

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Ciro Guedes Fellet**

**Instalação do Sistema Pneumático dos Laboratórios da Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Juiz de Fora**

Juiz de Fora

2019

**Ciro Guedes Fellet**

**Instalação do Sistema Pneumático dos Laboratórios da Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Juiz de Fora**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade de Engenharia da Universidade  
Federal de Juiz de Fora, como requisito par-  
cial para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Carlos Renato Pagotto

Coorientador: Matheus Pereira Antunes

Juiz de Fora

2019

Ciro Guedes Fellet

**Instalação do Sistema Pneumático dos Laboratórios da Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Juiz de Fora**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

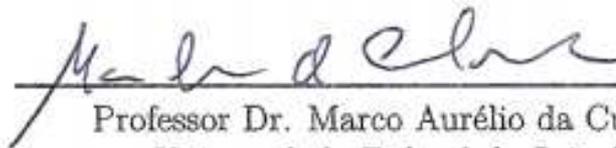
Aprovada em 07 de Novembro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Professor Dr. Carlos Renato Pagotto - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Professor Dr. Marco Aurélio da Cunha Alves  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Engenheiro Matheus Pereira Antunes - Coorientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

*Dedico este trabalho à toda a comunidade acadêmica da engenharia mecânica. Deixo aqui o meu legado e espero que seja bastante usado em pesquisas futuras. Que cada pequeno avanço seja um novo passo rumo a excelência.*

## AGRADECIMENTOS

Agradecer é uma forma de reconhecer o quanto dependemos de outrem para cumprir tarefas grandiosas. Desta forma agradeço, inicialmente, aos técnicos Matheus e Marcos Victor, que me ajudaram ativamente na execução deste projeto, além de me apresentarem a essa proposta. Ao meu orientador, Pagotto, por confiar na ideia proposta e me auxiliar na realização deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora por prover a estrutura necessária à minha formação acadêmica e aos professores que colaboraram com meu aprendizado.

Quero agradecer à minha família por me amar incondicionalmente e prover o necessário à minha vida e à minha namorada por estar sempre do meu lado e me dar suporte quando preciso.

Gostaria de agradecer, por fim, a todos que estiveram junto comigo nessa longa trajetória de graduação, cada um que passou na minha vida contribuiu, de alguma forma, para o meu crescimento pessoal.

"Se você quiser fazer uma torta de maçã do nada, primeiro tem que inventar o universo."

**(Carl Sagan)**

## RESUMO

Este trabalho é uma abordagem prática sobre a forma de implantação de um sistema de ar comprimido para uso laboratorial em ambiente acadêmico. Após uma introdução aos conceitos utilizados, retirado da literatura disponível, para a realização do projeto, foi pensado um plano para a melhor instalação possível dos componentes, dados os materiais disponíveis na instituição. Ao término da instalação, foram feitos testes e medições para assegurar a confiabilidade do sistema e a possibilidade de uso simultâneo de vários equipamentos consumidores de ar comprimido.

Palavras-chave: Pneumática. Ar Comprimido. Instalação. Sistema pneumático. Compressor.

## ABSTRACT

This paper is a practical approach about the way of implementing a compressed air system for laboratorial usage in academic environment. After an introduction to the used concepts, taken from the available references, to the making of the project, a plan for the best possible installation of the components was thought, given the available materials on the institution. At the end of the installation, tests and measurements were made to ensure the reliability of the system and the possibility of simultaneous usage of many equipments that consume compressed air.

Key-words: Pneumatics. Compressed air. Installation. Pneumatic system. Compressor.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de compressores . . . . .	20
Figura 2 – Esquema de funcionamento de um compressor alternativo . . . . .	21
Figura 3 – Exemplo de rede de distribuição de ar comprimido aberta . . . . .	22
Figura 4 – Exemplo de rede de distribuição de ar comprimido fechada . . . . .	22
Figura 5 – Fonte de corte a plasma modelo Maxxicut 40, Balmer . . . . .	27
Figura 6 – <i>Soft starter</i> WEG SSW08 45 A . . . . .	28
Figura 7 – Modelo simplificado da rede de distribuição de ar comprimido . . . . .	30
Figura 8 – Unidade preparadora de ar comprimido com manômetro FRM 2400, Bel Air . . . . .	31
Figura 9 – Circuito eletrônico utilizado na <i>soft starter</i> para acionar o motor do compressor . . . . .	32
Figura 10 – Classes térmicas de proteção do motor a quente . . . . .	34
Figura 11 – Kit termofusor Ferrari TMF-63A . . . . .	35
Figura 12 – Medidores de pressão e vazão digitais utilizados no experimento de perda de carga . . . . .	37
Figura 13 – Medidor de pressão digital conectado ao filtro de ar no experimento de perda de carga . . . . .	37
Figura 14 – Gráfico de vazão [l/min] por perda de carga [bar] entre o início e o meio da tubulação( $\Delta P1$ ) . . . . .	41
Figura 15 – Gráfico de vazão [l/min] por perda de carga [bar] entre o início e o fim da tubulação ( $\Delta P2$ ) . . . . .	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de alcance de pressões por estágio do compressor . . . . .	21
Tabela 2 – Consumo de ar e suas respectivas pressões de trabalho . . . . .	27
Tabela 3 – Dados do compressor . . . . .	27
Tabela 4 – Dados do motor elétrico do compressor . . . . .	28
Tabela 5 – Tabela de comprimento equivalente das singularidades . . . . .	38
Tabela 6 – Dados do experimento para aferir queda de pressão na rede . . . . .	40

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LCTH	Laboratório de Ciências Térmicas e Hidráulicas
NF	Normalmente Fechado
PPR	Polipropileno
SI	Sistema Internacional de Unidades
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Ampère;
$A_j$	Corrente máxima;
$atm$	Atmosfera;
$cm$	Centímetro;
$d$	Diâmetro interno da tubulação;
$F_s$	Fator de serviço;
$L_t$	Comprimento efetivo;
$I_{motor}$	Corrente do motor;
$I_{ssw08}$	Corrente nominal da <i>soft starter</i> ;
$in$	Polegada;
$I_p$	Corrente de partida do motor;
$I_n$	Corrente nominal do motor;
$kgf$	Quilograma-força;
$lbf$	Libra força;
$m$	Metro;
$mm$	Milímetro;
$N$	Newton;
$\Delta P$	Perda de carga admitida;
$\Delta P1$	Perda de carga entre $P_a$ e $P_b$ ;
$\Delta P2$	Perda de carga entre $P_a$ e $P_f$ ;
$Pa$	Pascal;
$P_a$	Pressão no início da tubulação;
$P_b$	Pressão no meio da tubulação;
$P_f$	Pressão no fim da tubulação;
$P_1$	Pressão inicial do gás;

$P_2$	Pressão final do gás;
$Q$	Vazão efetiva;
$T_1$	Temperatura inicial do gás;
$T_2$	Temperatura final do gás;
$V_1$	Volume inicial do gás;
$V_2$	Volume final do gás.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>15</b>
1.1	Motivação . . . . .	15
1.2	Objetivos . . . . .	15
1.2.1	Objetivo geral . . . . .	15
1.2.2	Objetivos específicos . . . . .	15
<b>2</b>	<b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . . .</b>	<b>17</b>
2.1	Ar . . . . .	17
2.1.1	Lei geral dos gases perfeitos . . . . .	17
2.2	Pneumática . . . . .	18
2.2.1	Vantagens . . . . .	18
2.2.2	Desvantagens . . . . .	19
2.2.3	Aplicações . . . . .	19
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>20</b>
3.1	Compressores . . . . .	20
3.2	Redes de distribuição de ar comprimido . . . . .	21
3.2.1	Dimensionamento da rede de distribuição . . . . .	23
3.3	Unidade de condicionamento do ar . . . . .	24
3.4	Controles elétricos . . . . .	24
3.4.1	<i>Soft starter</i> . . . . .	24
3.5	Termofusão . . . . .	25
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>26</b>
4.1	Etapa de análise . . . . .	26
4.1.1	Demanda de Ar Comprimido dos Laboratórios . . . . .	26
4.1.2	Validação dos Equipamentos Disponíveis . . . . .	27
4.1.2.1	Compressor . . . . .	27
4.1.2.2	<i>Soft starter</i> . . . . .	28
4.1.2.3	Tubulação . . . . .	29
4.1.2.4	<i>Layout</i> . . . . .	29
4.1.2.5	Unidade de condicionamento . . . . .	30
4.2	Etapa de instalação . . . . .	31
4.2.1	<i>Soft starter</i> . . . . .	31
4.2.2	Suportes . . . . .	34
4.2.3	União e posicionamento da tubulação . . . . .	35

4.2.4	Testes e medições . . . . .	36
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>43</b>
6.1	Sugestões de pesquisas futuras . . . . .	43
6.1.1	Avaliação do efeito do condensado . . . . .	43
6.1.2	Plano de manutenção do sistema pneumático . . . . .	43
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>44</b>
	<b>ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE . . . . .</b>	<b>45</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O ar comprimido é uma ferramenta de alta aplicabilidade no mundo atual. Seu uso varia desde abertura e fechamento de portas de ônibus à controle de pressão de indústrias petroquímicas. Devido ao seu baixo risco de uso, alta potência e confiabilidade, pode ser uma boa alternativa para outros tipos de ferramentas (ELLIOT, 2006).

