. (FIALHO, 2011). O rotor realiza o movimento giratório dentro de uma carcaça e o ar é comprimido durante o curso do rotor, gerando funcionamento contínuo e uniforme, assim, o ar comprimido é livre de pulsação, entretanto, estabelecem pressões de operação menores. (PACCO, 2013). (Figura 7).



Fonte: Fialho, (2011).

À medida que o rotor movimenta, as palhetas se deslocam em conjunto pelo efeito da força centrífuga. O gás é succionado pela lateral de aspiração e posicionado entre as palhetas. Devido a forma do rotor, o volume entre as palhetas e a carcaça diminui, ocasionado a compressão do gás de trabalho e sua posterior descarga.

2.2.1.4 Compressor de parafusos

Estes possuem dois rotores em formato de parafuso helicoidal que se engrenam de forma sincronizada e em sentidos opostos. Os parafusos são denominados rotor fêmea e rotor macho, de formato côncavo e convexo, respectivamente. O rotor fêmea também é chamado de rotor motriz, pois esse aciona o rotor macho por meio do contato direto entre os lóbulos dos parafusos. Nesse compressor, o aumento de pressão ocorre através da redução de volume ocupado pelo gás à medida que se desloca axialmente nos espaços entre os lóbulos dos rotores. A sucção do gás ocorre pela redução de pressão no bocal de entrada, em função do movimento

rotativo dos parafusos, preenchendo os espaços entre os lóbulos, comprimindo o gás até o bocal de saída. (MENDONÇA e DE MELO, 2021). (Figura 8).

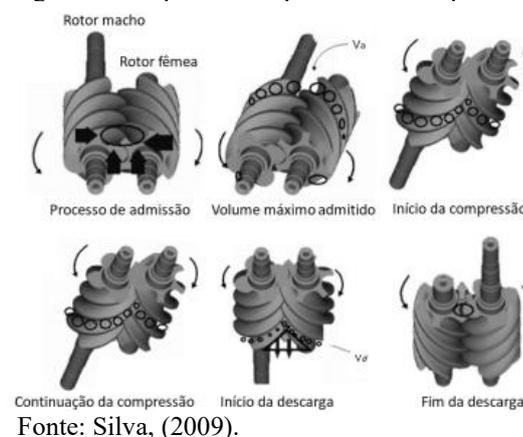
Figura 8 – Compressor de parafusos



Fonte: Pacco, (2013).

O acionamento desses compressores acontece através de motores elétricos ou motores de combustão interna, sendo os primeiros aplicados principalmente em indústrias e os segundos em construções civis, perfurações profundas e mineração. Como o aumento de pressão se dá de forma contínua, pois não possuem válvulas de admissão e descarga que geram impulsos, os compressores de parafuso apresentam baixa vibração e alto range de pressão de trabalho. O rotor macho geralmente possui quatro lóbulos espaçados em 90° e o rotor fêmea possui seis sulcos helicoidais espaçados em 60° . Estes não possuem contato metal-metal, pois há uma camada de óleo lubrificante entre as partes para selagem dos lóbulos, lubrificação das partes móveis e redução do calor no sistema. (TESSARO e MICHELS, 2014). (Figura 9).

Figura 9 – Etapas de compressão do compressor de parafusos



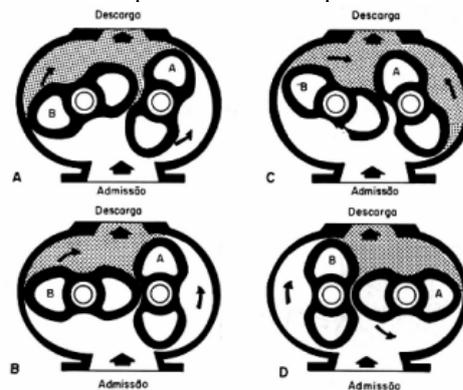
Fonte: Silva, (2009).

2.2.1.5 Compressor de lóbulos

Este compressor é composto por uma carcaça em formato cilíndrico e dois rotores

tangentes entre si e tangentes em relação a carcaça, que rotacionam em sentidos opostos, com uma pequena folga entre os seus pontos de tangência, deslocando o gás no sentido de uma região de baixa pressão para a de maior pressão. O seu acionamento ocorre através de motores elétricos ou de combustão interna. A admissão do gás ocorre pela abertura de sucção e, conforme rotação, o fluido ocupa a câmara de compressão e é posteriormente guiado pelos rotores até a abertura de descarga. Por não ocorrer compressão interna, esses compressores são conhecidos como sopradores roots e possuem a vantagem de operarem por muito tempo sem a necessidade de revisões periódicas. (PIZZA, 2018). (Figura 10).

Figura 10 – Esquema de um compressor de lóbulos



Fonte: Pizza, (2018).

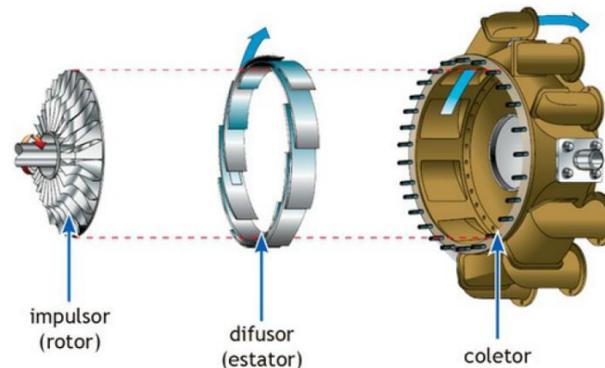
Fialho (2011) pontua que as vazões dos compressores roots são maiores em relação aos compressores alternativos a pistão, porém, as pressões de trabalho obtidas são menores, em torno de 4 bar. Portanto, suas aplicações geralmente se dão em sistemas de transporte, medidores de fluxo e bombas a vácuo.

2.2.1.6 Compressores centrífugos

Constituídos por um impelidor girante acoplado a um ou vários rotores que permitem o escoamento do fluido no sentido radial, esses compressores possuem como característica de trabalho pequenas vazões e grandes pressões de descarga, além de possuírem grande faixa de operação e necessidade de manutenções mais simples, tendo em vista os poucos elementos sujeitos ao desgaste em sua estrutura. Seus principais componentes são: impelidor ou impulsor, difusor e coletor ou voluta. O primeiro é o elemento móvel responsável por transferir energia ao fluido em formato de energia cinética, atingindo altas velocidades. O segundo, recupera a energia cinética transferida ao fluido em forma de entalpia, reduzindo a velocidade do escoamento. E por último, a voluta, carcaça que envolve os componentes,

conforme ilustrado na Figura 11. (DE MOURA, 2008).

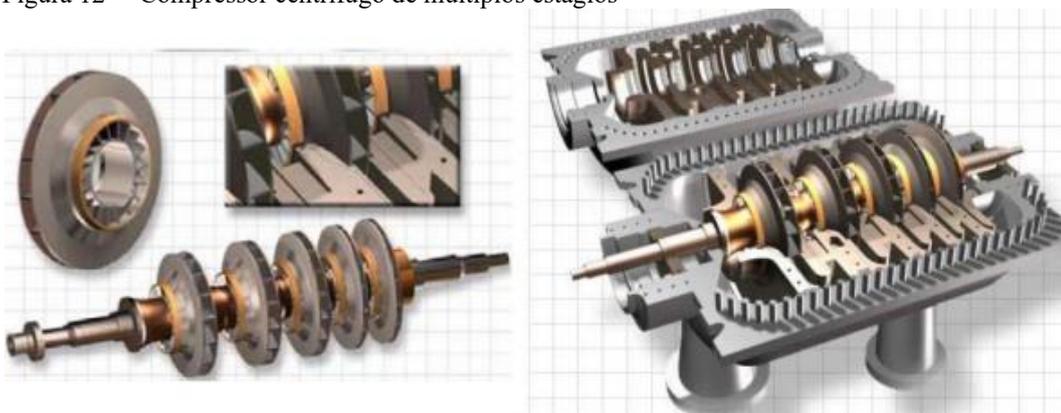
Figura 11 – Principais componentes do compressor centrífugo



Fonte: De Moura, (2008).

Seu funcionamento ocorre pela entrada do fluido através da abertura existente no centro do rotor. Ao atingir as pás do impelidor, o fluido adquire alta velocidade e se desloca para a região periférica do compressor, em função da ação da força centrífuga do rotor. Ao deslocar-se para essa região, o fluido é dirigido aos difusores, no qual reduzem a velocidade do fluxo e conseqüentemente, aumentam a sua pressão. A depender da necessidade da pressão de trabalho, o compressor pode dispor de um ou múltiplos estágios, sendo o segundo mais comumente utilizado em aplicações industriais. (BAUNGARTNER, 2008). (Figura 12)

Figura 12 – Compressor centrífugo de múltiplos estágios



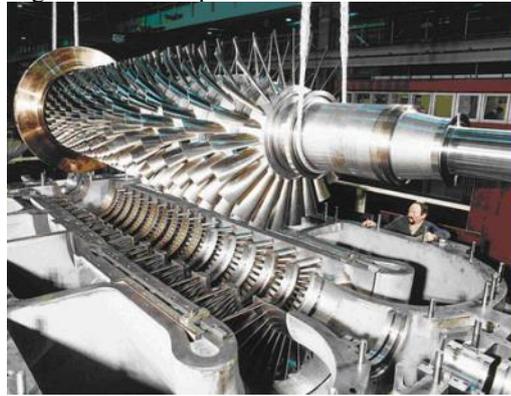
Fonte: Baungartner, (2008).

2.2.1.7 Compressores axiais

Os compressores axiais possuem o sentido e aceleração do fluxo de gás paralelo ao seu eixo, realizado por uma série de palhetas acopladas ao eixo e outra a carcaça do compressor. Suas vazões de operação e eficiência termodinâmica são extremamente elevadas, portanto, suas

aplicações destinam-se a situações específicas, visto que o seu custo de aquisição é mais elevado em relação a outros compressores. Suas razões de pressão são menores quando comparadas a um compressor centrífugo. Devido a complexibilidade do seu projeto e fabricação, as aplicações industriais são reduzidas, pois as condições operacionais devem ser fielmente definidas para que a eficiência operacional máxima do compressor seja atingida. Seus principais componentes são: eixo, palhetas rotativas, palhetas fixas, mancais e selagem entre o eixo e a carcaça. Para o correto funcionamento deste sistema, o compressor deve conter também um sistema de lubrificação forçada nos seus mancais, assim como o monitoramento de vibração e temperatura, além do sistema anti-surge, composto por um controlador e válvula de alívio. Um exemplo de compressor axial está disposto na Figura 13.

Figura 13 – Compressor axial



Fonte: Simões, (2009).

2.2.1.8 Dimensionamento de um compressor

A correta seleção de um compressor é realizada inicialmente a partir da demanda de vazão (volume de ar fornecido) e pressão (regime e trabalho) requeridas para o sistema, considerando o consumo de ar efetivo de todos os equipamentos e futuras instalações. Posteriormente, fatores como nível de pureza, tipo de acionamento, facilidade de locomoção, manutenção, tensão da rede e custo devem ser analisados.

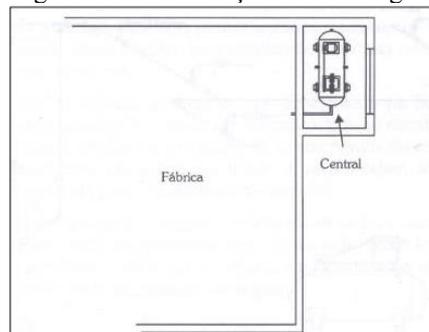
Para aplicações críticas de impurezas, como sistemas de transporte e armazenagem de alimentos, hospitais, laboratórios e respiração humana, o uso de compressores lubrificados exige uma estrutura de segurança redobrada, com a finalidade de manter a qualidade do ar, inclusive em situações de desgaste e ruptura dos separadores de óleo do compressor. (METALPLAN, 2017).

Conforme Parker (2006), para essas situações críticas, é recomendado o uso de compressores não-lubrificadas para eliminar o risco de acidentes com lançamento de óleo. Portanto, a seleção adequada deste equipamento para cada atividade, com base na vazão, pressão e nível de pureza exigidos, resulta em um sistema de ar comprimido mais eficiente e sem riscos de acidentes.

2.2.1.9 Localização da central geradora

A central geradora (compressor) deve ser instalada em uma área externa a fábrica ou ao setor produtivo. O local deve ser devidamente coberto e protegido, com ausência de poeira, fluxo de ar livre e com fácil acesso à manutenção. O local deve estar com temperaturas controladas entre 20 e 25°. Em compressores com potências maiores que 40hp, recomenda-se a utilização de um sistema de ventilação ou refrigeração a água circulante. Para centrais geradoras menores, o aletamento existente no equipamento em conjunto com o fluxo de ar livre, é suficiente para resfriar o seu sistema quando o ar é comprimido. (FIALHO, 2004). Um exemplo de localização da central geradora está representado na Figura 14.

Figura 14 – Localização da central geradora



Fonte: Fialho, (2004).

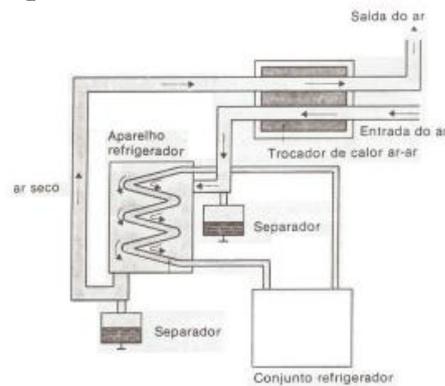
2.2.2 Resfriadores

Após o processo de compressão do ar, sua temperatura encontra-se elevada para os limites ideais dos componentes do sistema. Para evitar a dilatação térmica e consequente aumento do desgaste mecânico do sistema, o uso do resfriador posterior, localizado entre a saída do compressor e o reservatório, é indispensável para diminuição da temperatura e redução de 65% a 80% do vapor de água e vapores de óleo presentes no ar. (DORNELES; MUGGE, 2008).

O resfriador posterior é um trocador de calor que realiza a transmissão térmica através do ar ou água. Este é constituído por um feixe de tubos que transmitem o ar comprimido

(fluido quente) até uma câmara fechada no qual há a passagem do fluido refrigerante (ar ou água) em contato com os tubos. O resfriamento diminui a temperatura do ponto de orvalho do ar, ocorrendo elevada condensação de vapor d'água, no qual é direcionado a um separador de condensado, dotado de um purgador, para drenagem dos contaminantes líquidos do sistema, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Sistema de resfriamento do ar



Fonte: Parker, (2002).

2.2.3 Filtro

O filtro é o dispositivo responsável por eliminar as partículas sólidas e líquidas do ar comprimido, mantendo a sua qualidade dentro dos limites permissíveis de cada aplicação e garantindo a vida útil dos componentes do sistema. Esse é dotado de acessórios como purgadores e manômetros indicadores da perda de carga do elemento filtrante. O filtro a ser instalado deverá ser designado conforme necessidade do processo e condições atmosféricas locais, baseado na quantidade de partícula por milhão (ppm) para remoção de óleo e a micra (μ) para remoção de partículas do ar. A Tabela 2 representa os tipos de filtros e sua capacidade de remoção.

Tabela 2 – Modelos de filtros

Tipo de filtro	Finalidade	Remoção de óleo (ppm)	Remoção de partículas (μ)
DD	Filtro coalescente para proteção geral	0,1	1
DDp	Filtro de partículas para proteção contra poeiras	-	1
PD	Filtro coalescente de grande eficiência	0,01	0,01
PDp	Filtro de partículas de grande eficiência para proteção contra poeiras	-	0,01
QD	Filtro de carvão ativado para remoção de vapores de óleo e odores	0,003	-

Fonte: Adaptado de Atlas Copco, (2016).

Metalplan (2010) cita três pontos essenciais para instalação do filtro: anterior ao secador, posterior ao secador e no ponto de consumo.

