

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**HENRIQUE ARTUZO SGANZERLA**

**ANÁLISE E REDIMENSIONAMENTO DE UMA REDE INDUSTRIAL DE DISTRIBUIÇÃO DE AR  
COMPRIMIDO – ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE FUNDIÇÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2018**

HENRIQUE ARTUZO SGANZERLA

**ANÁLISE E REDIMENSIONAMENTO DE UMA REDE INDUSTRIAL DE  
DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO – ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA  
DE FUNDIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Ostapiv

Coorientador: Prof. Janerson Forner Flores

PATO BRANCO

2018

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### ANÁLISE E REDIMENSIONAMENTO DE UMA REDE INDUSTRIAL DE DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO – ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE FUNDIÇÃO

Henrique Artuzo Sganzerla

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 20/06/2018 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Adelino Carlos Maccarini  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Junior  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Fabiano Ostapiv  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)  
Orientador

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

## DEDICATÓRIA

Após um árduo caminho percorrido ao longo de minha graduação, dedico este trabalho aos meus pais Valdemar Sganzerla e Rosane Artuzo Sganzerla, que não mediram esforços em momento algum para que este sonho pudesse se tornar realidade.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais e minha irmã por todos os esforços realizados por eles permitindo que pudesse conquistar meus objetivos, além do incentivo e apoio que me deram ao longo de minha graduação. A minha namorada por muitos momentos de dificuldade em que esteve ao meu lado me apoiando e confortando diante dos desafios enfrentados. A todos os amigos que fiz durante minha passagem pela universidade e que, de alguma forma, contribuíram para que pudesse chegar onde cheguei. Aos professores Fabiano Ostapiv e Janerson Forner Flores pela orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho. A todos os demais docentes, que contribuíram não apenas para minha formação acadêmica, mas também para a minha formação pessoal, com exemplos e ensinamentos que levarei para a vida toda e por fim, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Pato Branco que me acolheu e permitiu a realização deste sonho.

## EPÍGRAFE

*“Procure ser uma pessoa de valor, em vez de procurar ser uma pessoa de sucesso. O sucesso é consequência.”*

*(Albert Einstein)*

## RESUMO

SGANZERLA, Henrique Artuzo. Análise e redimensionamento de uma rede industrial de distribuição de ar comprimido – Estudo de caso em uma empresa de fundição. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

O ar comprimido é considerado uma excelente forma de energia mecânica, o que tem resultado em uma ampla utilização na indústria, proporcionando o funcionamento de diversos equipamentos e processos industriais de forma segura, eficiente e com baixo custo. No entanto, uma rede pneumática quando mal dimensionada, pode elevar o consumo de energia e conseqüentemente os custos de operação da empresa, além de provocar falhas em momentos de elevada demanda de ar comprimido. Estes problemas ocorrem na instalação industrial analisada neste estudo de caso. Dessa forma, o objetivo principal do trabalho é o dimensionamento de uma nova rede pneumática para uma empresa de fundição. Buscando atingir o objetivo, utilizou-se uma metodologia de cálculo descrita por Fialho (2011) para o dimensionamento do diâmetro interno mínimo da tubulação. O presente estudo iniciou-se com a realização da coleta de dados de demanda de ar comprimido e informações a respeito de problemas existentes na rede instalada. A análise dos dados permitiu a realização de um planejamento para o dimensionamento da rede e solução dos principais problemas nela apresentados. O resultado foi um projeto detalhado com o layout da rede de tubulações e uma lista de materiais, que possibilitam que a empresa realize a correta instalação das tubulações e seus respectivos acessórios, garantindo o pleno funcionamento de todos os equipamentos utilizados na planta industrial por meio de um sistema mais eficiente de distribuição de ar comprimido.

**Palavras-chave:** Ar comprimido. Tubulação. Dimensionamento. *Layout* da rede.

## ABSTRACT

SGANZERLA, Henrique Artuzo. Analysis and resizing in an industrial system of a distribution of compressed air - Case study in a foundry company. Completion Coursework – Mechanical Engineering Course. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Compressed air is considered one of the major forms of mechanical energy, which has resulted in widespread use in industry, providing the operation of several equipments and the realization of industrial processes in a safe, efficient and low cost way. However, a pneumatic air system, when wrongly sized, can increase the company's energy consumption and consequently operating costs, as well as causing operating failures at times of high compressed air demand. These problems occurred in the industrial plant analyzed in this case study. Therefore, the main objective of the work is the sizing of a pneumatic air system for a foundry company. Seeking to achieve the objective, it was use a methodology of calculation described by Fialho (2011) for dimensioning the minimum internal pipe size. The present study started with a data collection of compressed air demand, and information about existing problems in the installed system. The analysis of the data allowed the realization of a planning for the sizing of the network and solution of the main problems presented in it. The result was a detailed project in which a layout of the piping system and a list of materials would enable the company to properly install the piping and its accessories, guaranteeing the full operation of all the equipment used in the industrial plant through an efficient system of distribution of compressed air.

**Keywords:** Compressed air. Piping. Sizing. System Layout.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Propriedades físicas do ar. ....	19
Figura 2 - Rede em formato fechado.....	20
Figura 3 - Rede em formato aberto. ....	21
Figura 4 - Inclinação da tubulação. ....	22
Figura 5 - Efeitos da rugosidade da tubulação. ....	27
Figura 6 - Classificação de compressores.....	30
Figura 7 - Fluxograma geral do projeto. ....	33
Figura 8 - Fluxograma de levantamento de dados. ....	35
Figura 9 - Fluxograma de dimensionamento da tubulação. ....	37
Figura 10 - Posição da sala de compressores em relação à indústria. ....	42
Figura 11 - Sala dos compressores.....	43
Figura 12 - Local de instalação de compressor e pontos de consumo.....	44
Figura 13 - Tubulação sobre os fornos.....	45
Figura 14 - Tubulação construída em PPR seção 1.....	46
Figura 15 - Tubulação em PPR seção 2. ....	47
Figura 16 - Tubulação em PPR. ....	47
Figura 17 - Diâmetros internos e externos de tubos em PPR de acordo com a fabricante Topfúision [201-?]......	48
Figura 18 - Sala de compressores e concentração de equipamentos.....	55
Figura 19 - Modelo em CAD Tubulação Principal. ....	56
Figura 20 - Modelo em CAD Tubulação Secundária. ....	57
Figura 21 - Modelo em CAD da parte superior das tubulações de alimentação.....	58
Figura 22 - Modelo em CAD da parte inferior das tubulações de alimentação. ....	59
Figura 23 - Modelo em CAD da tubulação completa, número de referência dos equipamentos.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de demanda da rede pneumática da fundição. ....	40
Tabela 2 - Diâmetro interno mínimo calculado e comercial escolhido para a tubulação do anel principal.....	50
Tabela 3 - Diâmetro interno mínimo calculado e comercial escolhido para tubulação secundária.....	52
Tabela 4 - Diâmetro interno mínimo calculado e comercial escolhido para tubulações de alimentação.....	53
Tabela 5 - Lista parcial de componentes, fabricante Topfusión [201-?]. ....	63

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS .....	16
1.1.1 Objetivo geral .....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 HISTÓRICO .....	17
2.2 AR COMPRIMIDO.....	18
2.2.1 Condensação de vapor .....	19
2.3 REDES DE DISTRIBUIÇÃO.....	20
2.4 VANTAGENS E LIMITAÇÕES EM REDES PNEUMÁTICAS.....	22
2.5 DIMENSIONAMENTO.....	23
2.5.1 Tubulação.....	23
2.5.1.1 Diâmetro interno mínimo da tubulação.....	23
2.5.1.2 Materiais empregados em tubulações.....	25
2.5.1.3 PPR - Polipropileno Copolimero Random .....	26
2.5.2 Acessórios.....	27
2.5.2.1 Filtros.....	27
2.5.2.2 Secador .....	28
2.5.2.3 Válvulas e reguladores de pressão .....	28
2.5.2.4 Purgadores.....	29
2.5.3 Compressor.....	29
2.5.4 Reservatório .....	31
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>33</b>
3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS .....	33
3.2 DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO.....	35
3.3 AVALIAÇÃO DOS COMPRESSORES.....	37

3.4 AVALIAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS.....	38
3.5 DESENHO ESQUEMÁTICO DA TUBULAÇÃO .....	38
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>39</b>
4.1 COLETA DE DADOS .....	39
4.1.1 Demanda de ar comprimido na unidade.....	39
4.1.2 Pressão de trabalho da rede .....	40
4.1.3 <i>Layout</i> da indústria e posicionamento dos equipamentos.....	41
4.1.3.1 Comprimento total da tubulação principal instalada .....	41
4.2 PROBLEMAS ENCONTRADOS E REQUISITOS DO PROJETO.....	42
4.2.1 Localização de alguns compressores .....	42
4.2.2 Tubulação sobre os fornos .....	44
4.2.3 Vazamentos .....	45
4.2.4 Dimensionamento incorreto.....	45
4.3 TUBULAÇÃO CONSTRUÍDA EM PPR .....	46
4.4 DIMENSIONAMENTO DO DIÂMETRO MÍNIMO DA TUBULAÇÃO .....	48
4.4.1 Verificação do dimensionamento da tubulação instalada.....	48
4.4.2 Dimensionamento proposto.....	49
4.4.2.1 Tubulação do anel principal.....	50
4.4.2.2 Tubulação secundária .....	51
4.4.2.3 Tubulação de alimentação .....	52
4.5 <i>LAYOUT</i> DA REDE PNEUMÁTICA APÓS O REDIMENSIONAMENTO.....	53
4.5.1 Anel principal.....	56
4.5.2 Tubulações secundárias.....	56
4.5.3 Tubulação de alimentação .....	57
4.5.4 <i>Layout</i> completo .....	59
4.6 AVALIAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS.....	60
4.7 AVALIAÇÃO DOS COMPRESSORES.....	61

4.9 SECADORES.....	62
4.8 LISTA DE COMPONENTES .....	62
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO A – Comprimento de tubos equivalente a perda de carga por singularidades .....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO B – <i>Layout</i> da indústria fornecido com traçado da tubulação original.....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO C – Definição inicial do <i>Layout</i> planejado para tubulação principal e secundárias. ....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE A – Entrevista realizada com o Engenheiro responsável pela empresa respondida por e-mail .....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE B – Memorial de cálculos .....</b>	<b>75</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Registros revelam que a utilização de ar comprimido em processos industriais começou a crescer na metade século XIX, porém muitos registros revelam indícios de aplicações há cerca de 2000 anos, com equipamentos rudimentares fornecendo trabalho através de um êmbolo construído em madeira (PARKER, 2006).