Neste trabalho serão abordados os principais temas estudados para a correta instalação do sistema pneumático dos laboratórios da engenharia mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Por se tratarem de assuntos longos, o enfoque será dado àqueles cuja utilização foi de fato consumada durante a aplicação do projeto. Em seguida será explicitada a metodologia de instalação juntamente com os equipamentos usados e suas especificações relevantes. Por fim serão apresentados os resultados obtidos e o que esperar do sistema quanto a sua utilização.

## 1.1 Motivação

Em uma faculdade de engenharia, o ar comprimido pode ser um grande diferencial no aprendizado dos alunos com a chegada de novos equipamentos e a possibilidade de novos projetos, sendo então essencial para a infraestrutura dos laboratórios. Assim, este projeto se tornou uma grande chance de contribuir com o ambiente acadêmico e aprender na prática como se realiza um projeto de engenharia.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Incluir o recurso de ar comprimido no Laboratório de Ciências Térmicas e Hidráulicas, no Laboratório de Soldagem, no Laboratório de Automação Industrial e Inteligência Computacional e no Laboratório de Metalografia de maneira eficiente e que possibilitasse futuras ampliações, caso necessário.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Validar os equipamentos já disponíveis para a instalação do sistema pneumático;
- Identificar o melhor *layout* para a tubulação de acordo com os recursos disponíveis e de forma otimizada;
- Instalar os componentes do sistema para atender a todos os laboratórios da engenharia mecânica permitindo futuras expansões, caso necessário;

- Realizar ensaios de perda de carga e pressão de trabalho para avaliar o desempenho do sistema;
- Avaliar a possibilidade de uso simultâneo de equipamentos em mais de um laboratório;
- Realizar todos os procedimentos de maneira segura e atentar às normas de segurança para evitar acidentes de uso do equipamento.

## 2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

### 2.1 Ar

Ar é o fluido gasoso que compõe a atmosfera. No nosso planeta o ar é formado por, principalmente, oxigênio (O<sub>2</sub> - 21%), nitrogênio (N<sub>2</sub> - 78%) e outros gases (1%), que envolvem toda a superfície terrestre, responsável pela existência de vida no planeta, segundo (PARKER, 2006). Uma característica importante dos gases é a pressão, cuja unidade de medida no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Pascal (Pa), que é o mesmo que Newton (N) dividido por metro quadrado  $m^2$ . Outras unidade de medida comumente utilizadas são:

- bar: 1 bar = 10000 Pa
- Libra força (lbf) por polegada quadrada  $in^2$ :  $1 \text{ lbf}/in^2 = 6890 \text{ Pa}$
- Atmosfera (atm): 1 atm = 101300 Pa

Como visto em (PRUDENTE, 2000), na atmosfera terrestre temos:

- Pressão atmosférica: pressão exercida sobre qualquer corpo no ar atmosférico. Varia em função da posição e do clima;
- Pressão relativa: pressão medida assumindo outra pressão como referência;
- Pressão absoluta: soma da pressão atmosférica e a pressão relativa.

#### 2.1.1 Lei geral dos gases perfeitos

Para compreender melhor as transformações de estado nos gases, utilizamos as leis de Boyle-Mariotte, Charles e Gay-Lussac, sendo que uma das variáveis físicas permanece constante. Usualmente é visto um relacionamento entre todas elas, fazendo-se necessário uma expressão generalizada conhecida como Lei geral dos gases perfeitos, como dito por (PARKER, 2006). É expressa pela fórmula:

$$\frac{(P_1 \times V_1)}{T_1} = \frac{(P_2 \times V_2)}{T_2} \quad (2.1)$$

Onde:

- $P_1$ : Pressão inicial;
- $V_1$ : Volume inicial;
- $T_1$ : Temperatura inicial;

- $P_2$ : Pressão final;
- $V_2$ : Volume final, e;
- $T_2$ : Temperatura final.

## 2.2 Pneumática

Como citado em (FIALHO, 2003), a pneumática é conceituada como sendo a matéria que trata dos movimentos e fenômenos dos gases e justifica a sua utilização no mercado a partir de suas vantagens e faz algumas ressalvas quanto às suas limitações:

### 2.2.1 Vantagens

- Quantidade: abundância de ar a ser comprimido;
- Transporte: transporte por tubulações, não sendo necessárias linhas de retorno;
- Armazenamento: o ar comprimido é armazenado em um reservatório e só há necessidade de ativar o compressor quando a pressão atinge valores menores que o mínimo ajustado em um pressostato;
- Temperatura: oscilações de temperatura não atingem o funcionamento seguro do uso do ar comprimido;
- Segurança: não há riscos de explosão ou incêndio e mesmo que houvesse por falha estrutural de componente ou do reservatório, a pressão de trabalho é relativamente baixa (6 a 12 bar);
- Limpeza: como se trata do próprio ar do ambiente, a poluição se torna nula;
- Construção: as baixas pressões de trabalho resultam na utilização de elementos de comando menos robustos e mais leves, tornando seu custo mais barato;
- Velocidade: é um meio de trabalho que permite altas velocidades de deslocamento, usualmente entre 1 e 2m/s, mas podendo atingir velocidades maiores em casos especiais;
- Regulagem: a regulagem é feita por velocidade e força conforme a necessidade da aplicação;
- Segurança em sobrecarga: os sistemas pneumáticos podem ser exigidos em carga, até parar, sem sofrer dano, retornando ao normal assim que se encerra a resistência.

### 2.2.2 Desvantagens

- **Preparação:** o ar ambiente contém umidade e impurezas que devem ser filtradas afim de prolongar a vida útil dos componentes do sistema;
- **Compressibilidade:** devido à esta propriedade dos gases, não existe controle de velocidade do ar comprimido, levando à velocidades não uniformes e inconstantes;
- **Força:** haja vista que as pressões atingidas por um sistema pneumático são mais baixas, logo as forças exercidas pelos seus atuadores, são igualmente baixas (48250 N utilizando pressão de trabalho de 6 bar);
- **Escape de ar:** com o movimento dos atuadores, o ar é expulso do sistema gerando ruídos que podem ser altos;
- **Custos:** o custo inicial de instalação de um sistema pneumático é elevado, mas acaba compensando com a rentabilidade do equipamento.

### 2.2.3 Aplicações

A pneumática possui diversas aplicações e deve ser visto com uma ferramenta altamente útil. Assim, como visto em (ELLIOT, 2006), podem ser citados alguns desses exemplos que comprovam a importância do ar comprimido:

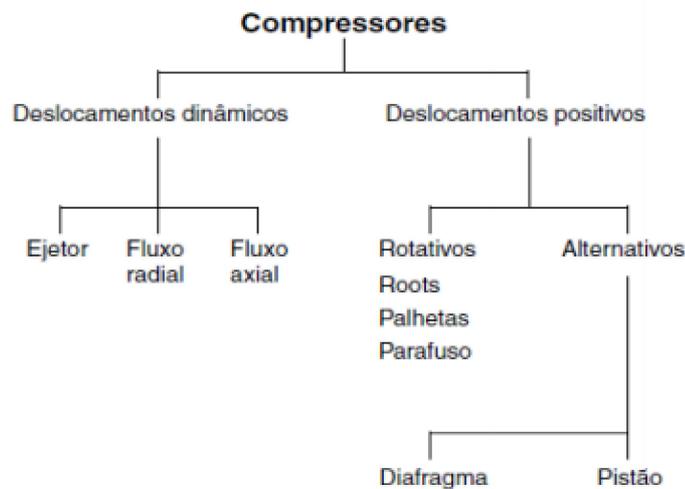
1. **Extintores de incêndio:** equipamentos de vital importância no combate a princípios de incêndios. Ao pressionar o gatilho, o ar comprimido expande e empurra junto consigo a substância extintora.
2. **Motores pneumáticos:** são motores acionados pelo ar comprimido para gerar torque e rotação. São altamente confiáveis e facilmente inversíveis.
3. **Freios a ar:** muito utilizados em caminhões e trens. Nos trens, cada vagão possui seu próprio cilindro de ar comprimido que atua quando acionado o comando de frenagem.
4. **Infladores de pneus:** ferramentas vistas comumente em postos de gasolina, utilizadas para colocar determinada pressão de ar dentro de pneus em geral.
5. **Pulverizadores de tinta:** usados para pinturas variadas. Podem ser úteis para artes, camisas e até para pintura de carros.
6. **Cilindros de ar para mergulho:** sua função primária é prover ar respirável para o mergulhador. O cilindro possui uma pressão interna determinada, que permite a saída do ar quando solicitada pelo usuário, mesmo a pressões altas no oceano.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Compressores

Compressores são máquinas que elevam a pressão de determinado volume de gás até um valor desejado. Os compressores podem ser classificados de acordo com o seu princípio de trabalho, segundo (PAVANI, 2010). Essa classificação pode ser vista como no esquema da figura 1:

Figura 1 – Tipos de compressores



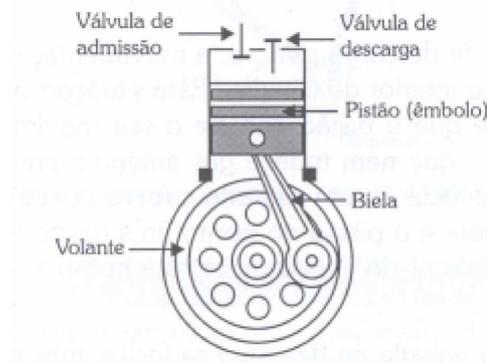
Fonte: (PARKER, 2006)

Temos então dois grandes grupos de compressores, os de deslocamento positivo e os de deslocamento dinâmico. De acordo com (PRUDENTE, 2000), podemos dizer que os compressores de deslocamento positivo são utilizados para pequenas vazões e grandes pressões, enquanto os de deslocamento dinâmico são para grandes vazões e pequenas pressões.