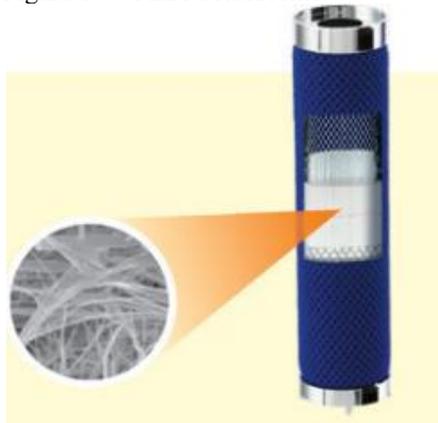
Anterior ao secador, denominado pré-filtro, visa reter as partículas sólidas e líquidas que não foram totalmente drenadas pelo purgador do resfriador posterior, protegendo o secador e melhorando sua eficiência, visto que esse não consumirá energia para resfriar o condensado advindo do resfriador.

Posterior ao secador, visa mitigar a umidade residual não drenada pelo separador mecânico contido no secador e conter os sólidos não eliminados no pré-filtro. No ponto de consumo, o filtro retém as partículas contaminantes presentes ao longo das linhas de distribuição do ar comprimido, evitando a contaminação na aplicação final do processo e eliminando os agentes abrasivos que geram desgaste mecânico nos equipamentos. Caso o sistema de produção não possua tratamento do ar comprimido, é indispensável o uso de filtros no ponto de utilização do ar.

Metalplan (2010) descreve os dois principais filtros modernos para ar comprimido: coalescentes e adsorvedores.

O primeiro possui a retenção mecânica e a coalescência como princípio de funcionamento. A retenção mecânica obstrui a passagem do contaminante sólido por meio de um elemento filtrante, uma tela no qual possui poros menores do que os particulados, permitindo apenas a passagem do ar comprimido. Este processo é chamado de intercepção direta, a primeira fase da coalescência. (Figura 16)

Figura 16 – Filtro coalescente

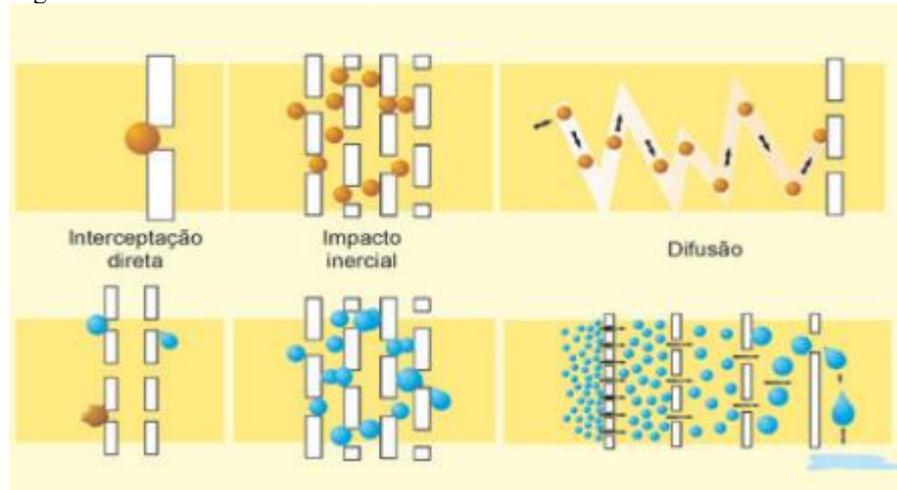


Fonte: Metalplan, (2010).

A segunda fase da coalescência, denominado impacto inercial, trata-se do processo de colisão entre as partículas e o elemento filtrante, em função da sua inércia. A terceira e última fase, difusão, ocorre o movimento e junção de moléculas gasosas e partículas pequenas.

A norma ISO-8573 define como coalescência a ação pela qual partículas líquidas em suspensão unem-se para formar partículas maiores. (Figura 17)

Figura 17 – Processo de coalescência



Fonte: Metalplan, (2010).

Conforme mostrado acima, ao obter partículas maiores de contaminantes, essas atravessam o meio filtrante e são direcionadas por gravidade ao purgador do filtro, localizado na parte baixa da carcaça do dispositivo.

O segundo grupo, filtros adsorvedores, são aplicados na remoção de vapores de hidrocarbonetos (óleo) e são instalados após o filtro coalescente para evitar a contaminação líquida. Seu meio filtrante é o carvão aditivado. Conforme norma ISO-8573/2.3 a adsorção é definida como a atração e adesão de moléculas de gases líquidos na superfície de um sólido.

Pereira (2009) relata que a grande área superficial, alto grau de reatividade da superfície, tamanho dos poros e resistência mecânica contribuem para as excelentes propriedades adsorventes do carvão ativado. O processo de adsorção é realizado quando a molécula líquida (adsorvato) é adsorvido pelo sólido (adsorvente). Os contaminantes de hidrocarbonetos, adsorvatos, são retidos na superfície do carvão aditivado, adsorvente, através de forças como pontes de hidrogênio e interações químicas dipolo-dipolo.

2.2.3 Secadores

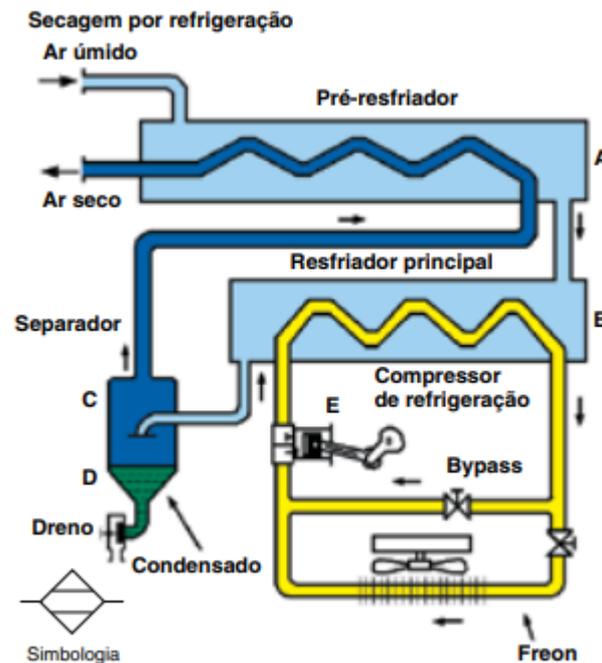
Responsável por eliminar a umidade do ar e diminuir o seu ponto de orvalho, os secadores minimizam os impactos negativos que os vapores de água podem vir a causar no sistema de ar comprimido, como oxidação e desgaste prematuro dos componentes, arraste de partículas sólidas, desgaste mecânico, alto índice de manutenção e impossibilidade de aplicação de pintura e pulverização no processo. A aquisição de um secador pode chegar a 25% do valor total de implementação do sistema de ar comprimido, entretanto, seu custo é rapidamente

compensado quando levado em consideração os acessórios e peças que são refugados durante a produção. (DORNELES; MUGGE, 2008). Os principais tipos de secagem estão dispostos a seguir.

2.2.3.1 Secagem por refrigeração

Neste tipo de secagem, o ar comprimido realiza a desumidificação através de um trocador de calor do tipo ar/ar ou ar/água, reduzindo sua temperatura de orvalho em até 3°C, garantindo a condensação dos vapores de água e óleo presentes no sistema. É um dos meios de secagem mais utilizados industrialmente, o processo inclui duas zonas de resfriamento: pré-resfriador e resfriador principal. Na primeira fase, o ar comprimido adentra a zona do pré-resfriador, no qual ocorre a transferência de calor do ar comprimido (fluido quente) com o ar comprimido já resfriado e seco (fluido frio). Em seguida, o ar comprimido perpassa a zona de resfriamento principal, realizando troca térmica com um fluido refrigerante, diminuindo o seu ponto de orvalho e gerando contaminantes líquidos que são direcionados a um separador, local onde ocorre a drenagem do condensado e separação do ar seco. Esse voltará ao circuito para resfriar o ar quente na zona do pré-resfriador. Após a zona do resfriamento principal, deve ocorrer uma eficiente separação dos condensados através de separadores, filtros coalescentes e purgadores automáticos, evitando que os contaminantes líquidos retornem ao sistema. Além disso, ao entrar no secador, recomenda-se que o ar comprimido esteja em temperatura ambiente para minimizar o custo energético da refrigeração. (MOREIRA, 2012; METALPLAN, 2010). Na Figura 18 há disposto a representação de secagem por refrigeração

Figura 18 – Processo de secagem por refrigeração

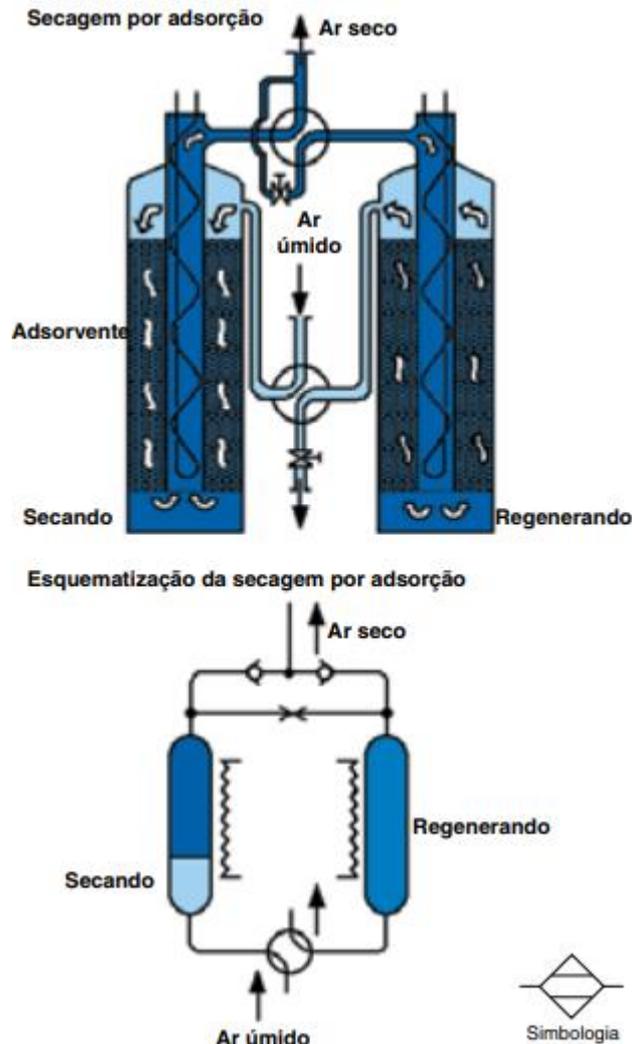


Fonte: Parker, 2006.

2.2.3.2 Secagem por adsorção

A adsorção é o processo de atração e acondicionamento das moléculas de gases e líquidos em um material adsorvedor, poroso e granulado, como sílica gel, alumina aditivada e H-156. Alguns secadores utilizam diferentes tipos de materiais de adsorção em seu leito de secagem para atingir a temperatura de orvalho necessária ao processo. Geralmente, há disposto no sistema dois leitos (cilindros verticais), um para secagem do ar comprimido e outro para regeneração quando o primeiro estiver saturado. Por meio de válvulas direcionais, o ar comprimido perpassa o primeiro cilindro para retenção da umidade. Através do painel de controle dos ciclos de regeneração e adsorção, as válvulas direcionais são revertidas e o fluxo de ar comprimido é direcionado para o segundo leito. Dessa forma, o cilindro que anteriormente realizava o processo de secagem, terá seu material de adsorção regenerado. O processo de regeneração ocorre por meio da injeção de ar quente no material adsorvedor, na direção oposta ao do ar comprimido, permitindo a liberação de água para drenagem. Ademais, neste tipo de secagem, os vapores do ar comprimido não são condensados e a sua temperatura do ponto de orvalho pode chegar até -100°C , gerando alto consumo energético em relação aos secadores por refrigeração. Apesar disso, o sistema de secagem por adsorção é o mais eficiente para retenção de umidade. (SILVA, 2002; PARKER 2006; DORNELES; MUGGE, 2008; METALPLAN, 2010; MOREIRA, 2012). (Figura 19).

Figura 19 – Processo de secagem por adsorção



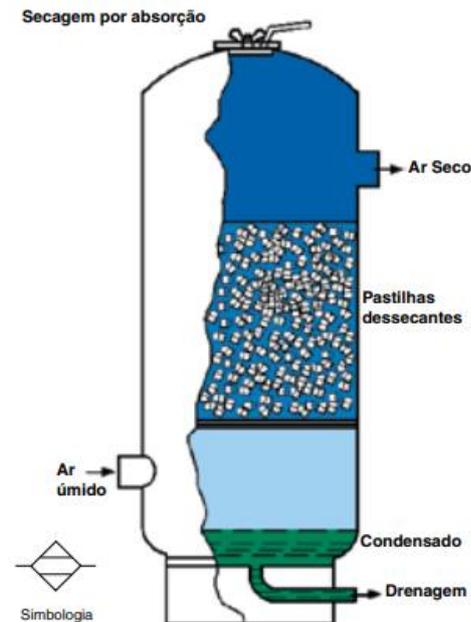
Fonte: Parker, 2006.

2.2.3.3 Secagem por absorção

Possui como princípio de funcionamento a absorção da umidade do ar comprimido através de substâncias higroscópicas que podem ser insolúveis ou deliquescentes. Quando insolúveis, reagem quimicamente com o vapor d'água, sem condensação. Quando deliquescentes, o mesmo processo ocorre com liquefação. Denominado pastilhas dessecantes ou agente de secagem, as principais substâncias absorvedoras utilizadas são o cloreto de cálcio e cloreto de lítio. Esses reagem quimicamente com as células de água e óleo, atraindo e absorvendo a umidade para os poros do material, formando um composto de elemento secante e água. Esse deve ser removido periodicamente do absorvedor, logo, o elemento secante é consumido e deverá ser reabastecido, caso contrário, o processo se tornará ineficiente. Dessa forma, essa secagem apresenta alto custo de manutenção operacional, gerado pela constante

necessidade de troca do composto formado entre a umidade e o material higroscópico. O ponto de orvalho alcançado é de no mínimo 10°C e possui média eficiência na retenção dos contaminantes líquidos. A umidade absorvida é descarregada na parte inferior do invólucro do sistema, onde são drenados e descartados corretamente. (SILVA, 2002; PARKER, 2006; MOREIRA, 2012). (Figura 20).

Figura 20 – Processo de secagem por absorção



2.3 Reservatório de ar comprimido

O reservatório é um vaso de pressão que, além de acondicionar o ar, é responsável por amortecer as flutuações de pressão do sistema quando o ar está sendo descartado na atmosfera, estabilizando-o e evitando que o compressor seja ligado e desligado repetida vezes.

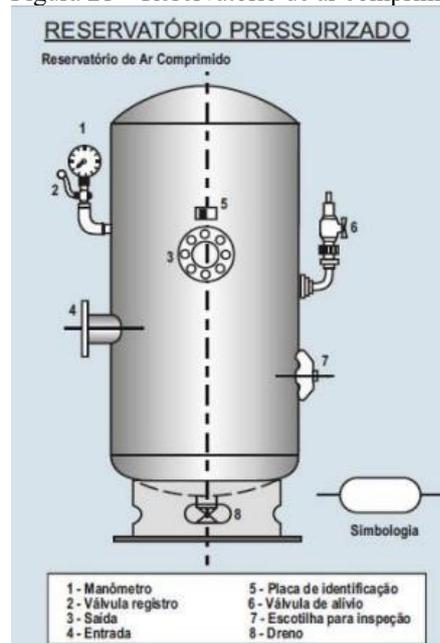
Enquanto houver ar comprimido em estoque no reservatório, o compressor não permanece em funcionamento, minimizando o custo energético do sistema. O reservatório também atua como um resfriador do ar, através da troca térmica entre o fluido e a sua área de superfície, resultando na condensação da umidade dos vapores de água e óleo, no qual é separado e drenado regularmente. (TAFFAREL, 2015; BOSCH, 2008).