O ar comprimido é o ar atmosférico, composto de diversos gases como nitrogênio, oxigênio e outros, que após passar por equipamentos que o comprimem elevando sua pressão, é transformado em uma forma de energia que pode ser utilizada como fonte de trabalho para diversos fins, principalmente em processos industriais devido algumas vantagens oferecidas por esta forma de energia, como versatilidade, segurança, baixos custos de operação entre outras (METALPLAN, 2010).

A utilização de sistemas alimentados por ar comprimido em plantas industriais permite a realização de diversas tarefas, tais como acionamentos, transporte, limpeza e alimentação de diversos outros equipamentos podendo ser eles ferramentas básicas como parafusadeiras e lixadeiras, ou até equipamentos de maior complexidade como robôs e sistemas automatizados que realizam diversas tarefas em uma linha de montagem.

Após instaladas, as redes pneumáticas podem apresentar problemas como vazamentos ou falta de pressão e vazão necessárias em determinados pontos da rede, situações que são explicadas por diversos fatores, como um dimensionamento incorreto da rede que resulta em elevadas perdas de carga ao longo das tubulações e seus acessórios, falta de manutenção durante da vida útil, tanto da rede quanto de equipamentos por ela alimentados, ampliações não previstas no dimensionamento inicial, entre outros fatores, o que acaba revelando o uso inadequado do sistema pneumático.

De acordo com informações fornecidas pelo engenheiro mecânico responsável pela empresa do ramo de fundição, localizada no estado do Paraná, relatou-se alguns problemas relacionados à demanda de ar comprimido dos equipamentos instalados na planta industrial, determinados equipamentos têm seu funcionamento interrompido por falta de vazão à pressão constante na rede de ar comprimido instalada. Foram mencionadas futuras instalações previstas para a planta

industrial, exigindo um redimensionamento da rede pneumática para que seja capaz de manter o funcionamento pleno dos equipamentos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Solucionar eventuais problemas através do redimensionamento da rede pneumática da empresa, para que atenda à demanda atual e futuras ampliações na planta industrial, fornecendo elevada vida útil ao projeto e priorizando o aproveitamento do sistema em operação atual, tanto para as tubulações quanto para os compressores.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Mensurar a demanda de ar comprimido instalada na planta industrial;
- Avaliar ampliações previstas para a planta, mensurando a vazão e pressão de consumo necessárias;
- Dimensionar a tubulação do(s) anel(éis) principal(is);
- Dimensionar as tubulações secundárias;
- Comparar o dimensionamento instalado com o redimensionamento e estudar a hipótese de aproveitamento de parte da planta pneumática atual na nova instalação;
- Avaliar a capacidade de compressores instalados;
- Avaliar a capacidade dos reservatórios instalados;
- Gerar um *layout* para a rede de tubulação a ser instalada.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 HISTÓRICO

A utilização do ar comprimido revela-se uma importante fonte de trabalho em sistemas produtivos por exemplo, segundo estudos realizados por Parker (2006), na metade do século XIX, plantas industriais passam a utilizar ar comprimido em suas instalações, entretanto registros revelam emprego de ar comprimido em processos de fundição de prata, ferro, chumbo e estanho ainda no velho testamento, revelando que há mais de 2000 anos, técnicos construía máquinas rudimentares que forneciam trabalho através de energia pneumática por meio de um pistão e êmbolo construídos em madeira.

O termo pneumática, é derivado do grego *Pneumos* ou *Pneuma*, que significa respiração ou sopro e é a parte da física que estuda a dinâmica e os fenômenos relacionados aos gases ou vácuos de acordo com Parker (2006), seguindo um raciocínio semelhante, Fialho (2011) afirma que a pneumática é o estudo dos movimentos e fenômenos relacionados aos gases.

Além da energia pneumática, povos antigos aproveitavam-se da força gerada pela dilatação durante o aquecimento do ar e da força produzida pelo vento. Alguns registros revelam que as primeiras máquinas foram construídas no século III a.C em Alexandria, no mesmo período em que foi fundada por Cetesbios, a Escola de Mecânicos, também em Alexandria, a qual foi a precursora na utilização de técnicas para comprimir o ar e construção de máquinas movidas por ar comprimido (PARKER, 2006).

De acordo com estudos realizados pela Eletrobrás (2005), o primeiro compressor a pistão surgiu em 1776 e era utilizado em uma fábrica na Inglaterra, construído com válvulas de madeira e vedações em couro, o equipamento era capaz de atingir a pressão de um bar. Atualmente os compressores e sistemas de ar comprimido são utilizados para diversos fins, entre eles ferramentas pneumáticas, transporte de materiais, acionamentos, controle de equipamentos, entre outros. O Ar comprimido é considerada a segunda forma de energia mais utilizada na indústria, a primeira é a energia elétrica.

## 2.2 AR COMPRIMIDO

O ar consiste em uma mistura de gases composta por aproximadamente 20,5% de oxigênio, 79% de nitrogênio e alguns outros gases. Essa mistura pode ser uma importante e até mesmo insubstituível fonte de energia, de acordo com a aplicação que está sujeita. Os gases são comprimidos armazenando energia que posteriormente pode ser utilizada em diversos processos (METALPLAN, 2010).

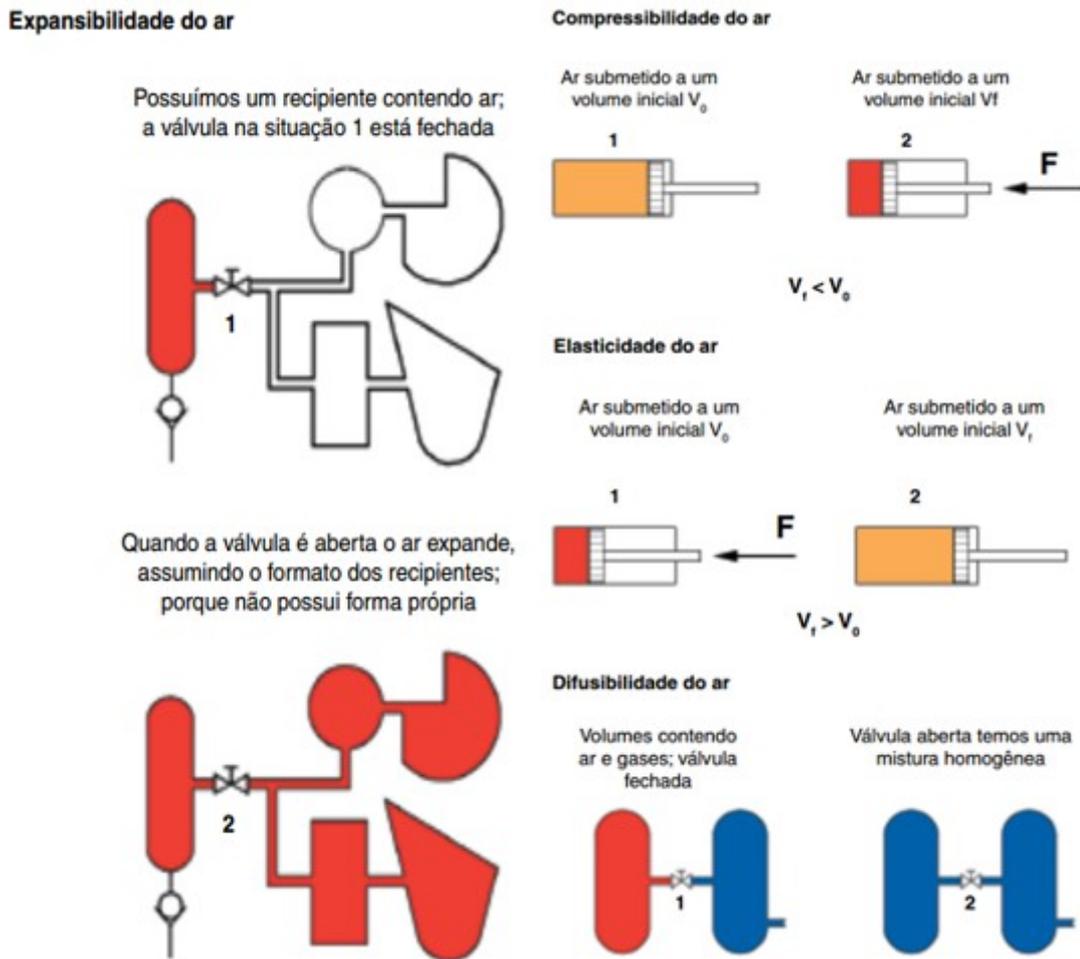
O ar comprimido tem seu estado natural ou de equilíbrio, enquanto permanece na atmosfera, nessa condição não tem a capacidade de realizar trabalho, porém a partir do momento que o ar estiver com uma pressão superior a atmosférica ele tem a possibilidade de gerar algum tipo de trabalho em sistemas pneumáticos, porém, uma outra forma de aproveitamento do ar presente na atmosfera, é a energia elétrica gerada em usinas eólicas, que funcionam a partir da velocidade dos ventos (ELETROBRÁS, 2005).

Industrialmente utiliza-se o ar comprimido, que nada mais é do que uma forma de obtenção de energia a partir da compressão do ar atmosférico, elevando significativamente sua pressão, que conseqüentemente permite a realização de trabalho através da expansão do mesmo (ELETROBRÁS, 2005).