O compressor de deslocamento positivo funciona a partir da redução do volume do gás. Para o ar comprimido, o ar é admitido por uma câmara exterior e seu volume é gradualmente reduzido, realizando a compressão (PAVANI, 2010). São representados, principalmente, pelos compressores alternativos e pelos compressores de parafusos assimétricos.

Conforme citado em (FIALHO, 2003), compressores alternativos são máquinas que utilizam um sistema de biela-manivela para comprimir o ar dentro de um pistão. A pressão gerada abre uma válvula de descarga para que o ar pressurizado prossiga no sistema. No retorno do pistão, a válvula de descarga se fecha e abre-se a válvula de admissão, que permite a entrada do ar para um novo ciclo de compressão. A figura 2 mostra o esquema de funcionamento de um compressor alternativo:

Figura 2 – Esquema de funcionamento de um compressor alternativo



Fonte: (FIALHO, 2003)

Em alguns casos, somente um pistão não é o suficiente, ou não é tão eficiente, para alcançar a pressão desejada. Desta forma há a possibilidade de aumentar o número de estágios de compressão, conforme (PARKER, 2006).

No caso de um compressor de dois estágios, podemos ver mais etapas do que a admissão e descarga do compressor de um estágio. Segundo (PRUDENTE, 2000) identifica-se fases simultâneas, como a de admissão no superior de um pistão enquanto a parte inferior executa a compressão. Desta forma na tabela 1 temos:

Tabela 1 – Tabela de alcance de pressões por estágio do compressor

<b>Pressão</b>	<b>Nº de Estágios</b>
Até 400 Kpa (4bar)	1
De 400 a 1500 Kpa (15bar)	2
De 1500 a 15000 Kpa (150bar)	3 ou mais

Fonte: (FIALHO, 2003)

### 3.2 Redes de distribuição de ar comprimido

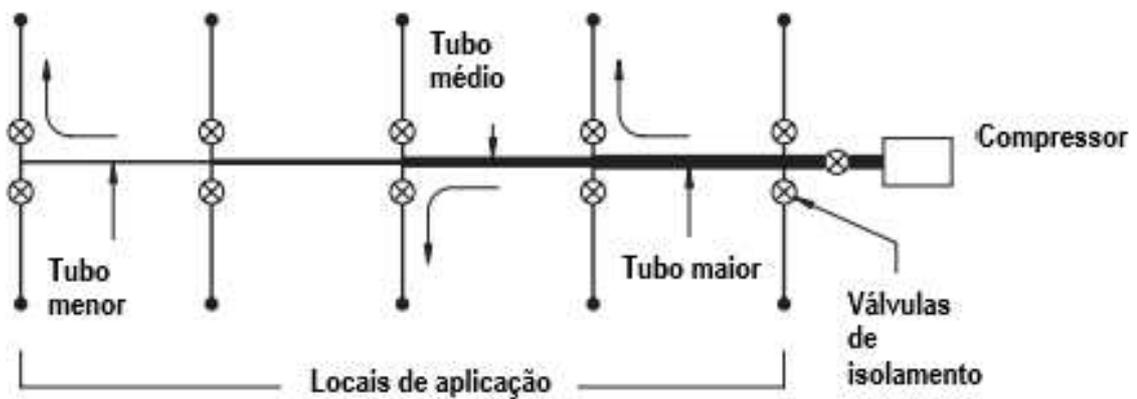
A rede de distribuição engloba toda a tubulação que orienta o ar comprimido que sai da fonte até a máquina consumidora. De acordo com (PARKER, 2006), temos duas funções para a rede:

1. Comunicar a fonte aos consumidores;
2. Funcionar como reservatório para exigências locais.

Ainda conforme (PARKER, 2006), um sistema de distribuição bem planejado deve atender a alguns requisitos, como a baixa queda de pressão entre o compressor e os consumidores de ar comprimido, não apresentar vazamentos e ter boa capacidade de separar condensados. Isso garante a pressão adequada de operação para os equipamentos e contribui com a vida útil desses mesmos.

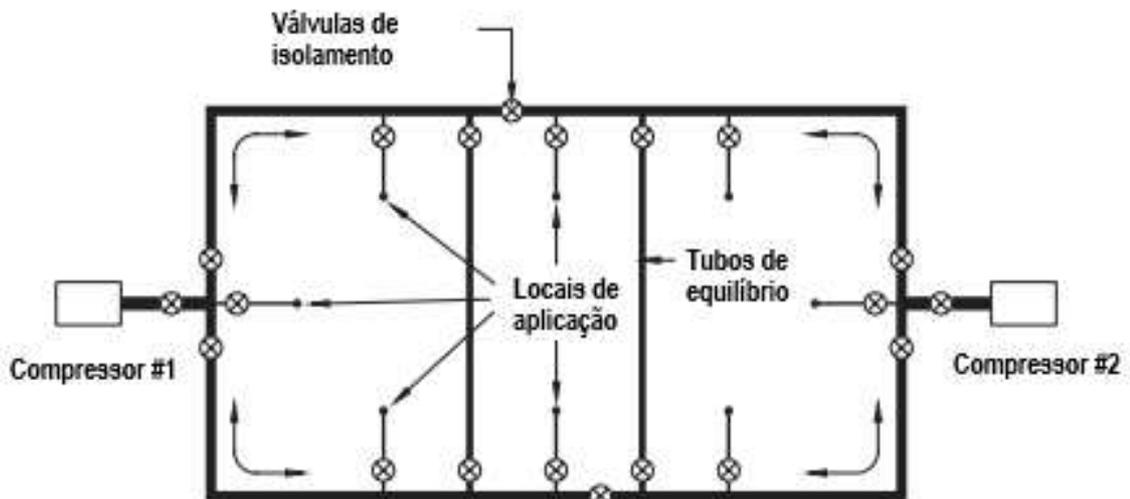
Como visto em (ELLIOT, 2006) existem duas formas de se projetar um *layout* para a rede, a aberta e a fechada. A primeira se torna mais viável para instalações de pequeno porte, pois a pressão pode decair ao longo do curso ocasionando no mal funcionamento dos equipamentos consumidores. A segunda é mais indicada em locais maiores e com maior demanda de ar comprimido. As figuras 3 e 4 mostram exemplos dos *layouts* citados:

Figura 3 – Exemplo de rede de distribuição de ar comprimido aberta



Fonte: (ELLIOT, 2006)

Figura 4 – Exemplo de rede de distribuição de ar comprimido fechada



Fonte: (ELLIOT, 2006)

Independentemente do *layout* escolhido, é inevitável o uso de curvaturas e outras singularidades. Apesar de serem componentes úteis para mudar o sentido do fluxo de ar comprimido, eles acabam aumentando a perda de carga (PARKER, 2006).

### 3.2.1 Dimensionamento da rede de distribuição

Para dimensionar a tubulação devemos conhecer alguns parâmetros e pensar em futuras ampliações, de acordo com (PRUDENTE, 2000). São eles:

- Vazão efetiva;
- Pressão de serviço;
- Perda de carga admissível e
- Comprimento efetivo da tubulação

Para a vazão efetiva deve-se levar em consideração a vazão utilizada por todos os equipamentos consumidores de ar comprimido e um percentual projetado para o crescimento da linha, segundo (FIALHO, 2003).

A pressão de serviço é a encontrada no reservatório. (PRUDENTE, 2000) diz que a perda de carga admissível deve ser, no máximo, 5% da pressão em curso. Em geral deve permanecer entre 0,1 e 0,3 bar. Ela ocorre devido às perdas por atrito dentro da tubulação ou por motivos de alterações de fluxo bruscas próximas a pontos de estrangulamento. Por fim, o comprimento efetivo se dá pela soma do comprimento da linha somado ao comprimento efetivo das singularidades encontradas na linha principal ou tronco (FIALHO, 2003). Assim:

$$L_t = L_1 + L_2 \quad (3.1)$$

Onde:

- $L_t$ : Comprimento efetivo;
- $L_1$ : Comprimento linear da linha e;
- $L_2$ : Comprimento equivalente.