No Brasil, os reservatórios são fabricados conforme a norma BNB 109 da ABNT, no qual pontua que, nenhum reservatório deve operar com uma pressão maior do que a pressão máxima de trabalho permitida, em exceção quando houver o uso da válvula de segurança em descarregamento do fluido, permitindo a operação com até 6% da pressão máxima.

Deve existir cautela na aquisição dos reservatórios, atentando-se para modelos projetados, construídos e testados conforme a norma NR13, pois vasos não conformes são as causas de inúmeros acidentes com colaboradores industriais anualmente. Além disso, os vasos de pressão precisam possuir seus acessórios mínimos obrigatórios, manômetro e válvula de segurança, e receber em sua estrutura interna e externa uma proteção anticorrosiva que varia conforme sua exposição a oxidação. (DORNELES; MUGGE, 2008; METALPLAN, 2010).

As conexões e aberturas de inspeção, assim como os drenos e válvulas do reservatório, devem ser de fácil acesso e estarem localizados na sombra, para maior agilidade na condensação dos vapores. O reservatório deve ser instalado fora da casa dos compressores e o dreno deve estar localizado no seu ponto mais baixo para facilitar a remoção dos contaminantes líquidos do sistema. (PARKER, 2006). A Figura 21 apresenta uma ilustração de um reservatório pressurizado.

Figura 21 – Reservatório de ar comprimido



Fonte: Parker, 2006.

Metalplan (2010) e Parker (2006) pontuam que, para calcular com agilidade o volume de um reservatório de ar, pode-se utilizar os seguintes equacionamentos:

- Para compressores de pistão, o volume do reservatório corresponde à vinte por cento (20%) da vazão total do sistema em m^3/min .
- Para compressores rotativos, o volume do reservatório corresponde á dez por cento (10%) da vazão total do sistema em m^3/min .

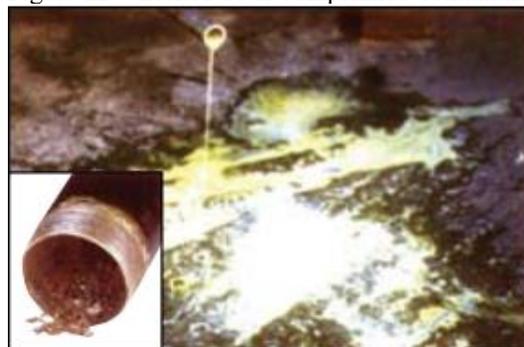
Para um cálculo mais preciso, deve ser utilizado fórmulas que consideram a vazão de ar requerida pelo processo, em um período de intervalo em função do declínio máximo de pressão neste tempo. O ar requerido total do sistema deve ser dividido em dois vasos de pressão com mesma capacidade. O primeiro deve ser instalado após o compressor e antes do pré-filtro, e o segundo após o pós filtro. Esse arranjo possibilita o armazenamento do ar úmido e ar puro e seco para ajuste do ciclo de carga, alívio dos compressores e amortecimento de pulsações.

2.4 Unidade de conservação – Lubrifil

O ar atmosférico é uma combinação de gases, vapores de água e poeira. Sua composição compreende principalmente a mistura de oxigênio e nitrogênio, componentes que possuem água, óleo e partículas sólidas. A depender do compressor, o ar também pode ser contaminado com o seu óleo lubrificante e por particulados gerados no desgaste mecânico dos componentes móveis do sistema. A ferrugem presente na tubulação da linha de distribuição poderá ser arrastada junto ao ar comprimido. A junção desses contaminantes gera uma emulsão ácida e abrasiva que compromete a performance do sistema pneumático. (PARKER, 2006).

A condensação dos vapores de água presente no ar comprimido dependerá do ponto de orvalho atingido durante o processo de secagem. A precipitação da água ocorre principalmente no resfriador e nas linhas de distribuição, no qual acumulam-se com outros contaminantes e provocam efeitos indesejados como obstrução de orifícios, desgaste e deterioração de vedações, erosão nos componentes pneumáticos, baixa eficiência no processo, ferrugem na tubulação, imperfeições em processo de pintura, erro de leitura de instrumentos e aumento do custo de produção devido as manutenções frequentes nos equipamentos. A Figura 22 apresenta os efeitos citados.

Figura 22 – Efeitos do ar comprimido contaminado no sistema



Fonte: Parker, 2006.

Para reduzir as consequências mencionadas anteriormente, a unidade de tratamento/conservação do ar comprimido, é alocada antes do ponto de consumo. Esta assegura que o ar comprimido esteja nas condições ideais de trabalho, ampliando a vida útil dos componentes, melhorando o desempenho do sistema e possibilitando atingir o ponto de pressão de alimentação necessária ao acionamento do automatismo.

O bom funcionamento do sistema pneumático depende, antes de tudo, da filtragem, da umidade, da pressão de alimentação da máquina e da lubrificação das partes móveis, variáveis trabalhadas no conjunto lubrifil, composto por um filtro, válvula reguladora de pressão e um lubrificador. (BORTOLIN, 2014). (Figura 23).

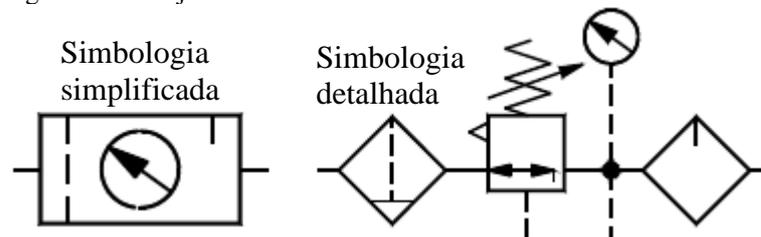
Figura 23 – Unidade de conservação pneumática - Lubrifil



Fonte: Parker, 2001.

A Figura 24 apresenta o conjunto Lubrifil através da sua simbologia pneumática.

Figura 24 – Conjunto Lubrifil



Fonte: Fialho, 2004.

2.5.1 Filtro

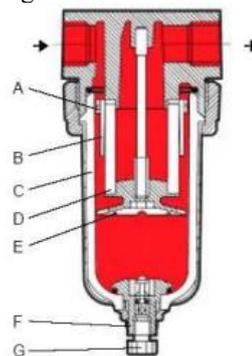
Conforme citado anteriormente, o filtro é o componente responsável por reter as partículas sólidas dispersas no fluxo de ar comprimido, inclusive os contaminantes condensados. O princípio de funcionamento do filtro se dá pela ação da força centrífuga seguido

da passagem do ar através de um elemento filtrante, sendo este composto de bronze sinterizado ou malha de nylon. (TAFFAREL, 2015). (Figura 25)

Dorneles; Mugge (2008) e Parker (2006), descrevem o funcionamento do filtro com os seguintes pontos:

- O ar comprimido adentra o filtro e flui através do defletor superior (A).
- Pela ação da força centrífuga, os particulados e condensados são separados e lançados contra a parede do copo (C), em seguida, por gravidade, acumulam-se na parte inferior do componente.
- O anteparo (B), garante que o ar se desloque sem passar pelo elemento filtrante.
- O defletor (E) delimita o espaço entre a corrente de ar e os contaminantes sólidos e líquidos, evitando que retornem ao fluxo. Este material deve ser regularmente drenado para evitar o risco de novo contato com a corrente de ar.
- Após queda dos particulados, o ar comprimido percorre o elemento filtrante (D) e as suas menores partículas são retidas. A drenagem dos contaminantes pode ser realizada por um dreno manual (F), no qual é acionado por uma manopla (G).

Figura 25 – Filtro



- A - Defletor Superior
- B - Anteparo
- C - Copo
- D - Elemento Filtrante
- E - Defletor Inferior
- F - Dreno Manual
- G - Manopla

Fonte: Dorneles; Mugge, (2008).

2.5.2 Válvula reguladora de pressão

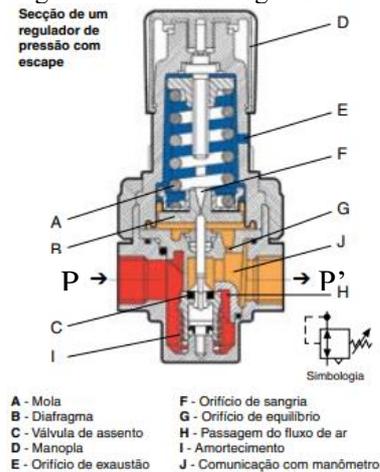
Geralmente um sistema de ar comprimido atende à demanda de operação de diversos equipamentos de forma simultânea, gerando um pico de consumo na rede. Em função disso, ocorre constante queda da pressão de trabalho. Para tanto, a válvula reguladora de pressão mantém a pressão de trabalho (pressão secundária) constante, independente da pressão variável da rede (pressão primária) e do consumo de ar. A válvula apenas funciona quando a pressão secundária estiver inferior a pressão de alimentação da rede (pressão primária), logo, independente do pico de pressão, a pressão primária sempre deve ser maior que a secundária. (SILVA, 2002; PARKER, 2006; DORNELES; MUGGE, 2008; TAFFARAEL, 2015).

Conforme Parker (2006), existem dois tipos de válvulas reguladoras de pressão, com e sem escape. O funcionamento da primeira ocorre da seguinte maneira:

1. O ar comprimido entra por (P) e pode sair por (P') apenas se a válvula de assento estiver aberta.
2. Girando totalmente a manopla (D) no sentido anti-horário (mola sem compressão), o conjunto da válvula de assento (C) estará fechado.
3. A secção de passagem regulável está situada abaixo da válvula de assento (C).
4. Girando a manopla no sentido horário, aplica-se uma carga numa mola calibrada de regulagem (A) fazendo com que o diafragma (B) e a válvula de assento (C) se desloquem para baixo, permitindo a passagem do fluxo de ar comprimido para a utilização (H).
5. A pressão sobre o diafragma (B) está balanceada através o orifício de equilíbrio (G) quando o regulador está em operação.
6. A pressão secundária, ao exceder a pressão regulada, causará, por meio do orifício (G), ao diafragma (B), um movimento ascendente contra a mola de regulagem (A), abrindo o orifício de sangria (F) contido no diafragma.
7. O excesso de ar é jogado para atmosfera através de um orifício (E) na tampa do regulador (somente para reguladores com sangria).

A Figura 26 representa uma válvula reguladora de pressão e seus principais componentes.

Figura 26 – Válvula reguladora de pressão



2.5.3 Lubrificador

Responsável por lubrificar as partes móveis do sistema para minimizar o desgaste mecânico, a força de atrito causada pelos movimentos relativos e a corrosão dos aparelhos, esse componente funciona com base no princípio de Venturi. Devido a diferença de pressão entre o local pulverizador e a pressão de estrangulamento do bocal, o óleo lubrificante é sugado do reservatório e entra em contato direto com a corrente de ar. (DORNELES; MUGGE, 2008; TAFFARAEL, 2015).

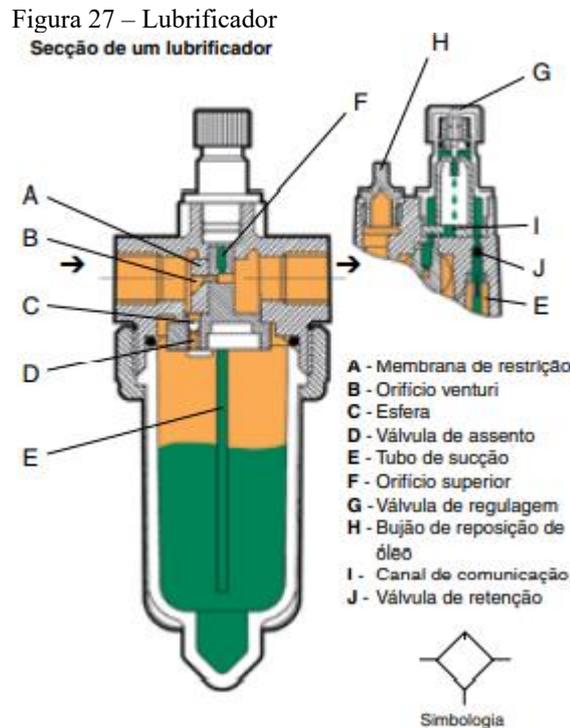
A lubrificação do ar apenas ocorre quando há fluxo o suficiente para ocasionar a depressão responsável por sugar o óleo do reservatório, portanto, os valores de vazão necessários para o ideal funcionamento do componente, conforme definição do fabricante, devem ser levados em consideração no momento de escolha do componente.

Geralmente a composição do óleo é a base de petróleo, entretanto, óleos sintéticos do tipo parafínicos e naftênicos estão sendo incrementados nos sistemas pneumáticos.

- Parafínicos: alto índice de viscosidade, alta estabilidade contra a oxidação, menor tendência à formação de vernizes, alto ponto de fluidez e baixa densidade.
- Naftênicos: Baixo índice de viscosidade, menor estabilidade contra oxidação, maior tendência à formação de vernizes, ponto de fluidez mais baixo e densidade elevada. Apesar disso, o seu poder solvente e o tipo de carbono formado ao queimar é menos duro que o formado pelos parafínicos.

A lubrificação deve ser realizada de forma controlada para não gerar obstáculos na passagem do ar e outros problemas nas guarnições. A limpeza do componente deve ser com algodão e a lavagem com querosene. Além disso, boas práticas como evitar o preenchimento

do copo com óleo, verificar o estado das guarnições, averiguar se a extremidade do filtro não está entupida e evitar forçar o parafuso responsável pelo controle de fluxo de óleo, garante a o prolongamento da vida útil do componente e o seu bom funcionamento. (PARKER; 2006). (Figura 27).



Fonte: Parker, (2006).

2.5 Distribuição do ar comprimido

A rede de ar comprimido consiste no conjunto de todas as tubulações ramificadas do reservatório até a unidade de preparação, que juntas, orientam o fluxo do ar até o ponto de consumo. (PARKER, 2006). Suas funções são:

- Interligar o sistema de produção do ar comprimido com os equipamentos e máquinas consumidoras.
- Atuar como um reservatório para atendimento às circunstâncias do processo.

Ainda conforme este autor, para obter um sistema de distribuição ideal, os seguintes pontos devem ser atendidos:

- Baixa queda de pressão entre a geração e o consumo;
- Ausência de escape de ar;
- Capacidade de separação de condensado.

Além disso, o sistema pneumático exige manutenção regular, portanto, o uso das linhas de distribuição dentro de paredes ou cavidades devem ser evitadas pois dificulta a detecção de vazamentos do ar comprimido. Estes causam consideráveis perdas de carga e reduzem a eficiência operacional e energética do sistema. (SILVA, 2002).

2.5.1 Materiais

Os materiais da tubulação da rede de distribuição, tanto a linha principal, secundária e de alimentação podem ser compostas de aço preto ou galvanizado (ASTM A 120 SCHEDULE 40), aço inoxidável, alumínio, cobre, latão e plástico de engenharia, optando sempre por materiais de alta resistência a oxidação, boa resistência mecânica, boa flexibilidade e elevada força de ruptura. (TAFFARAEL, 2015; FIALHO, 2004).

Atualmente o tubo de cobre é utilizado apenas em aplicações que exigem alta resistência a temperatura e pressão, sendo substituídos por tubos sintéticos que apresentam propriedades mecânicas semelhantes. (PARKER 2006).

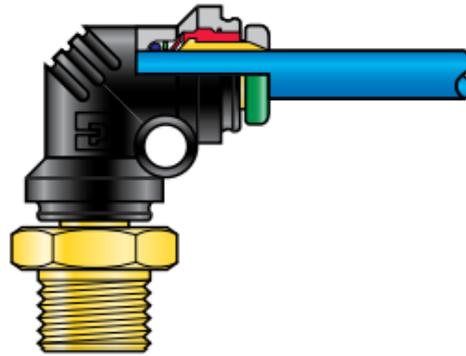
2.5.1 Conexões, acessórios e elementos de fixação

As conexões do sistema pneumático como roscas, soldas, flanges e acoplamentos, devem oferecer baixo tempo de montagem, dimensões compactas, máxima área de passagem para o fluido e raio de curvatura longo, minimizando as chances de queda de pressão no sistema. Suas vedações, compatibilidade com diferentes fluidos e boa durabilidade, são características importantes para composição das linhas.