A utilização do ar comprimido só é possível devido a algumas propriedades físicas do ar, entre elas Parker (2006) ressalta algumas como a compressibilidade, elasticidade, difusibilidade e expansibilidade do ar, explicadas nos tópicos e retratadas na Figura 1.

- **Compressibilidade:** Propriedade que permite que o ar tenha uma elevação de pressão, ou seja, o ar assume todo o formato de um determinado recipiente que pode ser comprimido provocando uma redução no volume com a ação de uma força exterior;
- **Elasticidade:** Após comprimido, essa propriedade permite que o ar retome seu volume anterior quando não está sujeito a uma força externa que o comprime. A expansão permite que o ar comprimido realize trabalho;
- **Difusibilidade:** Permite que o ar se misture de forma homogênea com outro meio gasoso desde que não saturado;
- **Expansibilidade:** Permite que o ar adquira e ocupe totalmente o volume de qualquer recipiente.

Figura 1 - Propriedades físicas do ar.



Fonte: Adaptado de Parker Training, 2006.

### 2.2.1 Condensação de vapor

Ao ser aspirado pelo compressor, o ar acaba trazendo vapor de água para sistema de ar comprimido, que de acordo com a pressão e temperatura pode acabar condensando no interior da tubulação. A água condensada pode ser eliminada da tubulação através de filtros separadores de água ou drenos instalados ao longo da linha. Em casos extremos é necessário a instalação de um secador de ar no sistema (SILVA, 2002).

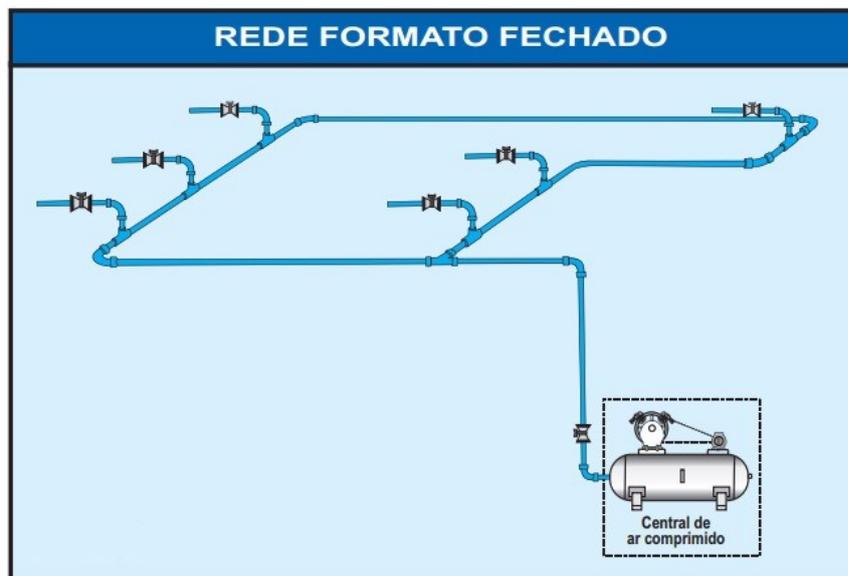
Para explicar o fenômeno da condensação provocada pela temperatura e pressão na tubulação, Silva (2002) utiliza como exemplo uma esponja, quando saturada não pode absorver mais água, o mesmo ocorre com o ar, que saturado não poderá mais absorver vapor d'água, a esponja ao ser comprimida expulsa a água absorvida em seus poros, fato equivalente a aumentar a pressão do ar ocorrendo a

condensação, ao ser resfriada, a esponja tem seus poros reduzidos expulsando a água, o que ocorre ao aumentar a temperatura do ar provocando a condensação do vapor presente na tubulação.

### 2.3 REDES DE DISTRIBUIÇÃO

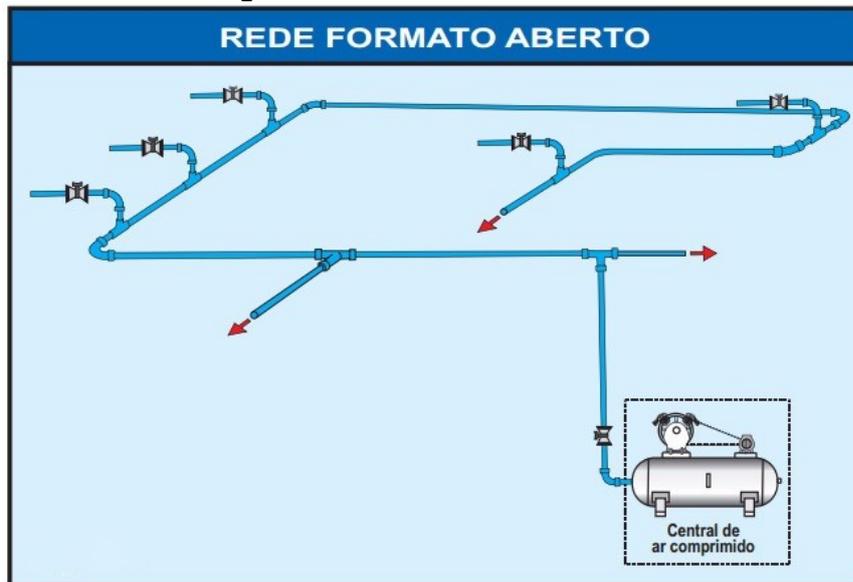
As redes de distribuição são dispostas basicamente em dois formatos. Podendo ser um circuito fechado, que consiste na construção de um anel principal que distribui o ar para os equipamentos, modelo que tende a manter a pressão constante mesmo que o consumo aumente em algum ponto da rede, ou então um em formato aberto, indicado quando a distância do compressor até ponto de consumo é muito grande, como mostram as Figuras 2 e 3 (Topfusión, [201-?]).

Figura 2 - Rede em formato fechado.



Fonte: Adaptado de Topfusión, [201-?].

Figura 3 - Rede em formato aberto.

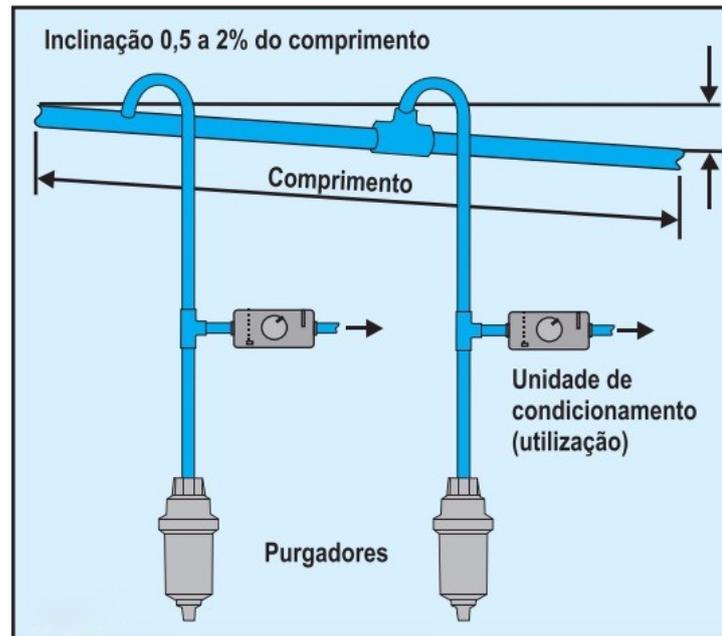


Fonte: Adaptado de Topfusión, [201-?].

Segundo Topfusión ([201-?]), a rede deve possuir uma inclinação de 0,5 a 2% em função de seu comprimento, pois mesmo que raramente, pode ocorrer a formação de condensados no interior da tubulação caso a temperatura da rede sofra uma queda. A inclinação, associada a instalação de drenos (purgadores) nos pontos mais baixos permite a remoção de eventual condensação e impurezas, como óxidos, presentes na tubulação. É indicada a instalação de drenos ou purgadores ao longo da tubulação principal a cada 20 ou 30 metros, em redes abertas ou com elevada extensão, permitindo que o condensado formado na rede seja removido.

Na Figura 4 é mostrada a inclinação da tubulação e a forma construtiva da tubulação de alimentação com o purgador posicionado na parte inferior da instalação, o modelo evita que condensados sejam direcionados para o equipamento a ser alimentado.

**Figura 4 - Inclinação da tubulação.**



Fonte: Adaptado de Topfusión, [201-?].

## 2.4 VANTAGENS E LIMITAÇÕES EM REDES PNEUMÁTICAS

Semelhante a qualquer sistema industrial, a utilização de ar comprimido como fonte de energia apresenta diversas vantagens e limitações em suas aplicações, entre elas observam-se algumas (PARKER, 2006; FIALHO, 2011):

a) Vantagens:

- Baixo custo operacional;
- Robustez e fácil manutenção dos componentes pneumáticos;
- Resistência a ambientes hostis;
- Segurança operacional, em caso de vazamentos não oferece riscos;
- Quantidade infinita disponível na atmosfera para ser comprimida;
- Transporte simples por tubulações que não exigem linhas de retorno, como em sistemas hidráulicos;
- Armazenagem em um reservatório que permite paradas no compressor mantendo a rede pressurizada;
- Temperatura não interfere viscosidade do ar, permitindo operação em condições extremas;

- Construção simples, pois, devido as baixas pressões os componentes podem ser fabricados com matérias de baixa robustez, reduzindo custos;
- Altas velocidades de deslocamento do fluido.

b) Limitações:

- Pressão de trabalho do sistema limitada e relativamente baixa (1723,6 kPa);
- Preparação do ar, para melhor conservação do sistema e qualidade do ar é necessária uma preparação com etapas como filtragem, secagem e sistemas de purga para remover condensados ao longo da rede;
- Compressibilidade do ar impede velocidades constantes e uniformes de operação, tornando imprecisas as operações;
- Força limitada devido a limitação de pressão;

## 2.5 DIMENSIONAMENTO

Segundo Karmouche (2009), um sistema pneumático é composto de uma rede de tubulações que faz a distribuição do ar comprimido até o ponto final de consumo, além de uma unidade geradora e de tratamento, ou seja, o compressor e equipamentos que realizam a secagem e filtragem do ar. Sistemas de ar comprimido corretamente dimensionados proporcionam eficiência e confiabilidade nas aplicações necessárias além de reduzirem o consumo de energia.