Assim, podemos equacionar esse parâmetros acima na seguinte equação (FIALHO, 2003):

$$d = 10 \times \sqrt[5]{\frac{(1,663758 \times 10^{-3} \times Q^{1,85} \times L_t)}{\Delta P \times P}} \quad (3.2)$$

Onde:

- $d$  = Diâmetro interno da tubulação [ $mm$ ];
- $Q$  = Vazão efetiva [ $m^3/s$ ];
- $L_t$  = Comprimento efetivo [ $m$ ];
- $\Delta P$  = Perda de carga admitida [ $kgf/cm^2$ ];
- $P$  = Pressão de serviço [ $kgf/cm^2$ ].

Outro cuidado necessário para se ter com a rede é a sua inclinação. Com o intuito de recolher o condensado que possa haver dentro da tubulação, recomenda-se uma inclinação de 0,5 a 2% do comprimento da tubulação e preferencialmente no sentido do fluxo, segundo (PARKER, 2006).

### 3.3 Unidade de condicionamento do ar

Em qualquer sistema de ar comprimido, há a necessidade de preparo do ar para ser utilizado. Usualmente utiliza-se um filtro de particulado junto com um purgador para reduzir a umidade do ar e, conseqüentemente, contribuir com a manutenção da parte interna dos componentes da rede, conforme (ELLIOT, 2006). Além disso, deve-se atentar ao devido cuidado da parte interna do sistema pneumático para evitar que os equipamentos consumidores do ar comprimido sejam danificados ou não funcionem adequadamente.

Estes componentes ficam situados ao final da tubulação secundária, que sai da tubulação central e leva direto ao ponto de uso do ar comprimido. Desta forma o ar fica pronto para ser utilizado assim que saírem destes.

### 3.4 Controles elétricos

A maioria dos compressores utilizam a eletricidade como fonte de energia para controlar o seu devido funcionamento. Assim como dito por (ELLIOT, 2006) a principal função da eletricidade é a de ligar e desligar o motor, mas podem haver outras funcionalidades que podem envolver até complexos sistemas com microcontroladores.

#### 3.4.1 *Soft starter*

Durante a partida do compressor de ar, a corrente requisitada pelo seu motor pode alcançar de cinco a sete vezes maior que a corrente de operação e o torque pode chegar a ser duas vezes maior (YOUXIN et al., 2007). Esse grande valor de corrente pode comprometer outros aparelhos ligados à rede elétrica bem como a estabilidade da própria rede.

Para proteger o motor do compressor e manter a segurança da rede elétrica, é essencial utilizar dispositivos de partida. *Soft starter* é um dispositivo que suaviza a carga inicial na partida do motor. O seu funcionamento envolve o uso de retificadores controlados de silício para regular, de uma forma bem precisa, o sinal elétrico dado ao motor, sendo inicialmente uma porcentagem bem baixa, aumentando-a conforme o passar do tempo, chegando à plena carga no final da operação. Esse processo dura até 30 segundos (ELLIOT, 2006).

### 3.5 Termofusão

Termofusão é uma das formas mais simples de soldar materiais plásticos (WATSON, BURCH 1989). É uma técnica utilizada para produção em massa e de grandes estruturas, como tubulações. Em geral, seu uso se justifica quando há necessidade de juntas de alta integridade, quando há fluido envolvido. O processo é considerado lento e varia de acordo com o material e o tamanho da estrutura a ser unida.

A técnica da termofusão é bem simples e consiste no aquecimento das extremidades dos plásticos a serem unidos por um determinado período de tempo, a uma temperatura específica para o material. Ao final do processo de aquecimento, junta-se as partes e aplica-se uma pressão por um novo período de tempo pré-determinado até que ambos os plásticos se unam.

## 4 METODOLOGIA

Para a devida implementação do sistema pneumático, foi necessário determinar uma sequência de ações para definir como metodologia de instalação. Assim, ficou estabelecido que o projeto seria dividido em duas etapas, a de análise e a de instalação.

Na etapa de análise foi realizado o levantamento da demanda de ar comprimido de todos os laboratórios contemplados e de todos os componentes já disponíveis na instituição. Em seguida foi feito o *layout* da tubulação conforme a estrutura do prédio e dos pontos ideais para o consumo do ar.

A etapa de instalação foi subdividida em cinco passos, considerando que o abrigo para o compressor já havia sido construído e este devidamente alocado em seu interior. O primeiro passo foi a ligação elétrica e configuração da *soft starter* em conjunto com o botão de emergência para segurança dos laboratórios e do sistema. O segundo passo foi a fabricação e colocação de suportes para sustentar a tubulação na parte superior dos laboratórios seguindo o *layout* estabelecido. O terceiro passo foi a termofusão dos tubos e conexões juntamente com a colocação destes nos suportes já posicionados no segundo passo. O quarto passo foi o posicionamento dos filtros de ar para o consumo das máquinas bem como a tubulação de alimentação destes. O último passo foi o acionamento do compressor juntamente com as medições pertinentes para assegurar o devido funcionamento do sistema.

### 4.1 Etapa de análise

#### 4.1.1 Demanda de Ar Comprimido dos Laboratórios

O ponto de partida de qualquer instalação pneumática é entender qual a sua demanda para poder dimensionar os seus componentes de maneira adequada. Desta forma, foi feito uma investigação de quantas e quais máquinas usariam o ar comprimido e qual seria a perspectiva de crescimento do uso a partir do momento em que o sistema fosse implementado.

Foi perguntado para os coordenadores dos laboratórios contemplados e foi detectado que, inicialmente, a demanda de ar ficaria por conta das bancadas didáticas do Laboratório de Automação Industrial e Inteligência Computacional ( $P = 6bar$ ) e da fonte de corte a plasma modelo Maxxicut 40 da Balmer ( $Q = 91l/min$ ,  $P = 6bar$ ), ilustrada na figura 5. Como as bancadas fazem uso intermitente e de vazão imprevisível, foi calculado um valor de 6 l/min, levando em consideração que cada bancada utiliza 4 atuadores de 150 mm de curso e 15  $cm^2$  de área efetiva atuando 5 vezes por minuto. Logo, em 6 bancadas teríamos 36 l/min. Entretanto, sabendo da melhoria constante da infraestrutura da engenharia, foi feito uma previsão de aumento da demanda de ar comprimido em 50%.

Figura 5 – Fonte de corte a plasma modelo Maxxicut 40, Balmer



Imagem retirada do site [www.balmer.com.br/maxxicut-40](http://www.balmer.com.br/maxxicut-40)

Simplificando, temos:

Tabela 2 – Consumo de ar e suas respectivas pressões de trabalho

Consumidores	Vazão [l/min]	Pressão de trabalho [bar]	Pressão de trabalho [kgf]
Maxxicut 40	91	6	6,12
Bancadas didáticas (x6)	36	6	6,12
Total	127	6	6,12

#### 4.1.2 Validação dos Equipamentos Disponíveis

##### 4.1.2.1 Compressor

O compressor disponível era o modelo MSW-60 MAX/425 da Schulz. Este é um compressor de dois estágios, que permite pressões de trabalho de até 12 bar e possui o próprio tanque de armazenamento de ar comprimido (WEG, 2001). Os seus dados estão especificados na tabela abaixo:

Tabela 3 – Dados do compressor

MODELO	DESL. TEÓRICO		PRESSÃO MÁX.		RESERVATÓRIO		rpm	o Polia (mm)		Correia	MOTOR ELÉTRICO			ÓLEO LUBRIF.		PESO C/ MOTOR (kg)	PINTURA
	pes <sup>3</sup> /min	l/min	lbf/pol <sup>2</sup>	bar	Volume geom. (l)	Tempo Enchim.		50 Hz	60 Hz		hp	kW	Tensão (V) Trifásico	Volume (l)	Ref.		
MSW 60 MAX/425					480	3'45"										442	RAL 5004 (Schulz)
MSW 60 MAX/AD	60	1700	175	12	-	-	1020	190	150	2B	15	11,3	220/380 380/660 60 Hz	1,5	MS LUB SCHULZ (Schulz)	135	
WW 60 G/425					480	3'45"									WAYNOIL (Wayne)	442	RAL 3001 (Wayne)

Fonte: (SCHULZ, 2001)

Por se tratar de um equipamento robusto, foi construído um abrigo especificamente para a sua alocação, o que contribuiu com a segurança e conservação do compressor. Suas medidas são de 2,90 m de largura, 1,30 m de comprimento e 2,10 m de altura. Ele ficou localizado atrás do Laboratório de Ciências Térmicas e Hidráulica (LCTH).