As uniões roscadas são mais aplicadas devido ao baixo custo e facilidade de montagem. Cabe ressaltar que, para estas conexões, faz-se necessário o uso de fita Teflon, para evitar vazamentos devido as imperfeições de fabricação das roscas. Recomenda-se o seu uso para tubulações de até três polegadas, para dimensões maiores, as uniões soldadas são mais usuais. Essas possuem baixo risco de vazamento comparada a roscada, porém apresentam maior custo e maiores cuidados de montagem, como retirada das escamas de óxido do interior do tubo e aplicação do cordão de solda de maneira uniforme.

Para instalações com alto grau de confiabilidade, recomenda-se o uso de conexões flangeadas e soldadas. Um novo tipo de conexão que atende a todas as necessidades citadas acima, além de controle e instrumentação, são as conexões semelhantes a um engate rápido, conforme mostrado na Figura 28. (PARKER, 2006).

Figura 28 – Conexão de engate rápido

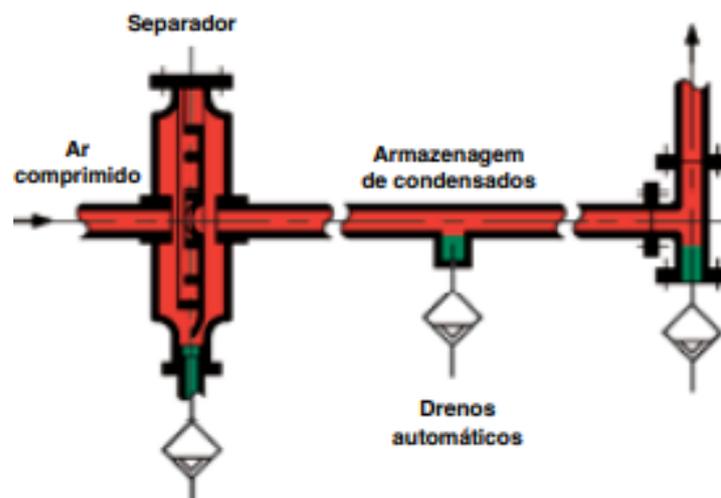


Fonte: Parker, (2006).

Os principais acessórios compostos na linha pneumática são as válvulas de fechamento da linha e drenos manuais ou automáticos. As válvulas permitem a divisão das seções, principalmente em grandes redes de distribuição, viabilizando o isolamento para inspeções, modificações e manutenções, sem necessidade de paralisação do trabalho e ou produção. Para tubulações de até duas polegadas de diâmetro, utiliza-se a válvula esfera, acima desta dimensão, as válvulas do tipo gaveta são mais usuais.

Os drenos manuais ou automáticos garantem a retirada da umidade do sistema e devem ser instalados ao longo da linha principal, distanciados de 20m a 30m um do outro, nos pontos baixos da tubulação, em fim de linha e onde houver elevação desta. (DORNELES; MUGGE, 2008; SGANZERLA, 2018; PARKER, 2006). (Figura 29).

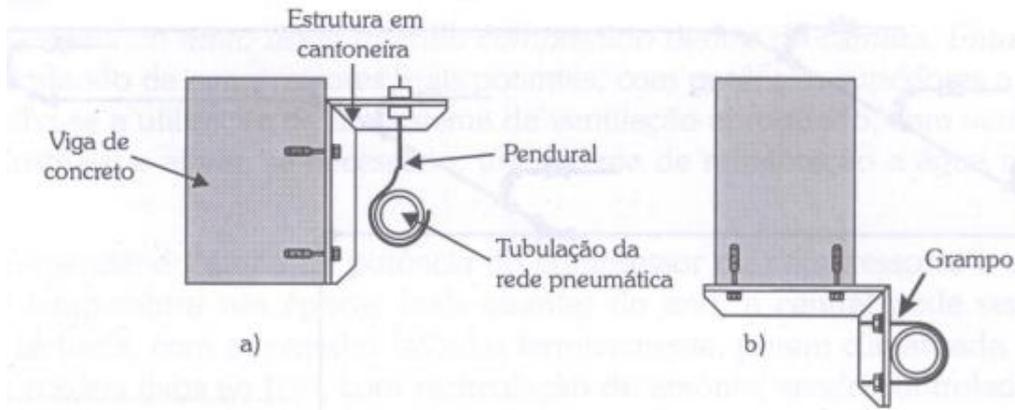
Figura 29 – Drenagem do sistema pneumático



Fonte: Parker, (2006).

As redes de distribuição do ar comprimido geralmente são aéreas e fixadas às paredes, vigas ou forros através de ferragens como tirantes, pendurais, cantoneiras, perfis etc, conforme representado na Figura 30.

Figura 30 – Fixação da tubulação a) por pendurais, b) por grampo

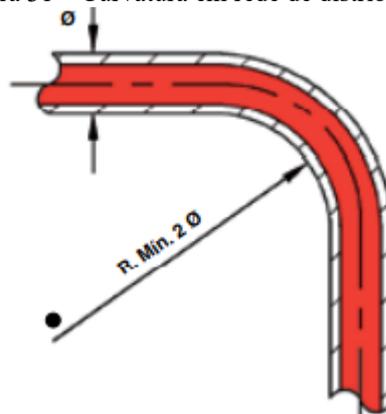


Fonte: Fialho, (2004).

2.5.1 Curvatura, inclinação, cor e tomadas de ar

As curvas das redes de distribuição devem possuir o maior raio possível para minimizar perdas por turbulência. O uso de cotovelos de 90° devem ser evitados e a curva mínima deve apresentar curvatura interior com raio mínimo equivalente a duas vezes o diâmetro externo do tubo, esquematizado na Figura 31.

Figura 31 – Curvatura em rede de distribuição

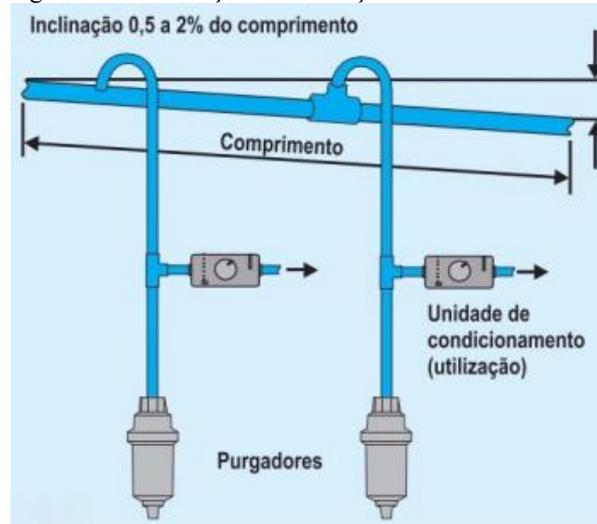


Fonte: Parker, (2006).

As tubulações devem ser instaladas com uma inclinação de 0,5 a 2% em função do comprimento do tubo no sentido de direção do fluxo, evitando que as impurezas e condensados

fiquem armazenados e possam ser direcionados e drenados com facilidade. As tomadas de ar devem ser elaboradas pela parte superior da tubulação principal para evitar os problemas de contaminantes líquidos citados anteriormente. Nesta tomada, a unidade de condicionamento deve ser instalada acima do purgador que estará ao final da linha. Além disso, conforme o boletim NB-54/80 da ABNT, toda a rede pneumática deve ser pintada em azul, de acordo com a classificação 2.5PB 4/10 do sistema Munsell. (BORTOLIN, 2014; FIALHO, 2004; PARKER, 2006). (Figura 32)

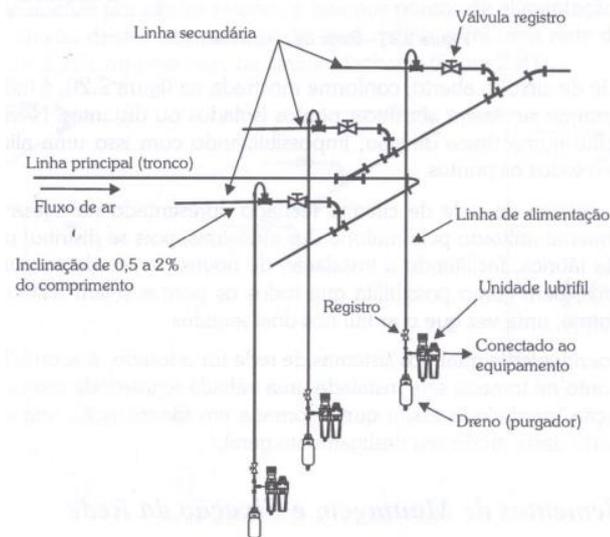
Figura 32 – Inclinação da tubulação e tomadas de ar



Fonte: Sganzerla, (2018).

A Figura 33 representa um trecho de uma rede de distribuição contendo conexões, acessórios e demais componentes das linhas principais e secundárias.

Figura 33 – Componentes de uma rede pneumática



Fonte: Fialho, (2004).

2.5.1 Layout

A definição do *layout* do sistema possibilita encontrar a sua melhor performance, pois apresenta a rede principal, suas ramificações, pontos de consumo, incluindo futuras derivações, posição das válvulas de fechamento, conexões, curvaturas, drenos etc.

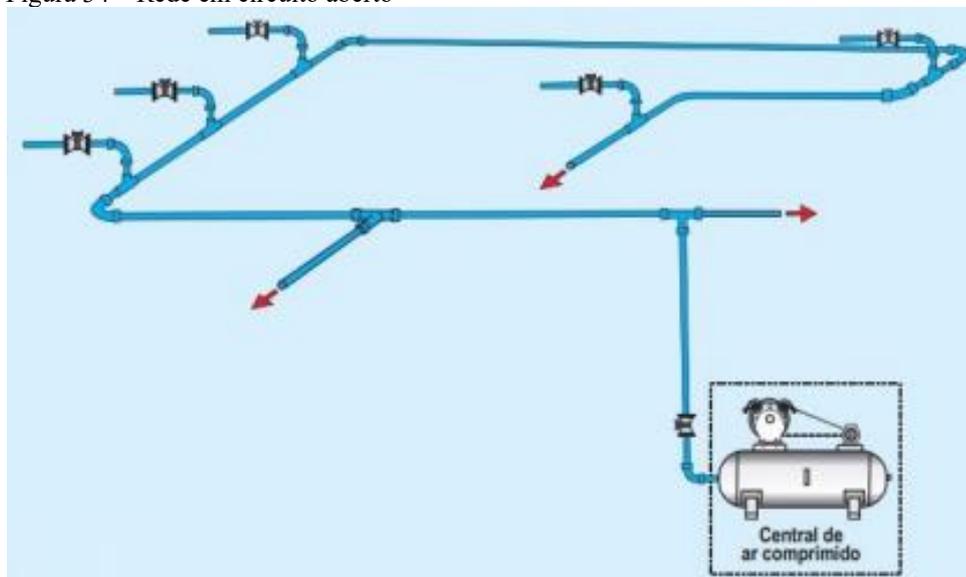
O *layout* deve ser construído em desenho isométrico ou escala, permitindo a visualização de todo o comprimento das tubulações em todas as suas seções. Dessa forma, pode ser definido o menor percurso da unidade geradora até o consumo, minimizando as perdas de carga e gerando economia na quantidade de material requisitado para instalação da unidade.

2.5.2 Rede em circuito aberto

Indicado quando a distância entre o compressor e o ponto de consumo é considerável. Nesta rede, o ar comprimido flui em uma única direção, a alimentação dos pontos de consumo dificilmente será de maneira uniforme, exemplificado na

Figura 34. (SGANZERLA, 2018; BORTOLIN, 2014).

Figura 34 – Rede em circuito aberto



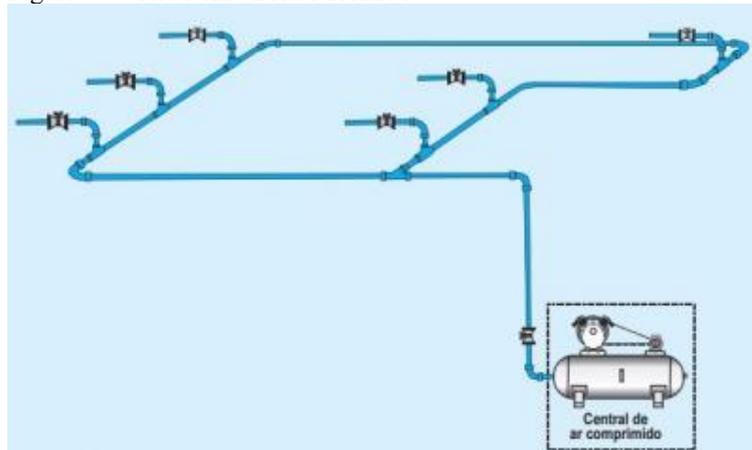
Fonte: Silva, (2002).

2.5.3 Rede em circuito fechado

Consiste na construção de um anel principal que distribui o ar para os equipamentos nos dois sentidos, por isso, esse sistema mantém a pressão constante mesmo em picos de

consumo para algum ponto do circuito. Entretanto, devido a isso, dificulta a separação de unidade do sistema. É o tipo de distribuição mais utilizado industrialmente e possibilita a ampliação de novos pontos de consumo que não foram previstos anteriormente. (SGANZERLA, 2018; BORTOLIN, 2014; PARKER, 2006). (Figura 35).

Figura 35 – Rede em circuito fechado



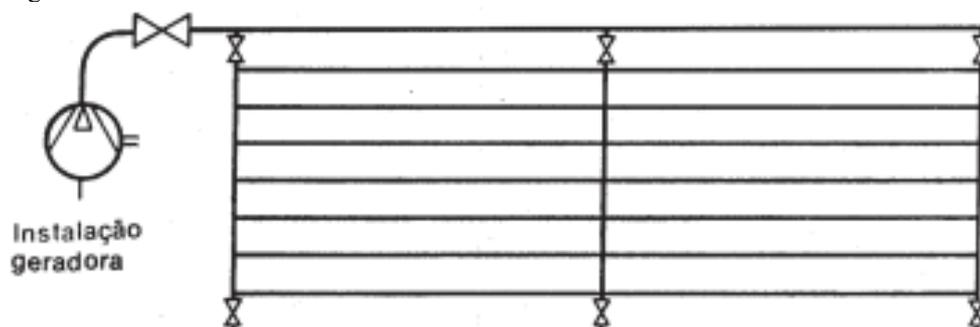
Fonte: Silva, (2002).

2.5.4 Rede combinada

Considerada um circuito fechado com a presença de válvulas de fechamento que viabilizam o bloqueio de determinadas linhas de distribuição, quando estas estiverem em processo de manutenção ou inspeção, assim, evita-se que as demais seções sejam desligadas, sem paralização do trabalho ou produção. (SILVA, 2002; PARKER, 2006). (

Figura 36).

Figura 36 – Rede em circuito misto



Fonte: Silva, (2002).

2.5 Dimensionamento das linhas de distribuição

Para cada linha de distribuição, principal (tronco) e secundária, existe um modelo matemático que define o diâmetro mínimo necessário para atendimento a pressão e vazão dos pontos de consumo do local. Deve ser estimado um possível aumento de demanda ao longo dos anos, além de considerar uma queda de pressão de 0,3 a 0,5 kgf/cm² do reservatório até o consumidor, com 0,5 kgf/cm² a partir de 500m, para o dimensionamento da linha tronco. (FIALHO, 2004).