### 2.5.1 Tubulação

#### 2.5.1.1 Diâmetro interno mínimo da tubulação

A tubulação de distribuição de ar comprimido é um sistema composto por tubos retilíneos e singularidades como curvas, tês, registros, válvulas reguladoras e outros componentes, que permitem que o ar seja distribuído ao longo de toda indústria.

De acordo com Fialho (2011), para o dimensionamento do diâmetro mínimo interno da tubulação principal, deve-se levar em conta a pressão e vazão necessárias nos diversos pontos de alimentação espalhados pela planta, futuras ampliações e uma queda de pressão máxima, admitida de acordo com o projeto da rede. As seguintes variáveis devem ser obtidas para o correto dimensionamento da tubulação, sendo elas: vazão total, comprimento total da linha principal, queda de pressão admissível e pressão de regime.

A vazão total é o volume de ar comprimido consumido pela rede, ou seja, a soma das vazões parciais de cada equipamento considerado na rede ou em futuras aplicações, e é dada pela Equação 1:

$$Q = \sum Q_P \text{ [m}^3\text{/h]} \quad (1)$$

O comprimento característico total da tubulação, definido por Fialho (2011), calculado pela Equação 2, é caracterizado pela soma do comprimento retilíneo da tubulação  $L_R$  e o comprimento característico dos acessórios  $L_S$ , de acordo com as tabelas presentes no Anexo A, que mostram a perda de carga provocada pelas singularidades, transformadas em um comprimento linear que tem uma perda equivalente permitindo o uso no dimensionamento da tubulação. O comprimento característico dos acessórios só pode ser determinado após o cálculo preliminar do diâmetro mínimo da tubulação, que utiliza apenas o comprimento retilíneo da mesma e é verificado em uma segunda etapa, utilizando o comprimento característico total.

$$L_T = L_R + L_S \text{ [m]} \quad (2)$$

A queda de pressão admissível ( $\Delta P$  [kgf/cm<sup>2</sup>]) da rede, é a variável que leva em conta a perda de pressão máxima que pode ocorrer na tubulação, assumindo o valor de 0,3 bar para tubulações com até 500m e 0,5 bar para linhas com mais de 500m de distância entre o reservatório e o ponto final de consumo (FIALHO, 2011).

De forma menos conservadora, Karmouche (2009), avalia a perda de carga de acordo com o tipo e o comprimento da tubulação, onde por exemplo, para tubulações principais considera-se uma queda de 0,02 bar para cada 100 m de tubulação, em tubulações secundárias a queda é de 0,08 bar para 100 m de tubulação

além de valores distintos para elemento filtrantes, secadores e mangueiras. A queda de pressão total da rede é determinada em função da instalação.

Outra variável que deve ser analisada é a pressão de regime da rede ( $P$  [kgf/cm<sup>2</sup>]), que é determinada de acordo com o equipamento que necessita da maior pressão de trabalho entre os instalados na rede, para os demais a pressão pode ser reduzida com a utilização de válvulas reguladoras. A pressão ideal de trabalho considerada a mais econômica industrialmente é de 6 kgf/cm<sup>2</sup> (FIALHO, 2011).

Karmouche (2009), explica que a pressão de trabalho da rede é a pressão mínima que deve ser disponibilizada pelo compressor, para os equipamentos instalados na rede, prevendo possíveis perdas por vazamento e fluxo na tubulação.

Baseado nas variáveis anteriormente definidas, Fialho (2011) afirma que o diâmetro interno mínimo da tubulação, em milímetros, pode ser calculado de acordo com a Equação 3.

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

O método de dimensionamento do diâmetro mínimo, definido de acordo com Fialho (2011), consiste em um processo de duas etapas, inicialmente considera-se apenas o comprimento linear da tubulação ( $L_L$ ), um diâmetro mínimo é obtido, a partir desse valor determina-se o diâmetro comercial a ser usado baseado em dados fornecidos por fabricantes de tubulações. Verifica-se então, o comprimento característico de todos os acessórios da rede, de acordo com as tabelas em anexo, ao soma-los com o comprimento retilíneo obtém-se o comprimento total  $L_T$ . A segunda etapa é a verificação do diâmetro comercial utilizando o comprimento total obtido calculando novamente o diâmetro mínimo através da Equação 3.

### 2.5.1.2 Materiais empregados em tubulações

Segundo Telles (2001), recomendava-se antigamente, que as tubulações para condução de ar comprimido fossem fabricadas em aço-carbono ou aço-carbono galvanizado de acordo com a pressão da rede. Hoje em dia, a utilização de materiais plásticos em tubulações tem crescido significativamente, principalmente substituindo

materiais como os aços inoxidáveis e metais não ferrosos, devido seu baixo custo em relação a sua resistência a corrosão quando comparado com aços inoxidáveis por exemplo.

Materiais plásticos apresentam diversas vantagens e desvantagens em sua utilização, entre elas Telles (2001) cita alguns importantes que devem ser levadas em conta na escolha dos materiais para cada aplicação.

a) Vantagens:

- Baixa densidade;
- Alta resistência a corrosão;
- Baixo custo comparado com outros materiais inoxidáveis;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Facilidade de fabricação, manuseio e montagem;
- Baixa condutividade térmica e elétrica;
- Cor própria que dispensa a pintura e garante boa aparência;

b) Desvantagens:

- Baixa resistência ao calor;
- Baixa resistência mecânica, inferior aos aços;
- Pouca estabilidade dimensional estando sujeitos a fluência em quaisquer temperaturas;
- Coeficiente de dilatação elevado;
- Alguns plásticos são capazes de propagar chamas;

### 2.5.1.3 PPR - Polipropileno Copolimero Random

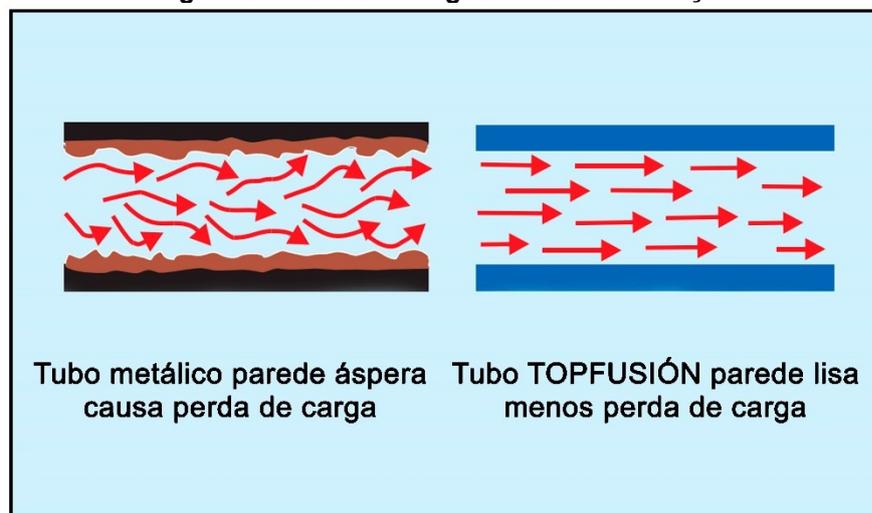
São universalmente utilizados e recomendados os tubos e conexões em PPR (Polipropileno Copolimero Random) na cor azul, para instalações de redes condutoras de ar comprimido, os quais são encontrados em bitolas que variam de 20 mm à 160 mm de diâmetro. Tubos em PPR pesam cerca de 30% do equivalente metálico e possuem originalmente uma rugosidade interna de duas a três vezes menor (Topfusión, [201-?]).

De acordo com o catálogo da fabricante de tubos e acessórios Topfusión, [201-?], tubulações instaladas utilizando o material plástico PPR, podem reduzir significativamente a perda de carga do sistema, se comparada a uma instalação com

tubos metálicos, um dos fatores principais é a ausência de oxidação formada ao longo do tempo no interior de tubulações metálicas, a qual além de elevar a rugosidade interna do tubo, pode com o passar do tempo ser arrastada até válvulas e atuadores pneumáticos, gerando danos e paradas indesejadas para manutenção reduzindo a produtividade e eficiência do sistema.

A Figura 5 retrata uma comparação entre uma tubulação oxidada e um tubo fabricado em PPR pela fabricante Topfusión, além do efeito causado pela rugosidade formada em tubos metálicos e seu efeito no deslocamento do fluido, comparado com uma tubulação construída em PPR.

**Figura 5 - Efeitos da rugosidade da tubulação.**



Fonte: Adaptado de Topfusión, [201-?].

## 2.5.2 Acessórios

Após o dimensionamento e escolha de uma tubulação comercial, alguns acessórios como curvas, tês, válvulas entre outros, os quais são selecionados a partir do diâmetro comercial escolhido para tubulação, pressão e vazão de operação do sistema e equipamentos nele instalados.

### 2.5.2.1 Filtros

A função do filtro é eliminar partículas sólidas presentes no ar comprimido através de duas etapas, a primeira consiste em uma pré-eliminação realizada por uma

força centrífuga gerada pela rotação do ar, já a segunda etapa é a filtragem fina que é realizada por um elemento filtrante. Geralmente os filtros apresentam drenos utilizados para eliminar líquidos obtidos no processo de filtragem (SILVA, 2002).