#### 4.1.2.2 *Soft starter*

Em um ambiente universitário, assim como em outros, é de suma importância que as novas instalações não interfiram negativamente nas antigas. Então foi necessário usar uma *soft starter* para evitar oscilações na rede elétrica do prédio.

O motor ao qual a *soft starter* deve dar partida é o WEG W22 IP55 trifásico 60Hz, cujos dados estão na tabela 4:

Tabela 4 – Dados do motor elétrico do compressor

Potência		Carcaça	RPM	Corrente nominal em 220V (A)	Corrente com rotor bloqueado $I_p/I_n$	Conjugado nominal $C_n$ (kgfm)	Conjugado com rotor bloqueado $C_p/C_n$	Conjugado máximo $C_{max}/C_n$	Rendimento $\eta\%$			Fator de potência $\cos\phi$			Fator de serviço FS	Momento de inércia J (kgm <sup>2</sup> )	Tempo máx. com rotor bloqueado (s) a quente	Nível médio de pressão sonora dB (A)	Peso aprox. (kg)
cv	kW								% da potência nominal										
									50	75	100	50	75	100					
15	11	132M	3520	36,9	8,5	3,04	2,6	3,3	85,0	87,5	87,8	0,77	0,85	0,89	1,15	0,02804	5	72	72

Fonte: Adaptado de (WEG, 2001)

O modelo encontrado foi o WEG SSW 08 para correntes de até 45 Ampères, que se mostrou o mais próximo ao necessário no mercado, ideal para o projeto. Os parâmetros avaliados foram a corrente máxima da *soft starter*, a corrente nominal do motor e a disponibilidade de controle e atuação a partir do pressostato. A figura 6 ilustra o modelo utilizado.

Figura 6 – *Soft starter* WEG SSW08 45 A



Fonte: (WEG, 2015)

#### 4.1.2.3 Tubulação

Haviam disponíveis aproximadamente 50 m de tubulação de polipropileno (PPR) de 23,5 mm de diâmetro interno e 32 mm de diâmetro externo. Haviam também algumas curvaturas e singularidades para contornar obstáculos ou dividir a rede. Todos os materiais seguem a norma ABNT 6493 e, portanto, são de cor azul (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018).

O ideal seria ter o *layout* do sistema e então definir o diâmetro requerido pela tubulação, porém não havia a possibilidade de comprar novos materiais para os tubos. Então foi feito um raciocínio inverso em que se conhece o diâmetro e tentou-se construir o *layout* com o comprimento máximo referente aos parâmetros conhecidos.

#### 4.1.2.4 Layout

O posicionamento mais adequado do sistema pneumático deveria atender a todos os laboratórios, ter o menor comprimento possível para evitar perda de carga, permitir fácil acesso para uso e não obstruir passagens.

Dada a pequena estrutura do prédio da Engenharia Mecânica, foi necessário utilizar o *layout* aberto. Ou seja, a tubulação sai do compressor e encerra no final da rede, não havendo retorno do ar. Isso significa que a perda de carga esperada seria maior do que numa rede fechada.

Para determinar o comprimento máximo para a tubulação principal, foi utilizada a equação (3.2). Como o diâmetro da tubulação já era conhecido, foi necessário manipular as variáveis para que o resultado fosse o comprimento da tubulação. Assim, temos:

$$L_t = \frac{(10^5 \times \Delta P \times P)}{(1,663758 \times 10^{-3} \times Q^{1,85} \times d^5)} \quad (4.1)$$

Utilizando:

- $\Delta P = 0,3 \text{ kgf/cm}^2$ ;
- $P = 6,12 \text{ kgf/cm}^2$ ;
- $Q = 127 \times 150\% \text{ l/min}$ ;  
 $Q \approx 200 \text{ l/min}$ ;  
 $Q = 12 \text{ m}^3/\text{h}$ ;
- $d = 23,5 \text{ mm}$ .

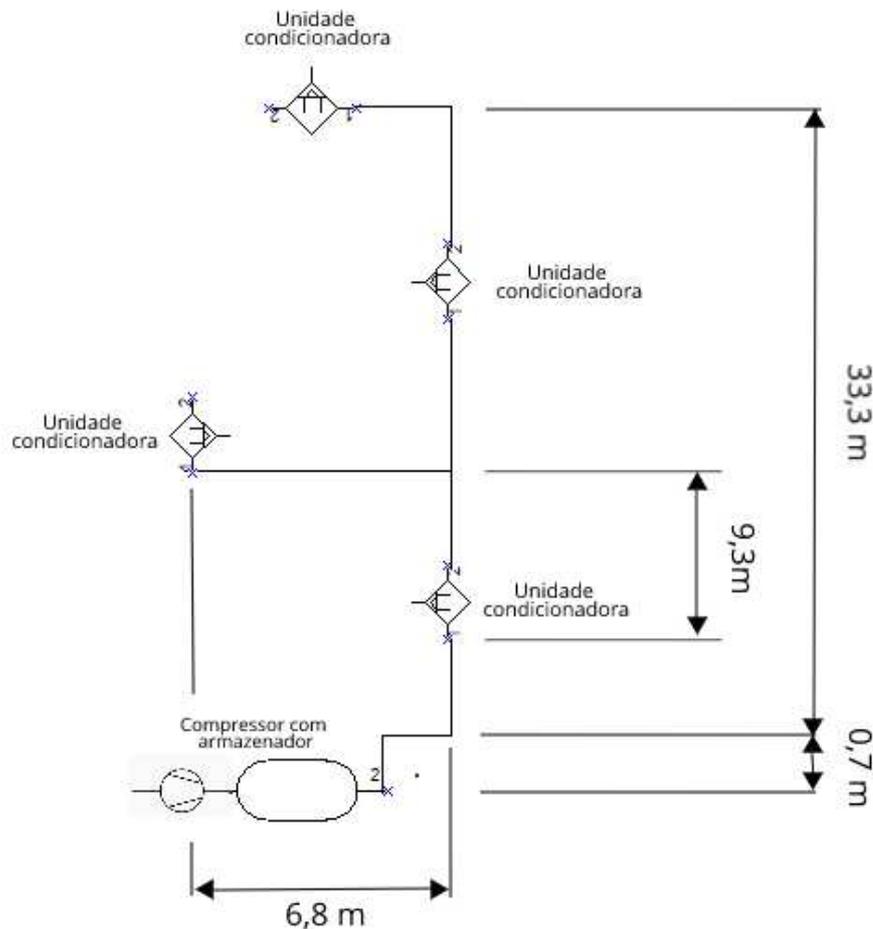
Como isso chegamos em:

$$L_t = \frac{(10^5 \times (0,3) \times (6,12))}{(1,663758 \times 10^{-3} \times (12)^{1,85} \times (23,5)^5)} = 797m. \quad (4.2)$$

Esse valor permite que o sistema tenha um comprimento muito maior do que o necessário, o que sugere que o diâmetro da tubulação admita grandes aumentos na demanda. O valor de vazão foi ajustado para  $Q = 12m^3/h$  para condizer com a projeção de aumento da demanda do ar comprimido.

Para melhorar a visualização durante o processo de instalação, foi feito um modelo simplificado do *layout* da rede de distribuição conforme a figura 7:

Figura 7 – Modelo simplificado da rede de distribuição de ar comprimido



#### 4.1.2.5 Unidade de condicionamento

Para o condicionamento do ar no ponto de utilização, foi utilizado o filtro Bel Air FRM 2400, ilustrado na figura 8. Ele dispõe de um filtro de ar, um purgador, uma válvula de controle de pressão e um manômetro analógico. Todas as máquinas consumidoras

deverão ser conectadas na saída deste para a devida utilização do ar comprimido. A sua saída é roscada de 1/2" de diâmetro.