Conforme Fialho (2004), algumas variáveis devem ser encontradas para possibilitar o cálculo das linhas de distribuição, são elas:

- Volume de ar corrente Q (m³/h): quantidade em m³ de ar por hora que será consumida da rede. O volume para futuras ampliações deve ser adicionado.
- Comprimento total da linha tronco L_t (m): somatório do comprimento linear da tubulação da linha tronco com o comprimento equivalente dos pontos de estrangulamento. (Equação 1)

$$L_t = L_1 + L_2 \quad 1$$

Onde

$L_1 =$ Comprimento retilíneo [m]

$L_2 =$ Comprimento equivalente [m]

- Queda de pressão admitida ou Perda de carga (ΔP): pressão perdida gradualmente ao longo das tubulações em função dos atritos e estrangulamentos como curvas, registros, cotovelos etc. Essa não deve exceder 0,3kgf/cm². Para grandes redes, pode chegar ao máximo 0,5kgf/cm².
- Número de pontos de estrangulamento: singularidades instaladas nas linhas de distribuição, curvas, registros, cotovelos, que são transformadas em comprimento equivalente L_2 , através da tabela no apêndice A.
- Pressão de regime P : pressão em que o ar está armazenado no reservatório (7 a 12kgf/cm²). A pressão considerada econômica nos meios industriais é 6kgf/cm².

2.5.1 Dimensionamento da linha principal

Conforme Fialho (2004), para encontrar o diâmetro interno mínimo em milímetros para a linha tronco, utiliza-se a Equação 2.

$$d = 10 \times \sqrt[5]{\left(\frac{1,663785 \times 10^{-3} \times Q^{1,85} \times L_t}{\Delta P \times P}\right)} \quad 2$$

O diâmetro comercial pode ser encontrado através da tabela do ANEXO B para tubos de aço preto ou galvanizado ASTM A 120 SHEDULE 40.

2.5.2 Dimensionamento das linhas secundárias

Para calcular a o diâmetro da tubulação secundária e de alimentação, a 2 pode ser utilizada, caso o comprimento das linhas secundárias seja igual, o volume de ar recorrente Q é dividido pelo número de linhas secundárias e a variável L_t é ajustada. O mesmo cálculo pode ser utilizado para as linhas de alimentação. (FIALHO, 2004).

2.6 Consumo de ar em atuadores pneumáticos

O atuador pneumático é um dispositivo que converte energia pneumática em energia cinética ou mecânica. Composto por um cilindro ou câmara em que o fluido de trabalho é contido e expandido, fornecendo uma diferença de pressão entre o interior da câmara e a pressão atmosférica. Assim, o gás acumula energia no recipiente, é liberado e direcionado para um dispositivo mecânico, realizando o trabalho necessário ao processo. (Figura 37).

Figura 37 – Atuador Pneumático



Fonte: Micro, (2022).

Segundo De Souza (2016), para conhecimento da vazão de ar comprimido de atuadores pneumáticos, utiliza-se a Equação 3.

$$Q = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times c \times n \times P \times N \times 10^{-6} \quad 3$$

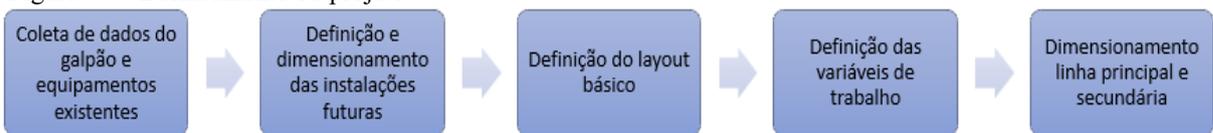
Em que

- Q = consumo de ar em (l/min)
- d = diâmetro do cilindro pneumático (mm)
- c = curso do cilindro (mm)
- n = número de ciclos completos por minuto
- P = pressão de trabalho + 1 bar
- N = número de ações do cilindro, 1 para simples ação e 2 para dupla ação.

3 METODOLOGIA

Á seguir serão apresentados os métodos utilizados para o projeto da rede de ar comprimido do galpão de engenharia industrial da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas. Inicialmente, foi realizado o levantamento dos dados necessários para o dimensionamento das linhas de distribuição, como os equipamentos existentes, localização e o seu consumo de ar. Por conseguinte, definiu-se as instalações futuras previstas pela universidade e elaborado o dimensionamento de alguns equipamentos. Em seguida, foi elaborado o layout básico da rede, determinou-se os materiais e singularidades da linha, como curvas, cotovelos e registros e, por fim o equacionamento das linhas de distribuição. A Figura 38 representa o delineamento do projeto.

Figura 38 – Delineamento do projeto



Fonte: Autor, (2022).

3.1 Coleta de dados

A primeira etapa consistiu na visita ao galpão de engenharia industrial da universidade com o objetivo de realizar o levantamento de dados dos equipamentos presentes, definir os pontos de consumo atual, selecionar as instalações futuras da rede pneumática, coletar medidas, interferências físicas e a planta baixa do local.

O galpão é composto por 4 unidades de engenharia: laboratório de ensaios mecânicos, laboratório de fundição e soldagem, laboratório de usinagem e laboratório de materiais de construção. Atualmente todos esses estão em manuseio e possuem suas instalações hidráulicas e elétricas em perfeito estado. O uso de equipamentos pneumáticos é reduzido, entretanto, futuras instalações são previstas.

Os dados dos equipamentos existentes e futuras instalações foram coletados através do catálogo de seus fabricantes e em seguida o consumo de ar comprimido foi obtido pela Equação 4.

$$Q = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times c \times n \times P \times N \times 10^{-6}$$

3.2 Futuras instalações

Algumas máquinas e sistemas são previstos para futura instalação no galpão, no qual foram especificadas em conjunto com o técnico de laboratório mecânico. Sua localização e quantidades foram determinadas com base no espaço do local e necessidades acadêmicas. Além das instalações definidas, prevê-se também, um aumento de 60% para pontos que ainda não foram determinados.

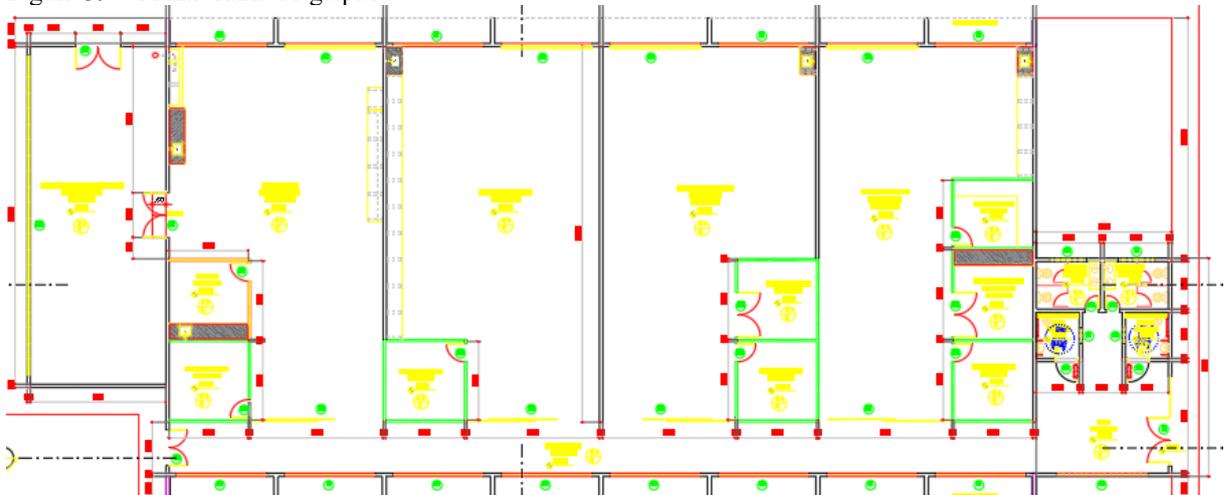
3.3 Layout Inicial

Com a visita ao galpão, o desenho da sua planta baixa com todas as dimensões foi adquirido com o técnico de laboratório. Com a planta, foi possível definir a configuração mais adequada para passagem da rede pneumática por todos os pontos de consumo dos laboratórios.

Visto que a disposição da linha pneumática levou em consideração instalações futuras definidas e 60% de instalações não previamente estabelecidas, optou-se por um circuito fechado para o tipo de rede de ar comprimido, visto que esse possibilita ampliação de novos pontos consumo e o fluxo entre eles ocorre de maneira uniforme.

Com o layout inicial definido, foi possível coletar as dimensões da linha principal, alocar os pontos de consumo atual e existentes, além de averiguar possíveis interferências físicas no galpão, adequando o posicionamento do sistema. A Figura 39 representa a planta baixa do galpão, no qual foi utilizado para definir o layout e a disposição da tubulação.

Figura 39 – Planta baixa do galpão



Fonte: Autor, (2022).

3.4 Variáveis de trabalho

Para definição das variáveis de trabalho como volume de ar corrente, comprimento total da linha tronco, queda de pressão admissível, número de pontos de estrangulamento e pressão de regime, levou-se em consideração itens como comprimento linear da central geradora até o ponto de consumo, consumo de ar dos equipamentos, comprimento da linha de distribuição, singularidades, dentre outros explicados detalhadamente nos tópicos abaixo.

3.4.1 *Volume de ar corrente*

O volume de ar corrente foi obtido através do somatório do volume de ar requerido dos equipamentos existentes, máquina universal e retífica para corpos de prova, e as futuras instalações definidas, além disso, considerou-se ainda, uma ampliação de 60% para equipamentos e ferramentas não definidos no sistema.

3.4.2 *Comprimento total da linha tronco*

Através do layout inicial elaborado, considerando as máquinas instaladas e futuras ampliações, o comprimento total da linha tronco foi obtido. A linha de distribuição principal perpassa os quatro laboratórios do galpão, atendendo aos pontos de consumo e possibilitando a ampliação de pontos ainda não estabelecidos. O comprimento total da linha tronco é obtido através da Equação 1.

$$L_t = L_1 + L_2 \quad 5$$

3.4.3 *Queda de pressão admitida*

A queda de pressão admitida refere-se as perdas de cargas que ocorrem ao longo da tubulação retilínea, ou seja, durante a passagem do fluido pela linha principal, de diâmetro constante e pouco variável, ocorrendo uma redução gradativa de pressão. Para obter um satisfatório desempenho da rede, a perda de carga admita ao sistema deverá ser entre 0,3 kgf/cm² e 0,5kgf/cm², sendo o segundo usual em redes pneumáticas com comprimento da linha principal igual ou maior que 500m. (FIALHO, 2004).

3.4.4 Número de pontos de estrangulamento

O número de pontos de estrangulamento refere-se as singularidades necessárias para interligar e ou bloquear as linhas pneumáticas, como curvas, registros, tês etc. Parker (2006) menciona que as singularidades adequadas devem possuir raio longo, proporcionando maior fluxo de ar e minimizando as perdas de carga por turbulência. Essas também são denominadas de perdas de carga localizadas e ocorrem em virtude da mudança rápida de direção do fluido ao longo da tubulação em decorrência dos pontos de estrangulamento.

3.4.5 Pressão de regime

Conforme Fialho (2004), a pressão de regime 6kgf/cm² é considerada a mais econômica industrialmente. Entretanto, para que esse valor seja mantido nos pontos de consumo, a pressão no reservatório deve estar acima da de trabalho, assim, com a perda de carga ao longo da rede, a pressão diminuirá e o ar comprimido chegará ao consumo com o valor econômico. Portanto, considerou-se utilizar a pressão de regime de 9kgf/cm².

3.5 Dimensionamento das linhas de distribuição

Para dimensionamento das linhas de distribuição, inicialmente foi elaborado o layout básico do sistema, no qual permitiu encontrar as suas singularidades e demais variáveis de trabalho citadas acima. Com essas informações, a Equação 2 foi utilizada levando em consideração apenas o comprimento retilíneo da rede, em seguida, o diâmetro interno mínimo nominal da tubulação foi encontrado, através do quadro A.5 disponível no ANEXO A.

$$d = 10 \times \sqrt[5]{\left(\frac{1,663785 \times 10^{-3} \times Q^{1,85} \times L_t}{\Delta P \times P}\right)} \quad 2$$

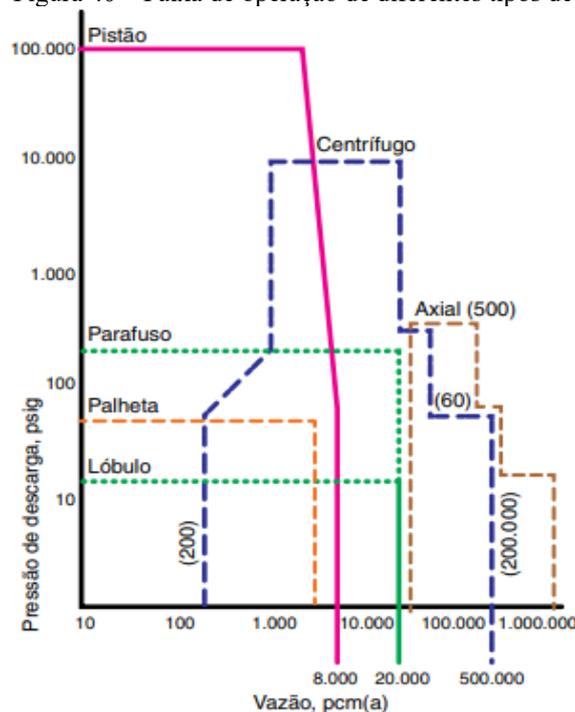
Com esse diâmetro, os comprimentos equivalentes foram determinados e contabilizados ao comprimento retilíneo da linha e um novo diâmetro foi recalculado com o novo comprimento. Esse método foi aplicado para o dimensionamento da linha principal e de alimentação. Ambas as linhas de distribuição foram devidamente dimensionadas para o diâmetro interno comercial superior mais próximo.

3.6 Unidade geradora

Para o correto dimensionamento do compressor, deve-se levar em consideração o volume de ar fornecido ao sistema e a pressão de trabalho. A pressão definida para o reservatório corresponde a 9kgf/cm^2 , assim, o compressor deve possuir capacidade igual ou superior para atender de forma eficiente a pressão solicitada, portanto, estabeleceu-se a pressão de 10kgf/cm^2 para o seu potencial de operação.

Para essa análise, coletou-se os dados de pressão de trabalho através de manuais dos fabricantes dos equipamentos existentes e selecionados. A vazão foi obtida através do somatório dos equipamentos dimensionados e dos valores encontrados por catálogo. A vazão e pressão encontradas foram convertidas em pés cúbicos por minuto (pcm) e libra por polegada quadrada (psi), respectivamente. Em seguida, consultou-se o tipo de compressor a ser utilizado no diagrama de seleção de compressores demonstrado na Figura 40.

Figura 40 – Faixa de operação de diferentes tipos de compressores



Fonte: Parker, (2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o estudo metodológico dos sistemas de ar comprimido, partiu-se para a identificação dos equipamentos pneumáticos que constituem atualmente o galpão da universidade. Em seguida, foi realizado a definição dos equipamentos da rede, dimensionamento das linhas principal e de alimentação, layout final do sistema, indicação das fixações, manutenção e cuidados com a linha de distribuição pneumática.

4.1 Instalações atuais

A partir da identificação dos equipamentos pneumáticos dos laboratórios, coletou-se as informações abaixo que constituem o quadro de instalações atuais do galpão.

- Equipamento existente 01 - Máquina Universal

A Máquina Universal é utilizada para realizar ensaios mecânicos em uma gama de materiais como metal, concreto, ligas, borrachas etc. Através do ensaio é possível criar um diagrama de carga x deslocamento, além de calcular o módulo de elasticidade E, a tensão limite de ruptura e o alongamento, ou seja, a resistência do material em trabalho. Essa determinação é fundamental para dimensionar peças e componentes de um produto e definir o grau de segurança e qualidade dos materiais empregados, evitando acidentes e fatalidades. Para realizar o ensaio, a máquina possui dois atuadores pneumáticos que fixam o corpo de prova para aplicação das forças. Os atuadores são do tipo simples ação com diâmetro de 50mm, curso de 45mm, pressão de trabalho de 6 bar e realiza quatro cursos por minuto. (Figura 41).

Figura 41 – Máquina universal e seu atuador pneumático.



Fonte: Autor, (2022).