#### 2.5.2.2 Secador

De acordo com Metalplan (2010), a função do secador é remover a umidade presente no ar comprimido, seja ela em forma de vapor ou líquido e fornecer ar no ponto de orvalho estabelecido para o sistema. Os mecanismos secadores podem atuar por refrigeração ou adsorção. Reduzindo a temperatura do ar para valores próximos a 0°C, a condensação tende a ser máxima, os condensados são removidos por um sistema de purga e filtros e posteriormente o ar é reaquecido, através deste princípio operam os secadores por refrigeração utilizando um circuito frigorífico para redução da temperatura do ar. Sistemas de adsorção removem a umidade sem condensar o vapor, chegando a pontos de orvalho próximos a -100°C, utiliza-se então um material adsorvente como sílica gel, alumina ativada entre outros, que atraem as moléculas de água para sua superfície, porém tal sistema consome mais energia e é indicado apenas para aplicações específicas onde o secador por refrigeração não é eficaz.

#### 2.5.2.3 Válvulas e reguladores de pressão

De acordo com Telles (2001), as válvulas são os dispositivos de maior importância em um sistema pneumático e exigem um grande cuidado na sua seleção, dimensionamento, especificação e localização na rede, ao serem empregados em uma tubulação. Tais acessórios revelam sua importância em situações de manutenção por exemplo, onde as válvulas podem permitir, de acordo com a manobra correta, a realização do reparo e o funcionamento simultâneo do restante da rede.

Em seu catálogo de válvulas, Parker ([2006?]), define que a válvula é o componente do circuito que controla a direção, pressão e vazão do ar comprimido, podendo ser de controle direcional com duas, três, quatro ou cinco vias, reguladoras de pressão ou vazão e de bloqueio.

Em tubulações de até duas polegadas de diâmetro, as válvulas mais utilizadas são do tipo esfera, para tubulações acima de duas polegadas geralmente utilizam-se válvulas do tipo gaveta (PARKER, [2006?]).

As válvulas de reguladoras pressão tem uma grande relevância no sistema, pois permitem que diversos equipamentos atuem em uma mesma rede pneumática. Possuem a função de manter a pressão constante no equipamento, para seu funcionamento a pressão secundária (regulada na válvula), deve ser inferior a pressão primária (pressão de alimentação da rede), a válvula atua reduzindo a pressão da rede permitindo que equipamentos que operam em regimes inferiores possam ser alimentados por um sistema que opera em pressão superior (SILVA, 2002).

#### 2.5.2.4 Purgadores

Os purgadores consistem em dispositivos destinados a realizar a drenagem de líquidos contaminantes do sistema para o meio ambiente, processo conhecido como purga. Esses dispositivos podem ser manuais ou automáticos com acionamento mecânico ou eletrônico (METALPLAN, 2010).

#### 2.5.3 Compressor

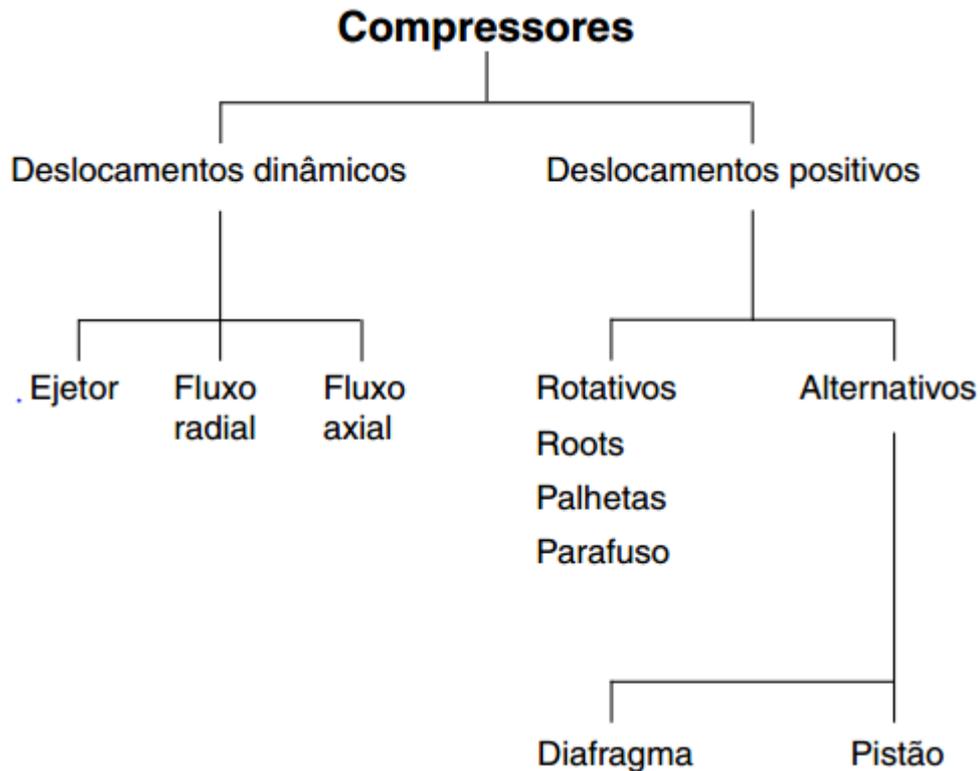
Compressor é o equipamento utilizado para elevar a pressão do ar atmosférico até uma determinada pressão de trabalho necessária em um equipamento ou aplicação. Dois fatores de extrema importância para a escolha do compressor são, a pressão de trabalho e o volume de ar (PAVANI, 2011).

Os compressores podem ser classificados em duas categorias.

- Deslocamento positivo;
- Deslocamento dinâmico;

Como mostra a classificação da Figura 6.

Figura 6 - Classificação de compressores.



Fonte: Parker Training, 2006, p. 12.

De acordo com Pavani (2011), alguns exemplos de compressores de deslocamento positivo podem ser de pistão ou parafuso. Os de pistão, consistem em um embolo que admite o ar atmosférico e através da redução gradual do volume do embolo, realiza a compressão até uma determinada pressão que ao ser atingida a válvula se abre e o ar comprimido é expelido para o reservatório. Compressores de parafuso realizam a compressão do ar através de um tubo e uma espécie de rosca que realiza a redução contínua do volume da câmara de compressão ao longo do tubo.

Quando se trata de compressores de pistão, podem ser classificados como de estágio único, duplo ou de múltiplos estágios, determinados de acordo com o número de pistões que realizam o processo de compressão no equipamento.

Pavani (2011) define ainda, que os compressores de deslocamento dinâmico, se baseiam na conversão da energia cinética para energia de pressão, ou seja, o ar a ser comprimido tem sua velocidade elevada ao entrar em contato com impulsores, adquirindo energia cinética, posteriormente sua velocidade é retardada por meio de difusores e conseqüentemente tem sua pressão elevada.

#### 2.5.4 Reservatório

O reservatório de ar comprimido tem a função de armazenar o ar garantindo o consumo por algum tempo, o que permite que o compressor pare caso necessário, reduzindo também o consumo de energia elétrica, outra função importante do equipamento é garantir o pleno funcionamento da rede em momentos onde ocorrem picos de demanda. Por questões de segurança o reservatório é selecionado para uma pressão de um bar acima da pressão máxima produzida pelo compressor (BOSCH, 2008).

Segundo Metalplan (2010), o dimensionamento do volume necessário para o reservatório, é feito de uma forma simplificada, através da vazão do sistema e do tipo de compressor utilizado. A vazão do sistema é medida em  $\text{m}^3/\text{min}$ , para compressores de pistão considera-se um reservatório com volume mínimo igual a 20% da vazão do sistema, para compressores rotativos pode-se considerar apenas 10%, ou seja, para uma vazão arbitrária de  $5 \text{ m}^3/\text{min}$  em um compressor de pistão o reservatório deve possuir um volume mínimo de um metro cúbico.

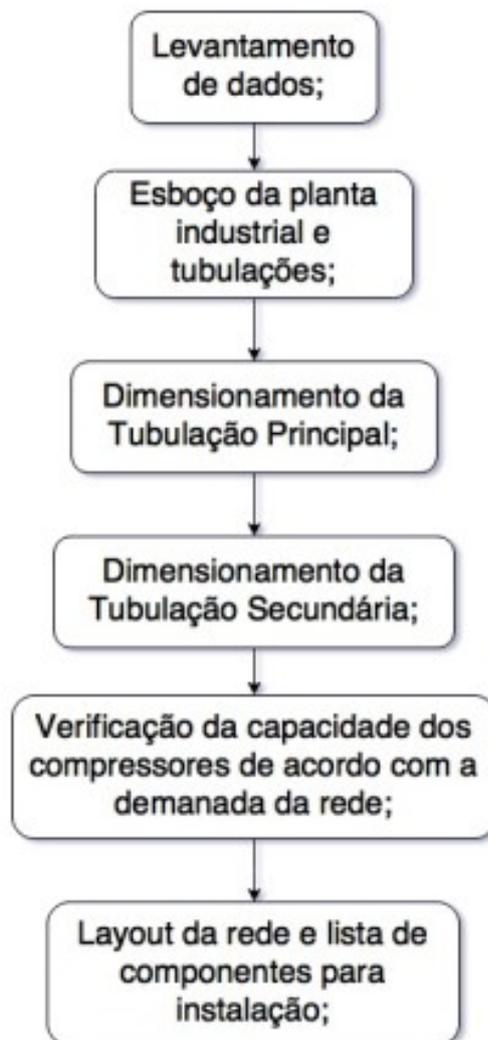
Recomenda-se que o volume total de armazenamento necessário para a rede, seja dividido em dois reservatórios iguais a serem instalados um logo após o pós-filtro e outro entre o compressor e o pré-filtro. Ajustados dessa forma o sistema conta com um primeiro reservatório de ar úmido e o segundo onde mantem-se o ar limpo e seco pronto para uso. Essa disposição oferece benefícios como o ajuste perfeito do ciclo de carga da rede e alívio dos compressores, proteção do sistema contra vazamentos de óleo e picos de vazão que podem ocorrer no primeiro reservatório (METALPLAN, 2010).



### 3 METODOLOGIA

A elaboração do projeto consistiu em uma série de passos, os quais podem ser visualizados no fluxograma mostrado na Figura 7, tendo algumas etapas detalhadas no decorrer do capítulo.