Figura 8 – Unidade preparadora de ar comprimido com manômetro FRM 2400, Bel Air



Imagem retirada do site [www.ararenseferramentas.com.br/filtro-regulador-ar-com-manometro-frm-2400-bel-air-45218a86-8cea-11e7-9e90-0987f3350dda](http://www.ararenseferramentas.com.br/filtro-regulador-ar-com-manometro-frm-2400-bel-air-45218a86-8cea-11e7-9e90-0987f3350dda)

## 4.2 Etapa de instalação

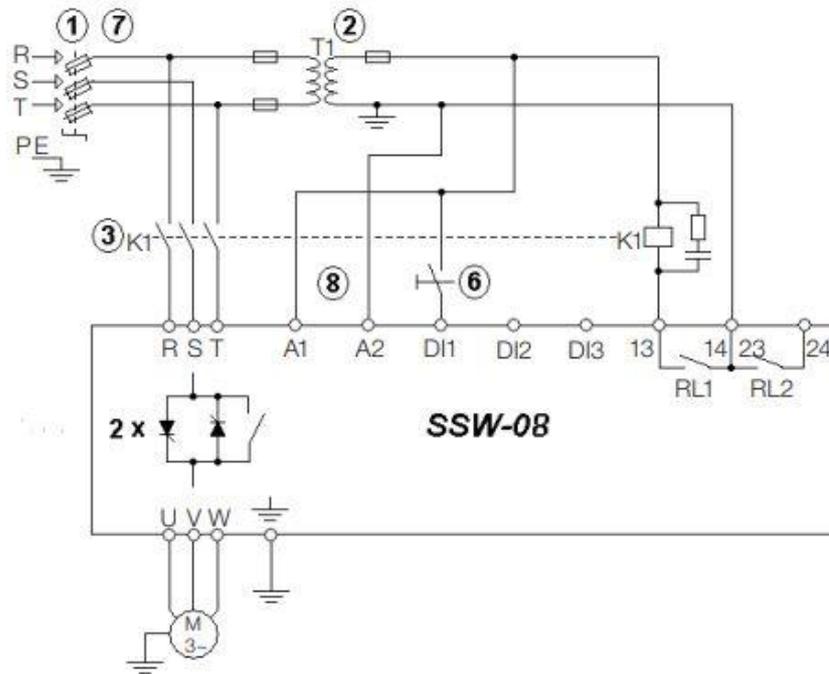
### 4.2.1 *Soft starter*

Para configurar a *soft starter* foi feito o *setup* inicial através de rampa de tensão para que a *soft starter* controlasse a tensão dada ao compressor e não sobrecarregasse a rede elétrica. Assim, como podemos ver em (WEG, 2015) temos:

#### 1. **Circuito eletrônico:**

Para a sua correta instalação, foi preparado o circuito eletrônico 6 descrito em (WEG, 2015). A escolha deste circuito se deu devido à necessidade de apenas acionar o motor do compressor através de um pressostato. O pressostato está representado como o item 6 da figura 9:

Figura 9 – Circuito eletrônico utilizado na *soft starter* para acionar o motor do compressor



Fonte: (WEG, 2015)

Uma adição no item 6 foi feita para melhorar ainda mais a segurança do sistema. Um botão de emergência localizado próximo ao compressor foi instalado juntamente com o pressostato como um contato normalmente fechado (NF). Desta forma, somente haverá corrente caso a botoeira de segurança estiver destravada e a pressão estiver abaixo da limítrofe. A botoeira utilizada foi a Lukma LK2 cogumelo de 22mm, NF gira destrava, em uma caixa WEG PDW/DLW.

2. **Ajuste da tensão inicial:** O ajuste da tensão inicial foi realizado a partir da tensão mínima de acionamento do motor. Foi configurado para o mínimo da *soft starter* e foram dados leves incrementos na tensão até que o motor saísse da inércia.
3. **Ajuste da corrente do motor:** Este ajuste define o valor limite máximo de corrente durante a partida do motor em porcentagem da corrente nominal da *soft starter*. Assim, conforme descrito no manual, temos:

$$A_j = \frac{I_{motor}}{I_{ssw08}} \quad (4.3)$$

Onde:

- $A_j$  = Corrente máxima;
- $I_{motor}$  = Corrente do motor, e;
- $I_{ssw08}$  = Corrente nominal da *soft starter*.

Contudo utilizamos um fator de serviço para maior segurança do sistema, assim:

$$A_j = \frac{I_{motor} \times F_s}{I_{ssw08}} \quad (4.4)$$

Onde:

- $F_s$  = Fator de serviço.

Assim,

$$A_j = \frac{36 \times 1,15}{45} = 0,92 \quad (4.5)$$

4. ***kickstart*** Foram realizados testes com o equipamento já pressurizado para avaliar a necessidade de uma carga inicial, *kickstart*, para dar a partida. O motor não teve problemas em ser acionado sem *kickstart*, então descartou-se a sua utilização.

#### 5. **Determinação da classe térmica máxima:**

A classe térmica é encontrada a partir dos dados do motor elétrico a ser acionado. Assim, utilizando os dados da tabela 3:

- Tempo máximo de rotor bloqueado = 5s;
- Corrente com motor bloqueado  $\frac{I_p}{I_n} = 8,5$

Onde:

- $I_p$  = Corrente de partida;
- $I_n$  = Corrente nominal do motor.

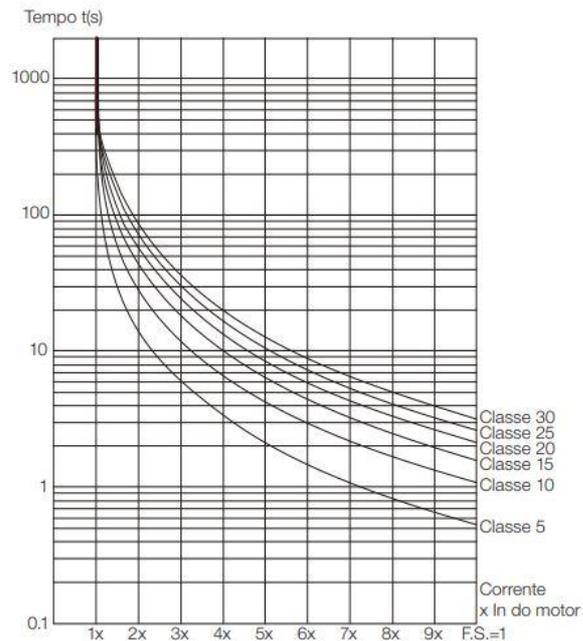
- Fator de serviço ( $F_s$ ) = 1,15

Assim temos que:

$$\frac{I_p}{I_n} = 7,39 \times I_n \quad (4.6)$$

Encontra-se esse ponto no gráfico da figura 10 para determinar a classe térmica máxima:

Figura 10 – Classes térmicas de proteção do motor a quente



Fonte: (WEG, 2015)

Assim, encontramos a classe térmica máxima entre 20 e 25. Valor aceitável para o uso em que se dá partida ocasionalmente ao invés de uso contínuo do compressor. O gráfico usado foi o de motor a quente e o  $F_s$  foi de 1 por ser o pior caso possível com o intuito de aumentar a segurança da partida do motor. Isso possibilita mais partidas por hora em segurança sem o risco de sobrecarga da *soft starter*.

#### 4.2.2 Suportes

A tubulação foi projetada para ficar próxima ao teto, passando por dentro dos laboratórios até chegar na última unidade de condicionamento. Desta forma, houve-se a necessidade de instalar suportes para segurar a tubulação em seu lugar e evitar vibrações com o fluxo de ar em seu interior.

Foram fabricadas, dentro do Laboratório de Processos de Fabricação da própria Faculdade de Engenharia, barras de ferro com espessura de 5 mm, que passaram por buracos feitos na parede para comunicar todos os laboratórios a serem alimentados pelo ar comprimido. Essas barras foram afixadas na extremidade de suportes aparafusados ao teto dos laboratórios, sendo posicionados a cada 2,5 m. A distância dessas barras até o teto é de 20 cm. Logo abaixo, a cada 0,5 m foram colocadas abraçadeiras para sustentar, de fato, a tubulação pneumática.

#### 4.2.3 União e posicionamento da tubulação

Todas as conexões da tubulação e suas singularidades foram feitas através de termofusão do PPR. Com a termofusora Ferrari TMF-63A, ilustrado na figura 11, foi feito o seguinte procedimento para cada segmento a ser soldado:

- Seleção dos bocais adequados para o encaixe do tubo;
- Aquecimento da termofusora até a temperatura de 260°C;
- Conexão simultânea da extremidade do tubo no bocal maior e do componente a ser unido no bocal menor;
- Espera de 10 segundos;
- Desacoplamento dos componentes e dos bocais;
- Junção das partes a serem soldadas;
- Espera de 10 segundos aplicando força moderada para unir o tubo e o componente;
- Limpeza dos bocais.

Figura 11 – Kit termofusor Ferrari TMF-63A



Imagem retirada do site [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-896573224-termofusora-para-soldar-tubos-e-conexoes-ppr-tmf-63a-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-896573224-termofusora-para-soldar-tubos-e-conexoes-ppr-tmf-63a-_JM)

Se feito corretamente, este procedimento garante que a tubulação fique bem unida e agente a pressão de trabalho sem que haja vazamentos ou rupturas. Essa etapa era de extrema importância devido às limitações de material e caso houvessem falhas, parte do tubo deveria ser descartado.

À medida que a tubulação era soldada, ela era colocada em seu devido local junto ao suporte previamente instalado, seguindo o *layout* estabelecido.

As unidades de condicionamento do ar comprimido foram então instalados nos locais considerados ideais e as tomadas de ar foram feitas ligando estes à tubulação principal. Este procedimento foi feito exatamente nessa ordem pensando em deixar a unidade de condicionamento em uma altura acessível a qualquer operador e que evite acidentes ao utilizá-la. A conexão das unidades de condicionamento à tubulação foi feita utilizando um cotovelo de PPR com uma extremidade roscada de 1/2".