Considerando os dados citados, o consumo de ar comprimido de cada atuador é:

$$Q = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times c \times n \times P \times N \times 10^{-6}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \times 50^2 \times 45 \times 4 \times (6 + 1) \times 1 \times 10^{-6}$$

$$Q = 2,46 \frac{l}{min} = 0,15 \frac{m^3}{h}$$

- Equipamento existente 02 – Retífica de corpos de prova de concreto

A retífica de corpos de prova realiza a regularização/retificação da face de materiais para realização de ensaios de compressão, obtendo um acabamento de qualidade, sem imperfeições e com planos de aplicação da carga axial perpendiculares ao dorso do corpo de prova. Geralmente seu uso se dá para corpos de prova de concreto, argamassa e rochosos. A retífica dispõe de dois atuadores de dupla ação que fixam o corpo de prova para operação.

Atuador 01: diâmetro de 50mm, curso de 250mm, pressão de trabalho de 6 bar e realiza dois cursos por minuto. (

Figura 42).

Figura 42 – Retífica de corpos de prova e atuador pneumático 01



Fonte: Autor, (2022).

Para o primeiro atuador cuja características técnicas estão descritas acima, seu consumo é:

$$Q = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times c \times n \times P \times N \times 10^{-6}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \times 50^2 \times 250 \times 2 \times (6 + 1) \times 2 \times 10^{-6}$$

$$Q = 13,74 \frac{l}{min} = 0,82 \frac{m^3}{h}$$

Atuador 02: diâmetro de 50mm, curso de 100mm, pressão de trabalho de 6 bar e realiza dois cursos por minuto. (Figura 43).

Figura 43 – Retífica de corpos de prova e atuador pneumático 02



Fonte: Autor, (2022).

Seu consumo é,

$$Q = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times c \times n \times P \times N \times 10^{-6}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \times 50^2 \times 100 \times 2 \times (6 + 1) \times 2 \times 10^{-6}$$

$$Q = 5,50 \frac{l}{min} = 0,33 \frac{m^3}{h}$$

Dessa forma, o consumo total de ar comprimido dos equipamentos existentes soma-se 24,16 l/min, equivalente a 1,45 m³/h, conforme exposto por equipamento na Tabela 3.

Tabela 3 – Consumo de ar dos equipamentos existentes

Equipamento	Existente	Local	Quantidade	Consumo (l/min)	Total (l/min)
Máquina de ensaio universal 	Sim	Lab. de ensaios mecânicos	Cilindro 01 (01 unidade)	2,46	4,92
			Cilindro 02 (01 unidade)	2,46	
Retífica de corpos de prova 	Sim	Lab. de mat. de construção	Cilindro 01 (01 unidade)	13,74	19,24
			Cilindro 02 (01 unidade)	5,50	

Fonte: Autor, (2022)

4.2 Instalações futuras

O consumo de ar do Torno CNC, Fresadora CNC, Centro de Usinagem e Bico de limpeza foram obtidos através de catálogo de fornecedores e referências de outros trabalhos de dimensionamento pneumático como De Souza (2016) e Da Silva (2020). A bancada e garra pneumática foram dimensionadas conforme descrito abaixo.

- Bancada Pneumática

Determinou-se quatro atuadores, dois de simples ação e dois de dupla ação. Os de simples ação possuem diâmetro de 25mm, curso de 50mm, pressão de trabalho de 6 bar e realiza 25 cursos por minuto.

Seu consumo é então,

$$Q = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times c \times n \times P \times N \times 10^{-6}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \times 25^2 \times 50 \times 25 \times (6 + 1) \times 1 \times 10^{-6}$$

$$Q = 4,29 \frac{l}{min}$$

Como são dois cilindros iguais, o consumo total é

$$Q = 8,58 \frac{l}{min}$$

Para os cilindros de dupla ação, as seguintes características técnicas foram definidas: diâmetro de 50mm, curso de 200mm, pressão de trabalho de 6 bar e realiza 25 cursos por minuto.

Seu consumo é então,

$$Q = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times c \times n \times P \times N \times 10^{-6}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \times 50^2 \times 200 \times 25 \times (6 + 1) \times 2 \times 10^{-6}$$

$$Q = 137,44 \frac{l}{min}$$

Como são dois cilindros iguais, o consumo total é

$$Q = 274,89 \frac{l}{min}$$

- Garra Pneumática

Para a garra pneumática, definiu-se dois cilindros de dupla ação com as seguintes características técnicas: diâmetro de 25 mm, curso de 14mm, pressão de trabalho de 6 bar e realiza 180 cursos por minuto.

Seu consumo é então,

$$Q = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times c \times n \times P \times N \times 10^{-6}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \times 25^2 \times 14 \times 180 \times (6 + 1) \times 2 \times 10^{-6}$$

$$Q = 17,32 \frac{l}{min}$$

Como são dois cilindros iguais, o consumo total é

$$Q = 274,89 \frac{l}{min}$$

Segue na

Figura 44 um modelo representativo dos cilindros que devem ser aplicados no sistema.

Figura 44 – Exemplo de atuador pneumático - bancada



Fonte: Micro, (2022).

Dessa forma, o consumo total de ar comprimido das instalações futuras - torno CNC, fresadora CNC, centro de usinagem, bancada pneumática, garra pneumática e bicos de limpeza - somam-se 1.118,02 l/min equivalente a 67,08 m³/h, representado na Tabela 4.

Tabela 4 – Consumo de ar das futuras instalações

Equipamento	Existente	Local	Quantidade	Consumo (l/min)	Total (l/min)
Torno CNC 	Não	Lab. de usinagem	1	150	150
Fresadora CNC 	Não	Lab. de usinagem	1	150	150
Centro de usinagem 	Não	Lab. de usinagem	1	100	100
Bancada de automação pneumática 	Não	Lab. de fundição e soldagem	Cilindro Simples Aço (02 unidades)	8,58	283,38
			Cilindro Dupla Aço (02 unidades)	274,8	
Garra Pneumática 	Não	Lab. de ensaios mecânicos	02	17,32	34,64
Bico de limpeza 	Não	01 para cada laboratório.	4	100	400

Fonte: Autor, (2022).

4.3 Consumo de ar total do sistema

Realizando o somatório do volume de ar das instalações atuais e futuras, temos:

Consumo de ar das instalações atuais: 24,16 l/min, equivalente a 1,45 m³/h

Consumo de ar das instalações futuras: 1.118,02 l/min equivalente a 67,08 m³/h

Consumo total: 1142,18 l/min equivalente a 68,52 m³/h

Considerando um aumento de 60% previsto para equipamentos ainda não estabelecidos, o consumo de ar comprimido total do sistema passa a ser 1.827,49 l/min equivalente a 109,63 m³/h.

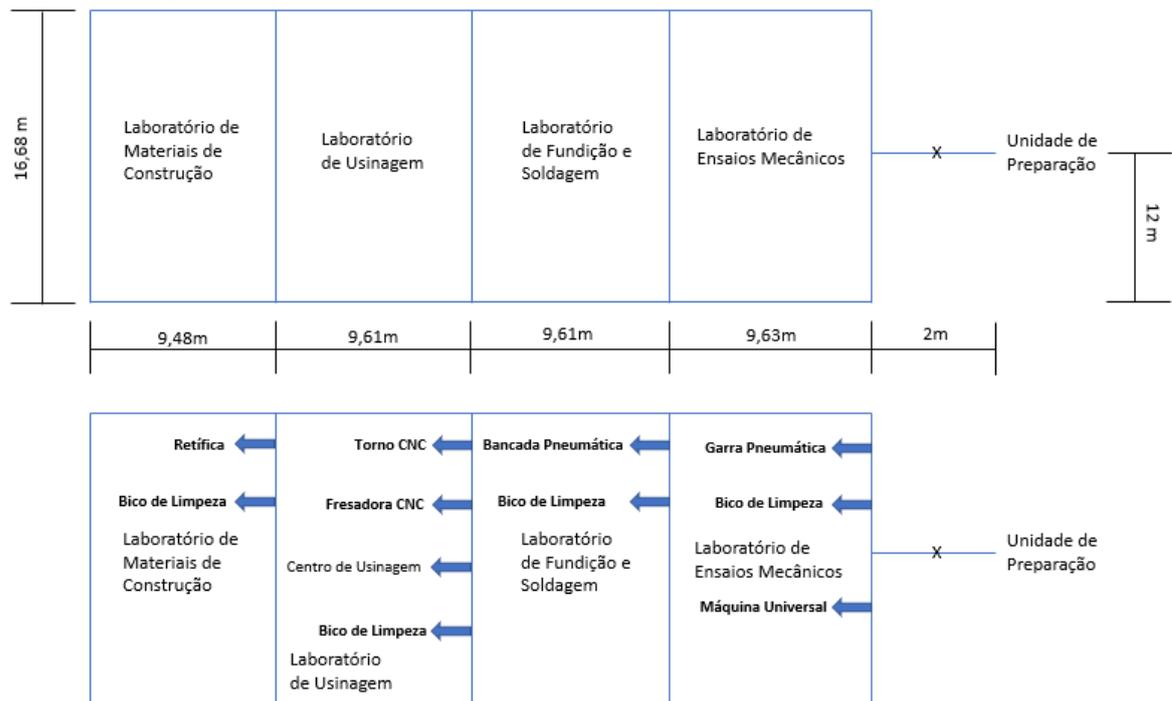
4.4 Layout Inicial

Com a visita ao galpão, o desenho da sua planta baixa com todas as dimensões foi adquirido com o técnico de laboratório. Com a planta, foi possível definir a configuração mais adequada para passagem da rede pneumática por todos os pontos de consumo dos laboratórios. Optou-se por um circuito fechado para distribuição das linhas, visto que esse possibilita a ampliação de novos pontos de consumo e o fluxo entre esses ocorre de maneira uniforme.

Com o layout inicial definido, foi possível coletar as dimensões da linha principal, alocar os pontos de consumo atual e existentes, além de averiguar possíveis interferências físicas. Considerando desde a saída do compressor até todos os pontos de consumo do galpão, o comprimento retilíneo da tubulação principal equivale a 167,06m, apresenta seis curvas, sete tês fluxo em linha e uma válvula registro (representadas em x). Para a linha de distribuição secundária, o comprimento linear equivale a 4,25m, apresenta onze pontos de alimentação, onze curvas de 180°, onze tês fluxo pelo ramal, onze registros e onze dispositivos de tratamento lubrífil.

Para a disposição dos pontos de consumo levou-se em consideração, além dos objetivos de cada laboratório, o espaçamento disponível atual para alocação dos equipamentos. Todos os pontos foram dispostos a 1m de distância da parede lateral direita para facilitar a manutenção e manuseio dos equipamentos e ferramentas, e espaçados 2m entre si, de acordo com a Figura 45.

Figura 45 – Layout básico da linha principal e alimentação



Fonte: Autor, (2022).

4.5 Dimensionamento da rede pneumática

Para obter o diâmetro das tubulações principal e secundária, as variáveis de trabalho foram definidas e encontradas através das informações do layout inicial do sistema.

- Volume de ar corrente

O volume de ar corrente foi obtido através do somatório do consumo de ar comprimido dos equipamentos existentes e futuras instalações, considerando ainda, 60% de aumento para equipamentos não definidos no sistema, obtendo um valor de 109,63 m³/h.

- Comprimento total da linha tronco

Através do layout inicial, o comprimento total da linha tronco, sem considerar o comprimento equivalente das singularidades, corresponde a 167,06m e o comprimento total de uma linha de alimentação é 4,25m, igualmente para todos os onze pontos de consumo.

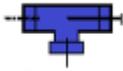
- Queda de pressão admitida

Visto que o comprimento linear da rede equivale a 167,06m, o valor de referência 0,3 kgf/cm² para pressão admitida de redes pneumáticas menores que 500m foi adotado.

- Número de pontos de estrangulamento

Com o layout do sistema, todos os pontos de estrangulamento foram definidos conforme necessidade de atendimento ao consumo da rede. A Tabela 5 compõe as singularidades, seu local e quantidades da linha de distribuição principal.

Tabela 5 – Singularidades da linha tronco ou principal

Singularidades Linha Principal		Quantidade
Curva 90° raio longo roscado		6
T fluxo em linha roscado		7
Válvula gaveta roscada		1

Fonte: Autor, (2022).

A Tabela 6 compõe os pontos de estrangulamento, seu local e quantidades da linha de alimentação.

Tabela 6 – Singularidades da linha de alimentação ou consumo

Singularidades Linha Secundária		Quantidade
Curva 180° raio longo roscada		11
T roscado com fluxo em ramal		11
Válvula gaveta roscada		11

Fonte: Autor, (2022).

4.5.1 Cálculo da linha principal

Para dimensionar a tubulação principal, inicialmente foi encontrado o diâmetro nominal. A partir desse, foi possível encontrar o comprimento equivalente das singularidades presente na linha tronco. Para isso, a Equação 2 foi aplicada, considerando o comprimento total da linha tronco L_t , apenas como o comprimento linear, sem atribuir o comprimento equivalente

das singularidades. A Tabela 7 resume as variáveis para aplicação no equacionamento.

Tabela 7 – Variáveis da linha principal

Variáveis	Valor
Comprimento total da linha tronco (Lt)	167,06m
Queda de pressão admita (ΔP)	0,3 kgf/cm ² ,
Pressão de regime (P)	9kgf/cm ² .
Volume de ar corrente (Q)	109,63 m ³ /h.

Fonte: Autor, (2022).

Substituindo as variáveis na Equação 2, temos:

$$d = 10 \times \sqrt[5]{\left(\frac{1,663785 \times 10^{-3} \times 109,63^{1,85} \times 167,06}{0,3 \times 9}\right)}$$

$$d = 36,08 \text{ mm}$$

O diâmetro 36,08mm nos permite encontrar o diâmetro nominal equivalente para as singularidades. Através da tabela A.5 disponível no ANEXO A, o diâmetro nominal corresponde a 1.1/2in. Com esse dado, o comprimento equivalente de tubo das singularidades da linha tronco foi encontrado através da tabela A6 do ANEXO B. (Tabela 8).

Tabela 8 – Comprimento equivalente das singularidades da linha principal

Singularidades Linha Principal	Quantidade	Comprimento Equivalente (m)	Total (m)
Curva 90° raio longo roscado	6	1	6
T fluxo em linha roscado	7	1,7	11,9
Válvula gaveta roscada	1	0,37	2,59
TOTAL			18,27

Fonte: Autor, (2022).

Com os comprimentos de tubo equivalentes, o comprimento total da linha tronco L_t passa a ser o somatório do comprimento linear com o comprimento equivalente dos pontos de estrangulamento.

Logo,

$$L_t = 167,06 + 18,27$$

$$L_t = 185,33 \text{ m}$$

Reaplicando a Equação 2, considerando o L_t acima, temos:

$$d = 10 \times \sqrt[5]{\left(\frac{1,663785 \times 10^{-3} \times 109,63^{1,85} \times 185,33}{0,3 \times 9}\right)}$$

$$d = 36,84 \text{ mm}$$

Após o redimensionamento com o acréscimo do comprimento das singulares, através da tabela A.5 disponível no ANEXO A, para o diâmetro de 36,84mm, considerando o diâmetro interno comercial superior mais próximo, o diâmetro da tubulação principal corresponde a 1.1/2in.

4.5.2 Cálculo da linha secundária

Para dimensionar a linha de alimentação, a vazão total do sistema foi dividida pela quantidade de linhas de consumo existente na rede, visto que essas possuem o mesmo comprimento linear.

$$Q = \frac{109,63 \text{ m}^3}{11 \text{ h}}$$

$$Q = 9,97 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Em seguida, a Equação 2 foi aplicada, considerando o comprimento total da linha tronco L_t , apenas como o comprimento linear, sem atribuir o comprimento equivalente das singularidades. A Tabela 9 apresenta as variáveis para aplicação no equacionamento.

Tabela 9 – Variáveis da linha de alimentação

Variáveis	Valor
Comprimento total da linha tronco (L_t)	4,25m
Queda de pressão admita (ΔP)	0,3 kgf/cm ² ,
Pressão de regime (P)	9kgf/cm ² .
Volume de ar corrente (Q)	9,97 m ³ /h.