Figura 7 - Fluxograma geral do projeto.



Fonte: Autoria própria, 2017.

#### 3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

A primeira etapa do projeto consiste em um levantamento de dados e informações que regem o projeto, parte delas obtidas a partir de informações fornecidas pelo engenheiro responsável pela empresa, outras verificadas nos

equipamentos de acordo com plaquetas e manuais além de medições realizadas na planta industrial.

A partir da verificação dos problemas relacionados ao sistema de distribuição de ar comprimido, partiu-se para um levantamento de dados, ou seja, através de informações fornecidas pelo engenheiro responsável pela indústria e informações de equipamentos, buscou-se conhecer qual a demanda atual e de futuras ampliações planejadas na planta que o sistema pneumático deveria atender. Outro ponto que merece atenção são os problemas apresentados pela atual instalação que deveriam ser corrigidos no redimensionamento do sistema.

Cria-se então, um esboço da planta industrial, o qual permitiu uma visualização preliminar do número de pontos de consumo e localização dos equipamentos que dependem do sistema pneumático.

A coleta de dados referentes a demanda de pressão e vazão de cada equipamento deve ser realizada, com o devido registro escrito e, se possível fotográfico, resultando em uma tabela com as informações e dados obtidos.

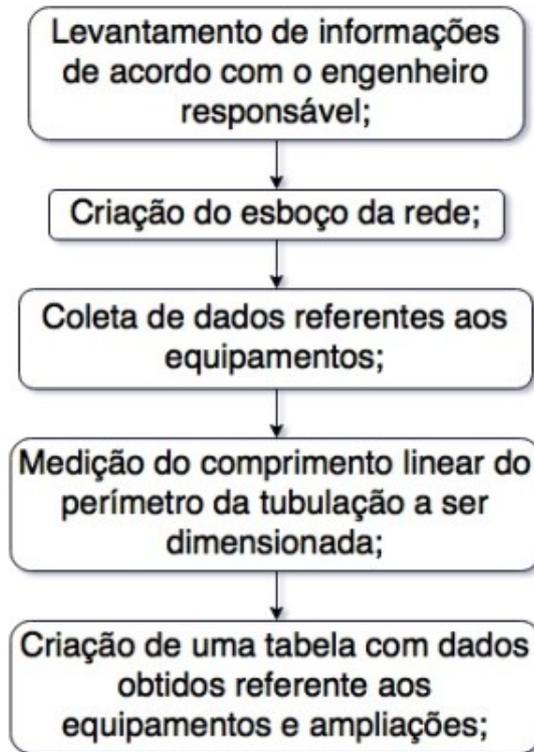
Outra etapa que corresponde a coleta de dados é a verificação das dimensões relacionadas ao projeto, ou seja, mediu-se todo o perímetro correspondente à tubulação, que a partir da planta da edificação e do esboço, gera valores para aproximação do comprimento total da tubulação, permitindo cálculos futuros referentes ao diâmetro interno mínimo da mesma.

A coleta de dados segue os seguintes passos e fluxograma:

- Análise de informações a respeito do projeto: problemas atuais, ampliações previstas e necessidades da empresa;
- Esboço do sistema de tubulações e posição de equipamentos na rede;
- Dimensionamento do comprimento da tubulação a ser projetada de acordo com o esboço;
- Coleta de dados como pressão de trabalho e vazão dos equipamentos instalados e de ampliações previstas;
- Criação de uma tabela com dados coletados;

O fluxograma mostrado na Figura 8 representa os passos da etapa de coleta de dados do projeto.

Figura 8 - Fluxograma de levantamento de dados.



Fonte: Autoria própria, 2017.

### 3.2 DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO

O método definido a seguir e representado no fluxograma para o dimensionamento do diâmetro mínimo da tubulação, é uma síntese do que Fialho (2011) explica.

Os dados anteriormente coletados, relacionados a pressão de trabalho, vazão e comprimento das tubulações, permitem que seja realizado o cálculo preliminar do diâmetro mínimo da tubulação a partir da equação (3).

De acordo com o método de dimensionamento da tubulação descrito por Fialho (2011), após realizado o cálculo do diâmetro mínimo e escolhida um diâmetro comercial aproximado, verificou-se o comprimento característico das singularidades presentes na tubulação, como tês, curvas, válvulas entre outros de acordo com as tabelas presentes no Anexo - A. O comprimento característico dos acessórios é somado ao comprimento total da tubulação, de acordo com a equação (2), o diâmetro mínimo da tubulação é recalculado, permitindo a verificação da tubulação comercial escolhida.

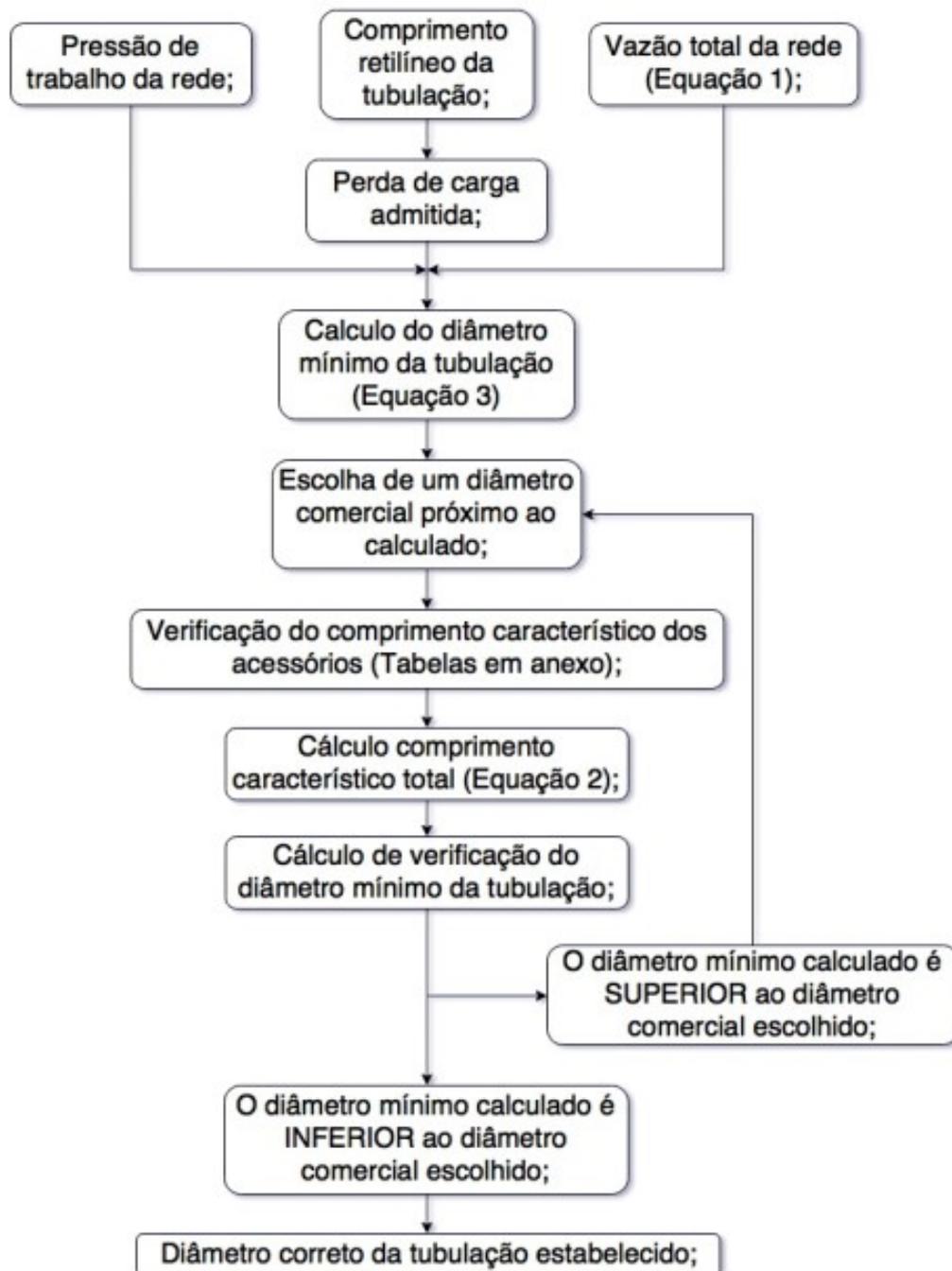
O procedimento é válido tanto para o dimensionamento da tubulação principal quanto para as secundárias de acordo com os acessórios instalados, comprimento da linear e característico da tubulação, pressão da linha e vazão necessária.

O cálculo do diâmetro segue os seguintes passos:

- Análise de dados como comprimento da tubulação, vazão total e pressão de trabalho;
- Determinação da perda de carga máxima de acordo com o comprimento da tubulação;
- Cálculo preliminar do diâmetro mínimo para tubulação em questão;
- Verificação do comprimento característico dos acessórios de acordo com as tabelas em anexo;
- Cálculo de verificação do diâmetro mínimo de acordo com o comprimento total da rede, tubulação e acessórios;
- Escolha do diâmetro comercial;

Representados no fluxograma mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma de dimensionamento da tubulação.



Fonte: Autoria própria, 2017.

### 3.3 AVALIAÇÃO DOS COMPRESSORES

Baseado no fato de que para este projeto, a empresa já possui uma rede pneumática em funcionamento, um dos objetivos do projeto consiste em uma avaliação dos compressores instalados.

Para isso será relacionada a demanda de vazão e a pressão de trabalho da nova rede, com a capacidade dos compressores atualmente instalados na empresa verificando se os equipamentos são capazes de atender a demanda.

### 3.4 AVALIAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS

Após o dimensionamento do volume necessário para os reservatórios de acordo com os dados de vazão da rede, avalia-se a capacidade instalada no sistema atual comparando os resultados obtidos com os dados da rede.