#### 4.2.4 Testes e medições

O último passo da instalação é assegurar que o sistema está de fato funcionando e de maneira eficiente, sem vazamentos e com baixa perda de carga. Para isso foi feita um teste de estanqueidade realizando uma completa pressurização da rede acionando o compressor até encher o reservatório do mesmo. Depois foi cortada a alimentação elétrica do motor, através da *soft starter*, para evitar que ele fosse ligado por baixa de pressão. O sistema foi deixado neste estado por três dias para detectar alguma queda de pressão.

Em seguida foi necessário avaliar a perda de carga na tubulação realizando um teste com vazões definidas e medindo as pressões em diferentes pontos do sistema. Assim, foi utilizada a pressão de 9 bar no reservatório, aferida pelo manômetro do próprio equipamento. Este passo foi necessário para atingir a pressão do sensor disponível no laboratório.

Foram utilizados sensores digitais de pressão, modelo SDE1 da Festo e sensores de vazão, modelo SFE3 com *display* digital, da Festo. Um dos sensores foi colocado na primeira unidade condicionadora de ar, um foi posicionado junto à unidade condicionadora mais próxima ao final da tubulação em que não havia fluxo de ar e o outro foi colocado no final da rede junto com os medidores de vazão. Em seguida foram inseridas quatro válvulas reguladoras de fluxo para ajustar a quantidade de ar que seria liberado. Desta forma foi possível avaliar a pressão durante todo o sistema com uma vazão determinada. Este experimento visava encontrar a perda de carga levando em consideração o começo, uma parte central de aproximadamente dois terços da tubulação e o seu final, localizados no LCTH, Laboratório de Soldagem e Laboratório de Metalografia, respectivamente.

Figura 12 – Medidores de pressão e vazão digitais utilizados no experimento de perda de carga



Figura 13 – Medidor de pressão digital conectado ao filtro de ar no experimento de perda de carga



## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Durante a instalação do sistema pneumático não houveram preocupações com o tamanho da linha, haja vista que o resultado da equação (4.2) nos deu liberdade suficiente para trabalhar com um valor realmente grande de tubulação. O fator limitante foi de fato a quantidade de material disponível. Para calcular o comprimento efetivo, utilizamos a seguinte tabela:

Tabela 5 – Tabela de comprimento equivalente das singularidades

Diâmetro	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"	6"
Cotovelo 90°	1,10	1,34	1,58	2,25	2,60	2,80	3,40	4,00	2,20	2,70
Curva 90°	0,67	0,70	0,83	1,00	1,10	1,10	1,20	1,40	1,50	1,70
Tê (fluxo dividido)	0,80	1,20	1,50	2,40	3,00	3,90	4,80	6,00	8,00	9,20
Válvula gaveta	0,17	0,20	0,25	0,37	0,46	0,52	0,58	0,76	0,95	0,98

Fonte: (PARKER, 2006)

Assim, avaliamos as características do sistema:

- Comprimento linear: 38,65 m;
- Número de cotovelos 90°: 1;
- Número de curva 90°: 6;
- Número de fluxo divididos: 3.

O comprimento linear foi medido com uma trena por toda a extensão da tubulação. Como os tubos devem se encaixar nas singularidades, o seu diâmetro externo deve ser igual ao diâmetro interno das mesmas. Então, somando o comprimento linear e os comprimentos equivalentes, utilizando os dados para 1" (valor mais próximo ao da tubulação utilizada) temos:

$$L_t = 38,65 + (1 \times 1,58) + (6 \times 0,83) + (3 \times 1,50) = 48,21m \quad (5.1)$$

Se utilizarmos a equação (3.2) para calcular o diâmetro a partir deste comprimento efetivo obtido teríamos:

$$d = 10 \times \sqrt[5]{\frac{(1,663758 \times 10^{-3} \times (12)^{1,85} \times 48,21)}{0,3 \times 6,12}} = 13,41mm \quad (5.2)$$

Isso comprova que houve um superdimensionamento do diâmetro, uma vez que obteríamos um resultado satisfatório utilizado uma tubulação com aproximadamente a metade do diâmetro interno. Em contrapartida, isso permite que o sistema seja muito mais confiável e tenha menos perdas ao longo da tubulação.

Devido a uma falha na furação das paredes dos laboratórios, a inclinação obtida foi de 2% no sentido oposto ao fluxo, o que não é ideal. Porém, como não foi possível implementar um purgador no final da linha para coletar o condensado, essa função foi atribuída ao purgador do reservatório do compressor, no começo da linha. Além disso, devido à falta de material, as tomadas de ar foram feitas verticalmente para baixo, excetuando-se à do Laboratório de Automação Industrial e Inteligência Computacional, que teve a sua tubulação atravessando o teto do laboratório horizontalmente antes de descer para a unidade de condicionamento. Isso pode ocasionar numa maior quantidade de condensado e impurezas sendo encaminhadas às unidades de condicionamento de ar comprimido, possivelmente reduzindo a vida útil das máquinas consumidoras. Isso não deve se tornar um problema ao imaginar uma baixa frequência de uso do ar comprimido, mas caso a sua utilização seja aumentada drasticamente, pode se considerar um plano de manutenção com atenção na análise do condensado.

Quanto ao teste de estanqueidade, após três dias de observação, não foram detectadas variações expressivas na pressão da rede, o que nos leva a entender que não houveram vazamentos de ar. Este teste deve ser repetido periodicamente conforme o uso cotidiano do sistema para garantir o seu pleno funcionamento.

Através do experimento de medições de perda de carga, foram registrados os dados de pressão dos dois pontos da linha mencionados a cada 5 l/min até 200 l/min, valor máximo do medidor de vazão. Antes de abrir o fluxo de ar, a pressão na rede foi aferida, os valores encontrados foram:

- $P_1 = 8,98bar$
- $P_2 = 9,00bar$

Como houve diferença de pressão negativa, foram invertidas as posições dos sensores para garantir que o erro era dos medidores. Assim, obteve-se:

- $P_1 = 9,00bar$
- $P_2 = 8,98bar$

Pode-se concluir que os sensores mediram a mesma pressão em ambos os pontos, mas há uma leve diferença entre as medições apresentadas. Isto pode ser considerado um

erro de 0,02 bar. Por se tratar de um erro pequeno, o experimento não ficou comprometido, porém foi feita uma correção dos erros nos cálculos para que o experimento fosse fidedigno. Depois foi feita uma despressurização da rede até aproximadamente 7 bar para que os valores de pressão na tubulação fossem próximos aos da pressão de serviço atual.

Após esses ajustes a vazão foi aberta e verificou-se o comportamento da queda de pressão entre os pontos através de um gráfico representando a vazão selecionada versus a diferença de pressão encontrada, permitindo que fosse traçada uma curva de tendência para entender como a pressão decai com o aumento da vazão. Os dados obtidos foram os seguintes:

Tabela 6 – Dados do experimento para aferir queda de pressão na rede

Vazão [l/min]	$P_a$ [bar]	$P_b$ [bar]	$P_f$ [bar]	$\Delta P1$ [bar]	$\Delta P2$ [bar]
5	6,99	6,98	6,99	0,01	0,00
10	6,96	6,95	6,95	0,01	0,01
15	6,94	6,93	6,93	0,01	0,01
20	6,92	6,91	6,90	0,01	0,02
25	6,89	6,88	6,86	0,01	0,03
30	6,85	6,85	6,80	0,00	0,05
35	6,82	6,80	6,75	0,02	0,07
40	6,78	6,77	6,68	0,01	0,10
45	6,74	6,72	6,60	0,02	0,14
50	6,67	6,65	6,50	0,02	0,17
60	7,10	7,08	6,94	0,02	0,16
70	7,00	6,97	6,75	0,03	0,25
80	6,90	6,88	6,54	0,02	0,36
90	6,78	6,75	6,34	0,03	0,44
100	6,68	6,65	6,16	0,03	0,52
110	7,18	7,12	6,43	0,06	0,75
120	6,97	6,93	6,15	0,04	0,82
130	6,83	6,79	5,83	0,04	1,00
140	7,05	7,00	5,80	0,05	1,25
150	6,80	6,75	5,38	0,05	1,42
160	7,75	7,68	6,05	0,07	1,70
170	7,47	7,41	5,75	0,06	1,72
180	7,22	7,16	5,41	0,06	1,81
190	7,78	7,73	5,60	0,05	2,18
200	7,43	7,38	4,98	0,05	2,45

Sendo que:

- $P_a$ : Pressão no início da tubulação;
- $P_b$ : Pressão no meio da tubulação;
- $P_f$ : Pressão no fim da tubulação;
- $\Delta P1$ : Perda de carga entre  $P_a$  e  $P_b$ ;
- $\Delta P2$ : Perda de carga entre  $P_a$  e  $P_f$ ;

Figura 14 – Gráfico de vazão [l/min] por perda de carga [bar] entre o início e o meio da tubulação ( $\Delta P1$ )