Fonte: Autor, (2022).

Substituindo as variáveis na Equação 2, temos:

$$d = 10 \times \sqrt[5]{\left(\frac{1,663785 \times 10^{-3} \times 9,97^{1,85} \times 4,25}{0,3 \times 9}\right)}$$

$$d = 7,13 \text{ mm}$$

O diâmetro 7,13mm nos permite encontrar o diâmetro equivalente para as singularidades. Através da tabela A.5 disponível no ANEXO A, o diâmetro nominal equivalente corresponde a 1/4in. Com esse dado, o comprimento equivalente de tubo das singularidades da linha de alimentação foi encontrado através da tabela A6 do ANEXO B. (Tabela 10)

Tabela 10 – Comprimento equivalente da linha de alimentação ou consumo

Singularidades Linha Secundária	Quantidade	Comprimento Equivalente (m)	Total (m)
Curva 180° raio longo roscada	11	1,1	12,1
T roscado com fluxo em ramal	11	1,3	14,3
Válvula gaveta roscada	11	0,17	1,87
TOTAL			28,27

Fonte: Autor, (2022).

Com os comprimentos equivalentes, o comprimento total da linha de alimentação L_t passa a ser o somatório do comprimento linear com o comprimento equivalente dos pontos de estrangulamento.

Logo,

$$L_t = 4,25 + 28,27$$

$$L_t = 32,52 \text{ m}$$

Reaplicando a Equação 2, entretanto considerando o L_t acima, temos:

$$d = 10 \times \sqrt[5]{\left(\frac{1,663785 \times 10^{-3} \times 9,96^{1,85} \times 32,52}{0,3 \times 9}\right)}$$

$$d = 10,71 \text{ mm}$$

Após o redimensionamento com o acréscimo do comprimento das singulares,

através da tabela A.5 disponível no ANEXO A, para o diâmetro de 10,75mm, considerando o diâmetro interno comercial superior mais próximo, o diâmetro da tubulação de alimentação corresponde a 3/8in.

4.5.3 Rede de ar comprimido

A partir dos cálculos de dimensionamento, o diâmetro de 1.1/2in foi encontrado para composição da tubulação da linha de distribuição principal, atendendo a vazão de 109,63m³/h com comprimento total da linha (linear e com singularidades) correspondente a 185,33m. Para a tubulação de alimentação, devido a menor vazão requerida, o diâmetro encontrado pelo dimensionamento apresentou 3/8in para uma vazão de 9,97m³/h e comprimento total da linha (linear e com singularidades) correspondente a 32,52m. A tubulação aplicada em ambas as linhas deverá ser de aço galvanizado ASTM A 120 Schedule 40, pois esse apresenta revestimento com zinco, um metal resistente, principalmente a corrosão, conforme indicado pelas principais referências bibliográficas. (Figura 46).

Figura 46 – Tubo de aço galvanizado



Fonte: Arcelormittal, 2022.

4.6 Dimensionamento da central geradora – Compressor

Para o correto dimensionamento do compressor, deve-se levar em consideração o volume de ar fornecido ao sistema e a pressão de trabalho. O consumo de ar total da rede equivale a 109,63m³/h. Com a pressão considerada de 10kgf/cm², obteve-se os dados da Tabela 11 para análise.

Tabela 11 – Vazão e pressão requeridas a unidade geradora

Vazão	Pressão
109,63 m ³ /h	10 kgf/cm ²
64,53 pcm	142,23 psi

Fonte: Autor, (2022)

Através do diagrama de seleção de compressor, Figura 40, os compressores indicados para atendimento a demanda de 64,53pcm e 142,23psi são dois tipos: pistão e parafuso. Conforme analisado, o compressor do tipo parafuso apresenta um custo até três vezes maior comparado ao compressor do tipo pistão. Além disso, sua disponibilidade é reduzida quando comparada ao segundo tipo. Portanto, o melhor equipamento para a linha pneumática é um compressor do tipo pistão, especificado na Tabela 12 com a melhor relação custo-benefício e atendimento as demandas de operação.

Tabela 12 – Características técnicas do compressor

Compressor de ar / Unidade geradora	Potência do motor: 2 cv
	Deslocamento Teórico: 9 pés ³ /min. – 255 l/min.
	Pressão de operação (mínimo): 6,9 bar
	Pressão de operação (máximo): 9,7 bar

Fonte: Autor, (2022)

4.7 Unidade de preparação do sistema

Levando em consideração que o sistema possui baixa vazão e não será utilizado em aplicações que requerem máxima pureza, não será necessário a composição de elementos individuais para a unidade de preparação. O compressor definido atuará como trocador de calor e filtro. As aletas presentes no seu sistema serão responsáveis pela troca de calor com o meio ambiente e os filtros acoplados serão suficientes para retirada de impurezas do ar. Além disso, o seu próprio reservatório em junção com outro vaso de pressão, poderá ser suficiente para atendimento a demanda do galpão, entretanto cabe uma avaliação sobre a necessidade desse acréscimo. A seguir, na Figura 47, um exemplo de compressor para aplicação no sistema.

Figura 47 – Compressor do tipo pistão - exemplo



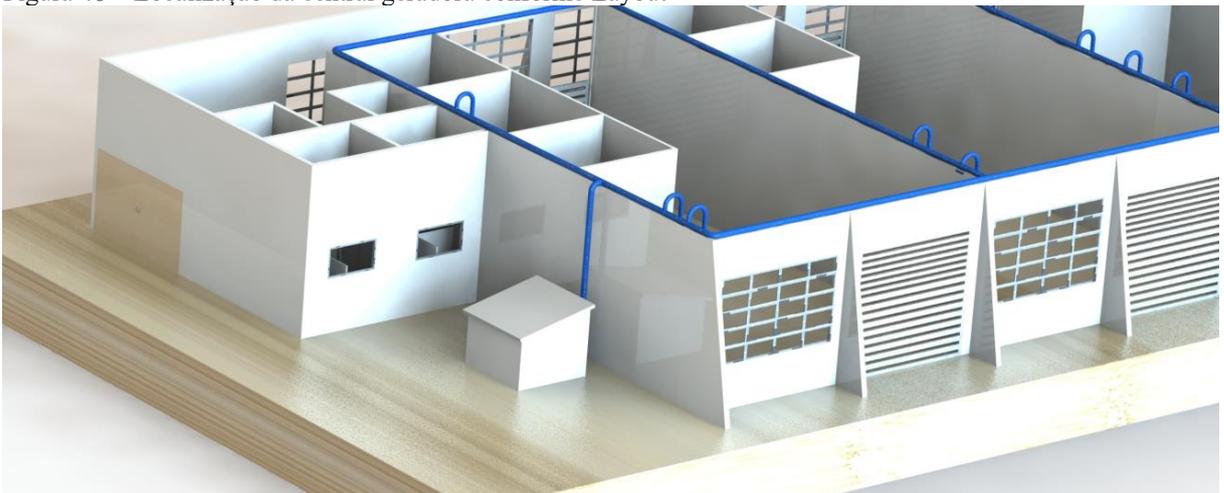
Fonte: Motomil, (2022).

4.8 Localização da central geradora – Compressor

Através da análise em campo e com base nas informações estudadas sobre a localização da central geradora, essa será posicionada ao lado do laboratório de ensaios mecânicos, no qual existe um espaço livre e de fácil acesso para manutenção. Uma casa para instalação do compressor deverá ser construída, visto que a unidade precisa estar coberta, ventilada, livre de umidade e qualquer tipo de poeira. O terreno não possui base nivelada, portanto, será necessário a pavimentação do local para posterior instalação. A

Figura 48 representa esquematicamente a localização da central geradora conforme layout elaborado.

Figura 48 – Localização da central geradora conforme Layout



Fonte: Autor, (2022).

4.9 Conservação do sistema – Lubrífil

É imprescindível que todos os 11 pontos de consumo definidos da rede possuam

sua unidade de conservação – Lubrifil. Esse conjunto irá realizar a retenção de partículas sólidas e outros fluidos, além de aumentar a vida útil dos equipamentos e ferramentas através da lubrificação de suas partes móveis.

A vazão de cada linha de alimentação corresponde à $9,97\text{m}^3/\text{h}$, equivalente a $166,2\text{l}/\text{min}$, portanto, o conjunto Lubrifil de cada ponto deverá atender a demanda de vazão do sistema. Segue na Tabela 13 a especificação técnica do conjunto.

Tabela 13 – Características técnicas do conjunto Lubrifil

Conjunto Lubrifil 3/8	Conexão: 3/8 BSP
	Vazão mínima: 180 l/min
	Faixa de pressão: 0 a 10 bar
	Filtragem 40u com Dreno semiautomático

Fonte: Autor, (2022)

Na Figura 49 um exemplo de conjunto Lubrifil que deverá ser instalado em cada ponto de consumo do sistema.

Figura 49 – Lubrifil - exemplo



Fonte: Vortex automação, (2022).

4.10 Purgador, conexões e acessórios

Cada linha de consumo deverá ter um purgador para retirada do condensado acumulado no sistema. O purgador poderá ser manual ou automático, entretanto, considerando o melhor custo-benefício, um dreno manual possui menor gasto e atenderia as necessidades do sistema. A Figura 50 representa um exemplo de dreno com dimensão 3/8 conforme linha de alimentação.

Figura 50 – Dreno - exemplo



Fonte: Vortex automação, (2022).

Os pontos de consumo deverão ser conectados por engate rápido, esses possibilitam manuseio mais preciso, rápido e seguro, evitando desacoplamento acidental do equipamento. (Figura 51).

Figura 51 – Engate rápido - exemplo



Fonte: Duracoupling, (2022).

A mangueira de interligação da tubulação de alimentação com a aplicação pneumática deverá ser de PVC flexível. Esse material, ilustrado na Figura 52, é capaz de suportar choques e elementos abrasivos. Por conta disso, a durabilidade do produto é estendida e o trabalho tem sua qualidade mantida.

Figura 52 – Mangueira de ar comprimido - exemplo

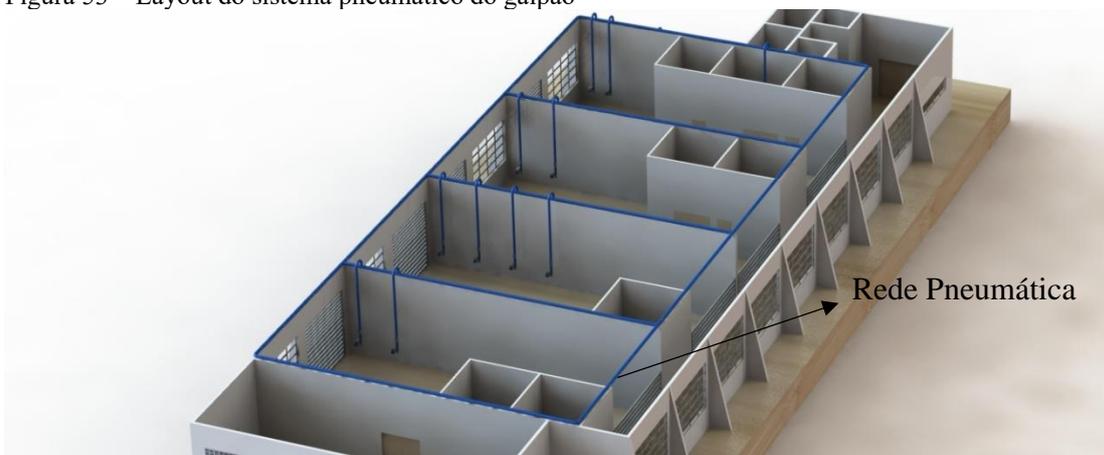


Fonte: Dynatech, (2022).

4.11 Layout final

O *layout* da linha de distribuição e da linha de alimentação foram elaborados com o auxílio do software Solidworks. As dimensões reais do galpão foram seguidas conforme a planta disponibilizada, assim como o da tubulação principal com 1.1/2in e a tubulação de alimentação com 3/8in, conforme representado na Figura 53.

Figura 53 – Layout do sistema pneumático do galpão

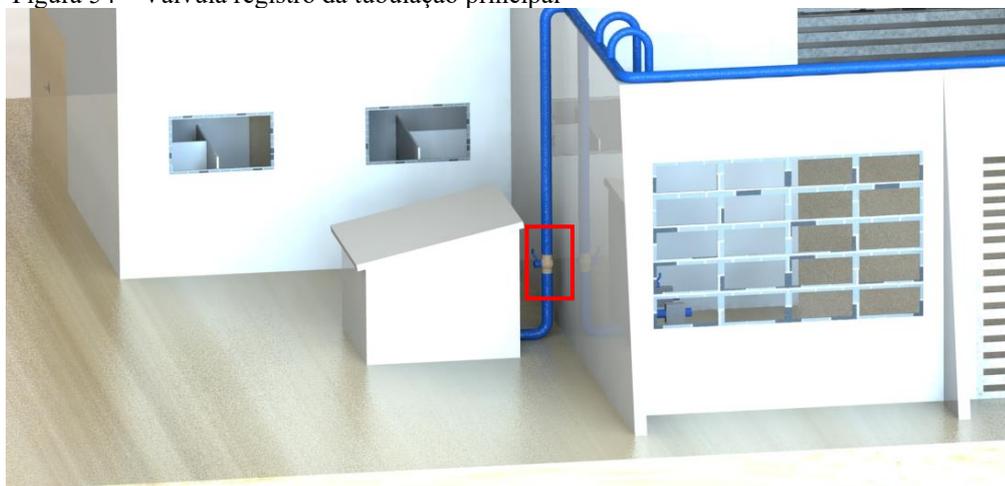


Fonte: Autor, (2022).

Na linha principal, após a saída do compressor há disposto uma válvula registro que deverá ser instalada para momentos de manutenção da rede e ajustes de ampliação dos pontos de consumo. (

Figura 54).

Figura 54 – Válvula registro da tubulação principal



Fonte: Autor, (2022).

As linhas de alimentação dos equipamentos pneumáticos foram projetadas para serem interligadas pela parte superior da linha principal, evitando que o condensado que possa estar presente na linha de distribuição, seja arrastado para a linha de alimentação. (Figura 55).

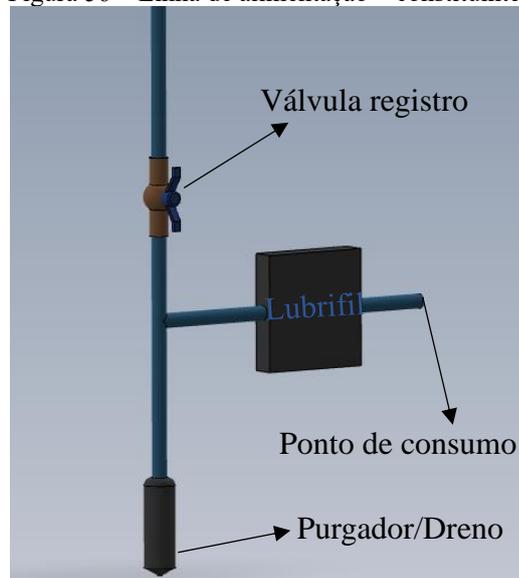
Figura 55 – Linha de alimentação



Fonte: Autor, (2022).

Cada linha de alimentação está disposta com um conjunto Lubrifil para tratamento do ar antes da aplicação de consumo. Os pontos também estão munidos de uma válvula registro para possibilitar a manutenção da unidade de preparação ou do dreno, sem a necessidade de desligar a linha de distribuição. Há disposto também, um purgador de condensado que poderá ser automático ou manual ao final de cada linha. A instalação de todos esses itens é indispensável para manter a vida útil do sistema, evitar o desgaste e deterioração de vedações, assim como, minimizar a erosão nos componentes pneumáticos. (Figura 56).

Figura 56 – Linha de alimentação – constituintes



Fonte: Autor, (2022).