Se necessário, o cálculo realizado para determinação do volume mínimo permite a escolha de um novo reservatório.

### 3.5 DESENHO ESQUEMÁTICO DA TUBULAÇÃO

Além do dimensionamento da tubulação, o desenho com as devidas representações esquemáticas é de extrema importância para a conclusão e implantação do projeto.

O desenho permite a visualização da rede, dimensões das tubulações e acessórios presentes na rede, será utilizado um software CAD para elaboração dos desenhos pertinentes ao projeto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 COLETA DE DADOS

A etapa inicial do projeto consistiu em uma coleta de dados e informações necessárias para o desenvolvimento do projeto, através de algumas visitas técnicas na indústria e uma entrevista respondida pelo Engenheiro Mecânico responsável, a qual pode ser verificada no Apêndice A, foi possível obter informações a respeito de problemas presentes na tubulação instalada.

Uma planilha elaborada pela empresa de acordo com informações obtidas em manuais e plaquetas dos equipamentos, sintetiza dados relacionados à demanda de ar comprimido, além de valores relacionados à capacidade de geração dos compressores e armazenamento dos reservatórios utilizados, concluindo a etapa inicial do projeto.

O Anexo B apresenta uma representação de toda a planta industrial e traçados referentes a tubulação instalada na empresa. Considerado o ponto de partida para as análises e elaboração do projeto, a base onde foi representado o traçado da tubulação é uma representação em CAD do barracão da indústria e posicionamento dos equipamentos, possibilitando uma visualização completa das tubulações e pontos de consumo.

#### 4.1.1 Demanda de ar comprimido na unidade

Na Tabela 1 são apresentados alguns dados coletados e fornecidos pela empresa, alguns valores de vazão de ar comprimido, medidos em pcm (pés cúbicos por minuto), foram estimados devido à falta de dados precisos, tendo em vista que se tratam de equipamentos antigos que não possuem as devidas identificações e manuais. Os números de referência presentes na tabela especificam a posição do equipamento de acordo com *layout* presente no Anexo B.

Tabela 1 - Dados de demanda da rede pneumática da fundição.

Setor	Equipamentos	Número de referência	Demanda [pcm]
<b>Cura-Frio</b>	Filtro Manga 6 Válvulas	1	7
	Leito Fluidizado	2	140
	Propulsor	3	140
	Filtro Manga 11 Válvulas	3.1	16,5
	Sopradora Cold Box	4	80
<b>Macharia</b>	Sopradora Vick	5	46
	Sopradora Shell	6	40
	Propulsor	7	140
	Gasadora	8	10
	Filtro Manga 8 Válvulas	9	9,3
<b>Moldagem de chapas</b>	Gasadora Vick	10	12,6
<b>Fusão</b>	3 Aquecedores de Painelas	11	-
<b>Gazzola</b>	2 Moldadoras 4318	12	100
<b>Acabamento</b>	Filtro Manga 9 Válvulas	13	10,5
	Filtro Manga 16 Válvulas	14	18,6
	Filtro Manga 9 Válvulas	15	10,5
	3 Bancadas de Ferramentas	16	129
<b>TOTAL</b>			<b>910</b>

Fonte: Dados fornecidos pela empresa, 2017.

Para o dimensionamento da tubulação será considerado o pleno funcionamento de todos os equipamentos, de acordo com a entrevista e parâmetros definidos em conversas durante as visitas, determinou-se que a rede seja dimensionada para atender toda a demanda de ar comprimido da empresa em pleno funcionamento, a decisão de implantação do projeto fica a critério da gestão da empresa.

#### 4.1.2 Pressão de trabalho da rede

Durante as visitas verificou-se alguns dados referentes a pressão de trabalho da rede instalada, onde alguns problemas foram revelados, como por exemplo, o fato de que alguns equipamentos têm seu funcionamento interrompido se a pressão na tubulação for inferior a 6,5 bar.

Considerando possibilidade da instalação de uma válvula reguladora de pressão na tubulação de alimentação de cada equipamento, a pressão de trabalho da

rede pode ser elevada, garantindo o pleno fornecimento de ar comprimido para todos os equipamentos, que através de regulagens individuais trabalhariam na pressão ideal.

A entrevista apresentada no Apêndice A, sugeriu uma pressão de trabalho mínima de sete bar para garantir o pleno funcionamento de todos os equipamentos, entretanto, a pressão de trabalho está relacionada de maneira inversamente proporcional ao diâmetro interno mínimo a ser dimensionado, ou seja, quanto maior a pressão da rede, menor o diâmetro interno necessário na tubulação, tal fato pode ser verificado pelos termos da Equação 3 descrita por Fialho (2011).

Partindo da pressão mínima de 7 bar que garante o funcionamento dos equipamentos, pode-se considerar uma elevação na pressão da rede, que proporciona uma redução no diâmetro interno da tubulação e consequentes custos de implantação do projeto, foi estabelecida para o projeto, a seguinte pressão de trabalho para a rede.

- Pressão de trabalho da rede: 8 bar.

#### 4.1.3 *Layout* da indústria e posicionamento dos equipamentos

As visitas realizadas na indústria permitiram, além da obtenção dos dados de consumo dos equipamentos, a possibilidade de verificar o posicionamento dos mesmos.

Um *layout* fornecido pelo engenheiro responsável, que pode ser verificado no Anexo B, revela a posição dos equipamentos instalados e uma demarcação do caminho atual da tubulação na planta industrial, permitindo que as alterações pudessem ser planejadas de acordo com as necessidades.

##### 4.1.3.1 Comprimento total da tubulação principal instalada

Baseado em uma planta da instalação, foi possível verificar o comprimento total da rede atualmente instalada na empresa.

Esse dado pode ser medido de acordo com a representação na planta do Anexo B, o desenho é parte de um projeto onde praticamente toda a empresa e seus equipamentos estão devidamente desenhados e montados em CAD, através dele e

conhecendo algumas dimensões, foi possível determinar a medida aproximada da tubulação principal instalada.

- Comprimento total da tubulação principal instalada: 435 m.

## 4.2 PROBLEMAS ENCONTRADOS E REQUISITOS DO PROJETO

### 4.2.1 Localização de alguns compressores

Como pode ser verificado no *layout* atual em anexo, uma das salas dos compressores e reservatórios encontra-se instalada distante da indústria, esse fato acaba elevando o diâmetro mínimo necessário para a tubulação, tendo em vista que o comprimento linear da tubulação influencia diretamente no diâmetro mínimo necessário.

A Figura 10, trata-se de uma imagem de satélite obtida através do Google Maps (2018), onde é possível verificar a localização de uma das salas de compressores da empresa, representada pelo ponto zero e localizada cerca de 30 metros do ponto de entrada da tubulação na indústria.

**Figura 10 - Posição da sala de compressores em relação à indústria.**



Fonte: Google Maps, 2018.

Na Figura 11 é mostrada uma fotografia da sala dos compressores representada na Figura 10, a qual acomoda dois compressores, dois reservatórios e alguns equipamentos inativos.

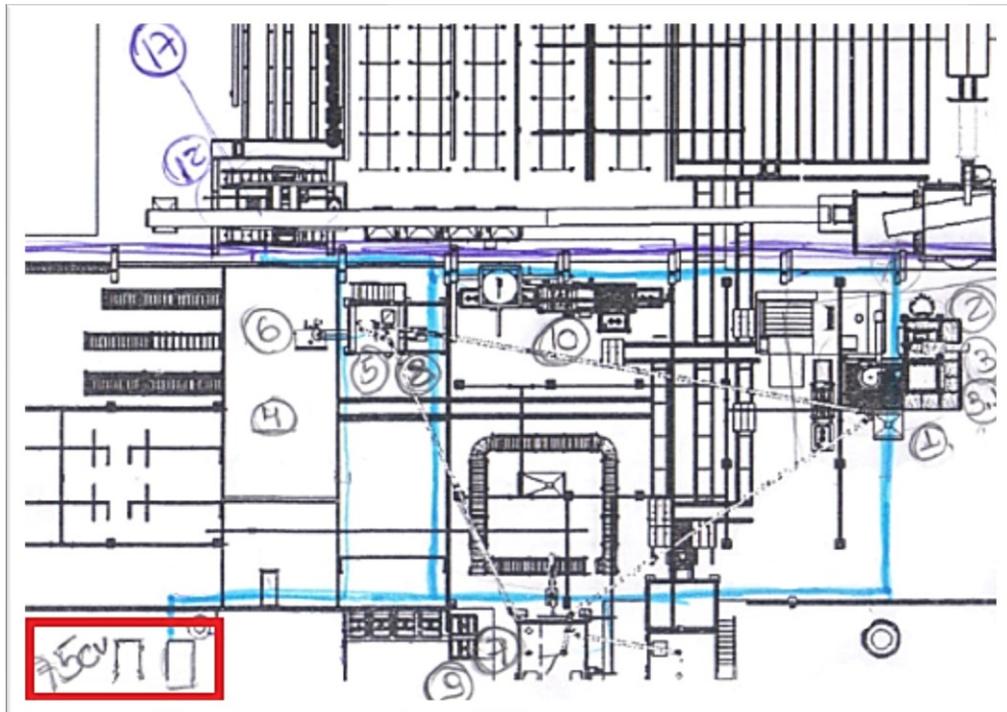
**Figura 11 - Sala dos compressores.**



**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Atualmente a empresa conta com um segundo espaço que acomoda um compressor e um reservatório, o qual fica localizado no mesmo barracão da indústria e próximo a vários equipamentos com elevada demanda de ar comprimido. Este espaço pode ser utilizado para acomodar os demais compressores e reservatórios, na Figura 12 é mostrada parte do *layout* do Anexo B, onde em destaque, encontra-se a sala que acomoda um compressor e um reservatório, também podem ser observados os pontos de consumo próximos, representados pelo número de referência de acordo com a Tabela 1.

Figura 12 - Local de instalação de compressor e pontos de consumo.



Fonte: Adaptado do *Layout* original fornecido pela empresa, 2018.