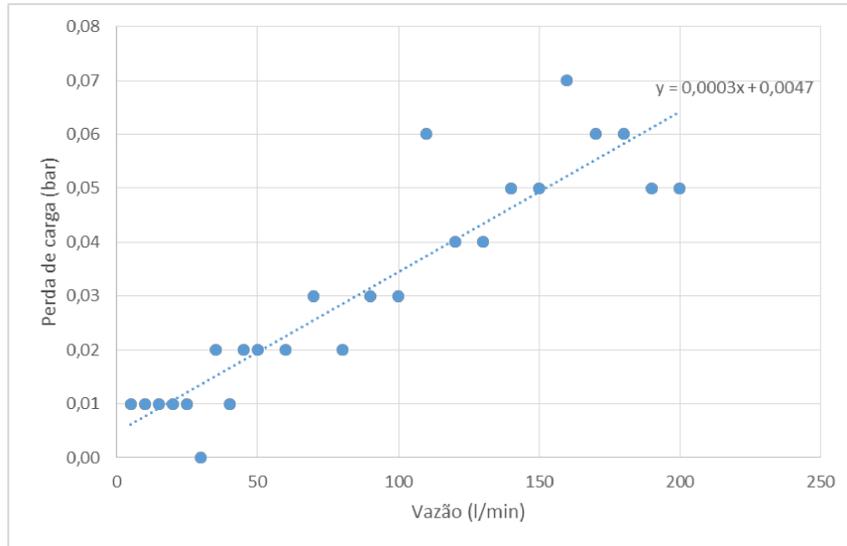
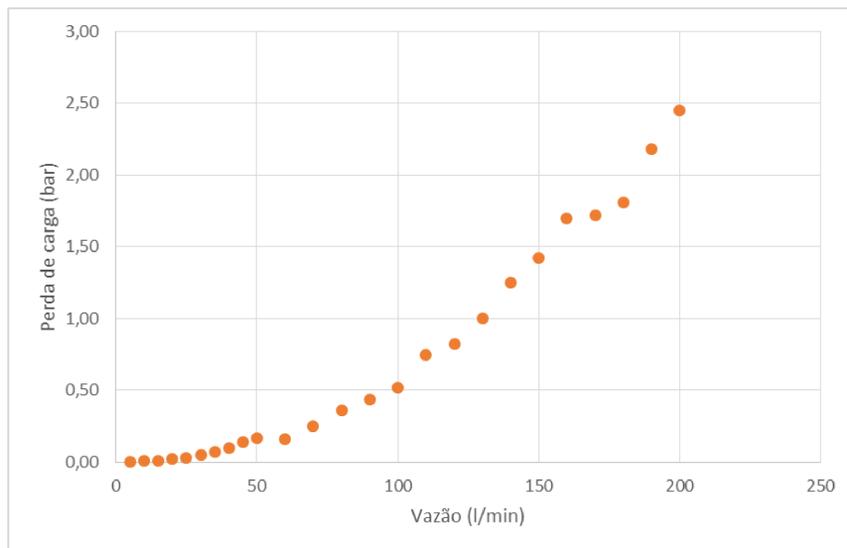


Figura 15 – Gráfico de vazão [l/min] por perda de carga [bar] entre o início e o fim da tubulação ( $\Delta P2$ )



Pegando o caso de maior perda de carga, para  $\Delta P1$ , nota-se que ela representa 0,9% da pressão de trabalho, valor bem abaixo dos 5% máximo citado por (PRUDENTE, 2000)

Através do gráfico da figura 14, obtivemos a equação, gerada automaticamente pelo software Microsoft Excel©:

$$\Delta P = 0,0003 \times Q + 0,0047 \quad (5.3)$$

Através dessa equação podemos estimar valores para uma possível ampliação do sistema de ar comprimido ainda muito além dos 200 l/min pensados para este trabalho.

Esse valor de perda de carga condiz com o esperado, pois o comprimento da tubulação é muito menor do que o máximo calculado pela equação (4.2).

Ao analisar a queda de pressão  $\Delta P_2$ , a partir do gráfico da figura 15, observou-se um comportamento diferente de  $\Delta P_1$ , como esperado. Para explicar a diferença entre os gráficos, ressaltamos que o principal fator é o estreitamento do diâmetro da tubulação em  $P_f$ , o que aumenta a velocidade de escoamento do ar e reduz a pressão no ponto (SENAI, 2008). Este fenômeno é conhecido como efeito Venturi. Estes dados podem ser comprovados ao analisar os gráficos gerados por (IBARS, 2004, p.43). Estes dados não devem ser confundidos com a perda de carga na tubulação e servem como análise extra do comportamento dos fluidos em movimento. Portanto, com esses dados, fez-se esse estudo à parte do projeto.

É válido notar que as pressões testadas são próximas às pressões de trabalho que constam na tabela 1. Assim, o pressostato do compressor foi configurado para atuar quando a pressão estiver abaixo de 8 bar. Isso faz com que esses valores só sejam alcançáveis caso o compressor esteja desligado e impossibilitado de ser acionado pela *soft starter* ou pelo botão de segurança.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho conseguiu cumprir o seu objetivo de implementar o recurso pneumático para todos os laboratórios do primeiro andar da engenharia mecânica da UFJF. Através do equacionamento obtido pela literatura de referência e dos experimentos realizados, pode-se assegurar que o sistema funcionará adequadamente e terá capacidade para ampliação ainda maior do que a projetada.

O mais importante deste projeto é que todos os laboratórios poderão utilizar o ar comprimido simultaneamente sem riscos de perderem potência por baixa de carga na rede.

O maior desafio foi adaptar todos os equipamentos já existentes na instituição para operar dentro da faixa aceitável, da maneira mais eficiente possível, sem comprometer a qualidade do ar comprimido. Caso esses ajustes não fossem possíveis, o projeto não sairia do papel até que novos componentes fossem adquiridos, atrasando o desenvolvimento da infraestrutura dos laboratórios e, por consequência, do curso de engenharia mecânica.

O trabalho do engenheiro se dá ao constatar a necessidade da instalação adequada e que seja o mais eficiente possível para a realidade do projeto. Assim o ganho de experiência ao participar deste se mostra de grande valia na formação acadêmica e uma excelente oportunidade de contribuir com o desenvolvimento tecnológico da universidade.

Todos os procedimentos práticos realizados foram supervisionados e auxiliados por responsáveis técnicos e dentro das normas de segurança dos laboratórios.

### 6.1 Sugestões de pesquisas futuras

#### 6.1.1 Avaliação do efeito do condensado

Análise da quantidade de condensado na tubulação pneumática devido a essas imperfeições no projeto e o quanto essa quantia pode atingir as máquinas consumidoras de ar comprimido. Essa pesquisa se justifica quando se trata do patrimônio da faculdade de engenharia visando a melhoria contínua dos laboratórios do curso.

#### 6.1.2 Plano de manutenção do sistema pneumático

Devido à necessidade de manutenção dos componentes do sistema pneumático, é necessário realizar um estudo de desgaste ao longo do tempo dos equipamentos e tubulação para que eles se mantenham disponíveis em boa qualidade para utilização.

## REFERÊNCIAS

- [1] ABNT. *Emprego de cores para identificação de tubulações industriais*.
- [2] BALMER, M. *Manual de operação – MaxiCUT 40*.
- [3] ELLIOTT, B. *Compressed air operations manual*. McGraw-Hill Professional, 2006.
- [4] FIALHO, A. B. *Automação pneumática–Projetos, dimensionamento e análise de circuitos*. Editora Saraiva, 2003.
- [5] PAVANI, A. P. *Comandos pneumáticos e hidráulicos*. Colégio Técnico industrial de Santa Maria, 2010.
- [6] PRUDENTE, F. *Automação Industrial Pneumática: Teoria e Aplicações*. Grupo Gen-LTC, 2000.
- [7] ROLLINS. J. P. *Manual da ar comprimido e gases*. Pearson Educación, 2004.
- [8] SCHULZ. *Catálogo técnico. Compressor – MSW 60 MAX/425 – MSW 60 MAX/AD – WW 60 G/425*.
- [9] PARKER, T. *Dimensionamento de redes de ar comprimido*, 2006.
- [10] IBARS, R. A. F. *Desenvolvimento e avaliação de tubos Venturi para medição de vazão*, 2004
- [11] SENAI *Apostila de instrumentação Básica II do Programa de Certificação do Pessoal de Manutenção*, Espírito Santo, 2008
- [12] WATSON, M.; MURCH, M. *Recent developments in hot plate welding of thermoplastics*. Polymer Engineering & Science, 1989.
- [13] WEG. *Manual do usuário da soft starter*.
- [14] YOUXIN, Y. et al. A soft starter of three phase asynchronous motor. In *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pages 563–567. IEEE, 2007.

**ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE****UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA****Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria**

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral<sup>1</sup> e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 24 de Outubro de 2019.

Assinatura manuscrita em azul de Ciro Guedes Fellet.

---

Ciro Guedes Fellet – Discente  
Matrícula: 201071064 – CPF: 105.513.206-27

<sup>1</sup> LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

<sup>2</sup> Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.