4.12 Instalação, fixação da rede e cuidados

A rede de ar comprimido deverá ser instalada de forma aérea em uma altura mínima de 5m. Anterior a essa dimensão, haverá interferências físicas no galpão, como linhas de iluminação e demais aparatos. As linhas de alimentação foram projetadas com dimensões suficientes para suprir a altura da linha principal, tornando o uso do ponto de consumo ergonomicamente correto.

A fixação das tubulações deverá ser composta por abraçadeiras ou suportes metálicos de 1.1/2, conforme dimensão da tubulação principal, nos locais em que a tubulação está alinhada com a parede, conforme mostrado na Figura 57.

Figura 57 – Fixação da tubulação principal - exemplo



Fonte: Pipetech, (2022).

Para as tubulações que não estarão alinhadas com a parede, a fixação deverá ser com abraçadeiras aéreas, que serão marcadas no teto do galpão, conforme Figura 58.

Figura 58 – Fixação aérea da tubulação principal - exemplo



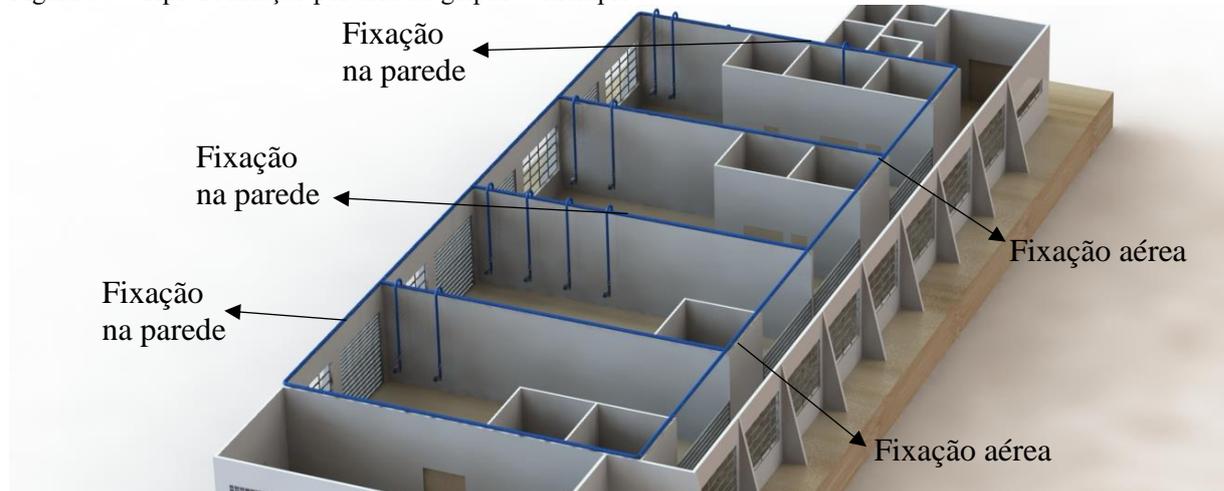
Fonte: Pipetech, (2022).

A fixação por abraçadeiras na parede poderá ser realizada em quase toda a linha da rede pneumática: lateral direita, parte central nos pontos de alimentação e nas paredes frontais

de fechamento do galpão. Apenas na lateral esquerda será necessária fixação aérea, conforme indicado na

Figura 59.

Figura 59 – Tipo de fixação por área do galpão – exemplo



Fonte: Autor, (2022).

Por fim, após instalação da rede, cabe atentar-se aos possíveis vazamentos que ocorram com o tempo, pois esses além causar acidentes que envolvem ferimentos graves na pele ou partes do corpo, a eficiência energética do sistema reduz, gerando maior gasto de energia. Portanto, faz-se necessário um acompanhamento de manutenção preventiva de forma periódica dos equipamentos, tubulações e conexões da linha de ar comprimido.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi dimensionado o sistema de ar comprimido do galpão industrial de engenharia da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas. O projeto foi motivado pela necessidade de funcionamento dos equipamentos pneumáticos instalados e das futuras ampliações previstas. Além disso, a motivação do trabalho também considerou a importância da universidade possuir um sistema pneumático para estudo prático da disciplina que é ofertada aos alunos. Com a rede, a prática e teoria da energia pneumática serão unidas de forma a apresentar aos graduandos as possibilidades de trabalho e suas aplicações. Pesquisas científicas poderão ser melhor ofertadas tendo em vista a disponibilidade de um sistema bem dimensionado que atende aos equipamentos de todos os laboratórios de engenharia da universidade.

Através do referencial teórico sobre sistemas pneumáticos, foi possível conhecer profundamente as etapas e necessidades da produção, preparação e distribuição do ar comprimido. Assim como, entender como ocorre o dimensionamento das linhas de distribuição e alimentação, de forma eficiente e com menor perda de carga. O subdimensionamento de um sistema pode acarretar o baixo rendimento das máquinas e conseqüente redução de produtividade, tal qual o superdimensionamento que promove o aumento do custo de implementação do sistema.

O projeto da rede de ar comprimido apresentado no trabalho teve foco nas instalações atuais e futuras ampliações do galpão, definidas e não definidas, sendo a última considerada 60% da vazão total do sistema encontrado. A rede dimensionada é do tipo fechada, com tubulação principal de diâmetro comercial correspondente a 1.1/2in, e tubulação secundária (alimentação) de diâmetro comercial correspondente a 3/8in. Esses valores estão congruentes com a vazão total do sistema 109,63m³/h, que, comparado a sistemas industriais ou de empresas de médio porte, é um valor relativamente baixo.

O objetivo proposto pelo trabalho foi alcançado, visto que se definiu o diâmetro ideal da tubulação a ser aplicada, atendendo as necessidades de vazão e pressão do sistema, ocasionando um bom desempenho e maior vida útil das máquinas que serão utilizados, além de estabelecer as especificações técnicas dos componentes e equipamentos da rede, com base no volume de ar requisitado e pressão de operação da linha.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de desenvolver novos estudos, assim como propor a aplicação concreta do dimensionamento do presente trabalho, seguem sugestões para trabalhos futuros:

- Averiguar o melhor material (aço, alumínio, latão, plástico de engenharia) para aplicação das tubulações das linhas de distribuição do sistema.
- Realizar um levantamento de custo de diferentes equipamentos, dispositivos, acessórios e conexões que compõe o sistema (compressor, válvulas registro, conjunto lubrífil, purgador etc.) obtendo o orçamento de aquisições do projeto.
- Elaborar o orçamento de aquisições dos equipamentos dimensionados para o galpão (bancada pneumática e garra pneumática) e definir a melhor relação custo-benefício dentre os componentes selecionados.
- Elencar empresas prestadoras de serviço para instalação da rede de ar comprimido, obtendo o orçamento de serviços do projeto.

REFERÊNCIAS

Arcelormittal: Produtos e soluções: Tubos metálicos, 2022. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/industria/tubos-metalicos>. Acesso em: 21 out. 2022.

Automação Pneumática: 5 exemplos de aplicações. PUMA BRASIL, 2020. Disponível em: <https://pumabrasil.com.br/automacao-pneumatica-5-exemplos-de-aplicacoes/>. Acesso em: 11 jul. 2022

ATLAS COPCO. Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido. Lisboa – Portugal. Adene. 2016. Disponível em: <http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/Documentos%20de%20acesso%20r emoto/Manual-de-eficiencia-em-sistemas-de-ar-comprimido.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2022.

BAUNGARTNER, R. Modelagem e análise do desempenho de compressores centrífugos para baixa capacidade de refrigeração. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

BORTOLIN, E. Dimensionamento de um sistema de ar comprimido para uma empresa de pequeno porte. Horizontina: Faculdade Horizontina, 2014.

BOSCH. Tecnologia de ar comprimido. Campinas, 2008.

BRANCHER, R. D. Desenvolvimento e validação experimental de um modelo para a previsão do desempenho de compressores rotativos de pistão rolante. Florianópolis, SC. Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

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

DA SILVA, R. H. Projeto de uma rede de distribuição de ar comprimido: estudo de caso dos laboratórios de ensino no curso de Engenharia Mecânica. Teresina – PI. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, 2020.

DE MOURA, N. R. Simulação fluidodinâmica computacional de desempenho de um impelidor de um compressor centrífugo. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

DE SOUZA, G. P. Dimensionamento de uma rede de ar comprimido para uma empresa de pequeno porte. Manaus – AM. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, 2016.

DYNATECH. Mangueiras de ar comprimido. Disponível em: <https://www.dynatech.ind.br/mangueira-ar-comprimido>. Acesso em: 27 nov. 2022.

DORNELES, V.; MUGGE, T. **Pneumática Básica**. Escola Técnica SENAI Plínio Gilberto Kroeff - CETEMP, 2008.

DURACOUPLING. **Engates e conexões especiais**. Disponível em: <https://www.duracoupling.com.br/>. Acesso em: 27 nov. 2022

FIALHO, A. B. **Automação Pneumática: Projetos, Dimensionamento e Análises de Circuitos**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2004.

FIALHO, A. B. **Automação pneumática: Projetos, dimensionamento e análise de circuitos**. 7. ed. São Paulo: Érica, 2011.

MENDONÇA, A. V. C.; DE MELO, R. L. R. **Estudo da substituição de compressores alternativos por compressores rotativos tipo parafuso**. Universidade Federal de Uberlândia, 2021.

METALPLAN. **Manual de Ar Comprimido**. São Paulo: Metalplan, 2017.

MICRO. **Catálogo de cilindros pneumáticos**. Micro Automação. Disponível em: <https://br.microautomacion.com/pt/catalog/cilindros-compactos-2/>. Acesso em 04 out. 2022.

MOREIRA, A. C. **Proposta de substituição de um sistema embarcado de controle de secagem de ar comprimido por um sistema de controle baseado em controlador programável**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

MOTOMIL. **Multi compressores de sistemas pneumáticos**. Disponível em: <https://www.multicompressores.com.br/marca/motomil.html>. Acesso em 04 out. 2022

PACCO, R. **Projeto de uma rede de ar comprimido industrial**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2013.

PARKER TRAINING. **Dimensionamento de redes de ar comprimido**. Jacareí, 2006. Apostila M1004 BR.

PARKER HANNIFIN CORPORATION. **Tecnologia Pneumática Industrial Apostila M1001-1 BR**, 2007.

PEREIRA, E. L. L. **Análise de sistemas de válvulas automáticas de compressores alternativos**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

PEREIRA, C. M. S. **Comportamento de sistemas pós-filtros adsorvedores na remoção de compostos orgânicos precursores e subprodutos da desinfecção**. Universidade de São Paulo, 2009.

PIPETECH. **Acessórios para tubos: opções para fixação de elementos e sua instalação**. Disponível em: <https://pipe.technoluxpro.com/pt/vodoprovodnye/krepyozh-dlya-trub.html>. Acesso em: 27 nov. 2022.

PIZZA, J. P. A. **Construção de uma bancada didática com compressor alternativo**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

ROLLINS, J. P. **Compressed Air and Gas Handbook / CAGI**. 5. ed, 1989.

SANTOS, A. A. D.; SILVA, A. F. D. **Automação Pneumática**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2009.

SCHLÜTER, M. S. **Controle Não Linear Adaptativo com Compensação de Atrito de um Manipulador SCARA com Acionamento Pneumático**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

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

SILVA, N. F. **Compressores Alternativos Industriais: teoria e prática**. Interciência: Rio de Janeiro, 2009.

SIMÕES, M. R. **Simulação computacional de escoamento turbulento em compressor axial utilizando ferramenta de CFD**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

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.

TAFFAREL, M. G. **Projeto de uma linha de distribuição de ar-comprimido: estudo de caso do laboratório de ensino no curso de engenharia de produção**. Bagé, RS: Universidade Federal do Pampa, 2015.

TESSARO, S. A.; MICHELS, A. **Desempenho comparativo entre compressores rotativos de parafuso com velocidade fixa e variável**. Rio Grande do Sul, Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

VORTEX AUTOMAÇÃO. **Vortex automação pneumática**. Disponível em: <https://www.vortexautomacao.com.br/>. Acesso em 21 out. 2022.

ANEXO A – TABELA A5 - NORMA ASTM A 120 SCHEDULE 40

Diâmetro				Espessura de Parede		Peso Teórico do Tubo Preto		Pressão de Ensaio
Nominal	Externo		Interno			Pontas Lisas	Com Roscas e Luvas ¹⁷	
in	in	mm	mm	in	mm	Kg/m	Kg/m	Kgf/cm ²
1/4	0,540	13,7	9,2	0,088	2,24	0,63	0,66	50
3/8	0,675	17,2	12,6	0,091	2,31	0,85	0,88	50
1/2	0,840	21,3	15,8	0,109	2,77	1,27	1,29	50
3/4	1,050	26,7	21,0	0,113	2,87	1,68	1,72	50

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

Fonte: Fialho (2011).

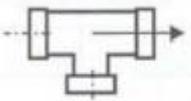
ANEXO B – TABELA A6 – COMPRIMENTO DE TUBO EQUIVALENTE Á PERDA DE CARGA POR SINGULARIDADES – (m)

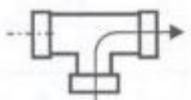
Conexões		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
 90° Cotovelo comum	ROSQ.	1,1	1,34	1,58	2	2,25	2,6	2,8
	FLAN.	0,30	0,37	0,50	0,62	0,73	0,95	1,1
		Diâmetro Nominal (in)						
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
	ROSQ.	3,4	3,7	4,0	-	-	-	-
	FLAN.	1,3	1,55	1,8	2,2	2,7	3,7	4,3

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
 Curva 90° raio longo	ROSQ.	0,67	0,70	0,83	0,98	1,0	1,1	1,1
	FLAN.	0,33	0,40	0,49	0,61	0,70	0,83	0,88
		Diâmetro Nominal (in)						
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
	ROSQ.	1,2	1,3	1,4	-	-	-	-
	FLAN.	1,0	1,15	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
 Curva 45°	ROSQ.	0,21	0,28	0,39	0,52	0,64	0,83	0,97
	FLAN.	0,14	0,18	0,25	0,34	0,40	0,52	0,61
		Diâmetro Nominal (in)						
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
	ROSQ.	1,2	1,45	1,7	-	-	-	-
	FLAN.	0,8	0,95	1,1	1,4	1,7	2,3	2,7

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
 Curva 180° raio longo	ROSQ.	1,1	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	2,8
	FLAN.	0,34	0,40	0,49	0,61	0,70	0,83	0,88
		Diâmetro Nominal (in)						
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
	ROSQ.	3,4	3,7	4,0	-	-	-	-
	FLAN.	1,00	1,15	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4

Conexão		Diâmetro Nominal (in)							
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2	
 <p>Tê fluxo em linha</p>	ROSQ.	0,52	0,73	0,99	1,4	1,7	2,3	2,8	
	FLAN.	0,21	0,25	0,30	0,4	0,45	0,55	0,58	
	Diâmetro Nominal (in)								
		3	3.1/2	4	5	6	8	10	
	ROSQ.	3,7	4,45	5,2	-	-	-	-	
	FLAN.	0,67	0,74	0,85	1,0	1,2	1,4	1,6	

Conexão		Diâmetro Nominal (in)							
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2	
 <p>Tê fluxo pelo ramal</p>	ROSQ.	1,3	1,6	2,0	2,7	3,0	3,7	3,9	
	FLAN.	0,61	0,80	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	
	Diâmetro Nominal (in)								
		3	3.1/2	4	5	6	8	10	
	ROSQ.	5,2	5,8	6,4	-	-	-	-	
	FLAN.	2,9	3,3	3,7	4,6	5,5	7,3	9,1	

Conexão		Diâmetro Nominal (in) ¹							
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2	
 <p>Válvula gaveta</p>	ROSQ.	0,17	0,20	0,25	0,34	0,37	0,46	0,52	
	FLAN.	-	-	-	-	-	0,80	0,83	
	Diâmetro Nominal (in)								
		3	3.1/2	4	5	6	8	10	
	ROSQ.	0,58	0,67	0,76	-	-	-	-	
	FLAN.	0,85	0,86	0,88	0,95	0,98	0,98	0,98	

Fonte: Fialho (2011).