#### 4.2.2 Tubulação sobre os fornos

Atualmente parte da tubulação de ar comprimido da empresa tem seu trajeto sobre os fornos da fundição, local onde a temperatura é elevada e acaba gerando problemas de condensação no interior da tubulação devido a variação da temperatura do ar no interior do tubo.

O trecho em questão trata-se de uma tubulação metálica, portanto a elevação da temperatura não provoca danos no tubo, o que pode ocorrer caso seja instalada uma tubulação de material polimérico (PPR) no mesmo trajeto.

A Figura 13, retrata uma imagem do problema mencionado, onde é possível visualizar um dos fornos em operação.

**Figura 13 - Tubulação sobre os fornos.**



**Fonte: Autoria própria, 2018.**

#### 4.2.3 Vazamentos

Outro problema descrito pelo engenheiro responsável durante as visitas, foi a presença de diversos locais com pequenos vazamentos na rede, os quais somados a momentos de alta demanda na indústria, acabaram prejudicando o fornecimento de ar para alguns equipamentos. Diversos pontos de vazamentos foram reparados na tubulação, considerando o fato de que grande parte da instalação é montada com tubos antigos fabricados em material metálico, muitos estão oxidados e possuem micro trincas que provocaram pequenos vazamentos, muitas vezes difíceis de serem localizados e reparados.

#### 4.2.4 Dimensionamento incorreto

Conforme relatado pelo engenheiro responsável, a rede atual não possui um correto dimensionamento, foi instalada para atender uma pequena demanda de ar comprimido, sendo ampliada de acordo com o aumento da produção e consequente necessidade de instalação de novos equipamentos.

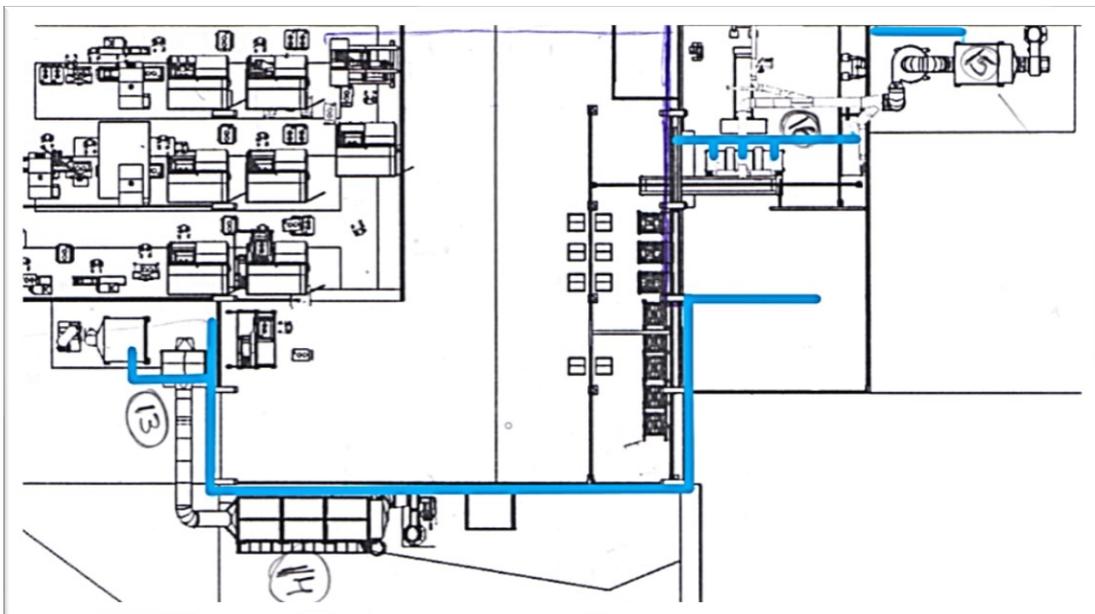
As ampliações foram instaladas sem o correto dimensionamento, muitas vezes com o diâmetro interno mínimo muito inferior ao mínimo necessário, resultando em uma elevação na perda de carga, fator que pode ser a causa de falhas no funcionamento de alguns equipamentos.

#### 4.3 TUBULAÇÃO CONSTRUÍDA EM PPR

Parte da tubulação instalada foi montada recentemente utilizando tubos e conexões de material polimérico (PPR), as quais possuem diversas vantagens quando comparadas a tubulações metálicas.

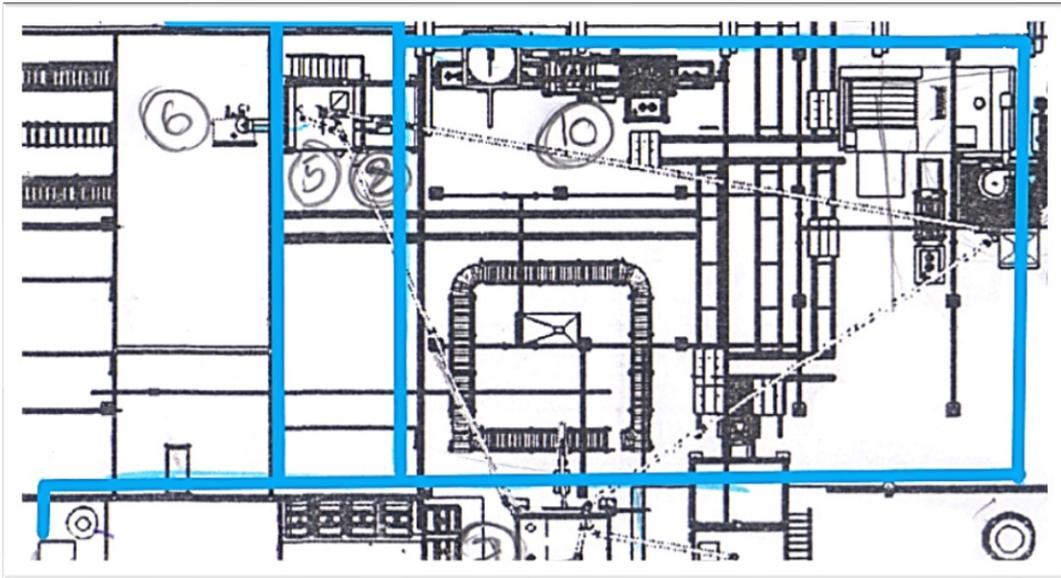
A primeira alternativa considerada para o projeto foi, se possível, preservar a parte nova da rede, com o objetivo de reduzir os custos da instalação, nas Figuras 14 e 15 são mostradas algumas seções do *layout* da indústria presente no Anexo B, onde as figuras representam partes da tubulação que foram construídas em PPR, demarcadas em verde sobre a planta industrial.

Figura 14 - Tubulação construída em PPR seção 1.



Fonte: Adaptado do *Layout* original fornecido pela empresa, 2018.

Figura 15 - Tubulação em PPR seção 2.



Fonte: Adaptado do *Layout* original fornecido pela empresa, 2018.

Na Figura 16 é mostrada uma imagem de parte da tubulação construída em PPR representada pela Figura 14, este trecho liga uma das salas dos compressores até alguns equipamentos na planta industrial. Nota-se na imagem um desnível na tubulação o qual eleva o número de curvas e a perda de carga da tubulação.

Figura 16 - Tubulação em PPR.



Fonte: Autoria própria, 2018.

#### 4.4 DIMENSIONAMENTO DO DIÂMETRO MÍNIMO DA TUBULAÇÃO

Baseado nas vantagens relacionadas à utilização de tubos e acessórios fabricados em PPR, foi sugerida a utilização de componentes disponibilizados pelo catálogo da fabricante Topfusión [201-?], a Figura 17 revela uma tabela com os respectivos diâmetros internos e externos disponibilizados comercialmente, os quais fornecem um parâmetro inicial na verificação dos cálculos que serão realizados e consequente escolha dos tubos para instalação.

**Figura 17 - Diâmetros internos e externos de tubos em PPR de acordo com a fabricante Topfusión [201-?].**

Ø Ext. Tubo (TOPFUSIÓN)	Ø Int. Tubo (Cálculo)
20	14,4
25	18,0
32	23,0
40	28,8
50	36,2
63	45,6
75	54,2
90	65,0
110	79,8
160	116,2

Fonte: Topfusión, [201-?].

##### 4.4.1 Verificação do dimensionamento da tubulação instalada

A primeira análise foi realizada de acordo com o comprimento total da tubulação atualmente instalada, a qual foi medida através de uma escala no *layout* presente no Anexo B, buscou-se verificar o dimensionamento do diâmetro interno instalado, os cálculos revelaram que a tubulação em operação na indústria, principalmente os trechos instalados em PPR, possuem um diâmetro interno inferior ao mínimo necessário.

A verificação preliminar mostrada no memorial de cálculos presente no Apêndice B, revelou que a tubulação do anel principal deve ter um diâmetro interno mínimo de mais de quatro polegadas para distribuir, de forma satisfatória, toda a demanda de ar comprimido da indústria. No cálculo foi considerado apenas o comprimento retilíneo da tubulação do anel principal instalado, ignorando as

singularidades que contribuem significativamente aumentando o diâmetro interno, assim, foi verificada uma significativa discrepância entre o diâmetro interno da tubulação instalada em PPR, a qual tem no máximo 2,5 polegadas, e o valor previamente dimensionado como ideal. Este cálculo comprovou a necessidade de instalação de uma nova rede, inviabilizando a possibilidade de substituição parcial das tubulações.

Apenas a título de observação, foi possível estimar a elevada queda de pressão presente atualmente na tubulação, considerando um diâmetro interno médio de três polegadas, tendo em vista que alguns trechos da tubulação metálica possuem diâmetros maiores que os trechos em PPR, realizou-se o cálculo conforme descrito no memorial em anexo, isolando a variável  $\Delta P$  na Equação 3, que calcula o diâmetro interno mínimo da tubulação. O cálculo resultou em uma queda de pressão de aproximadamente 2,8 bar, conforme detalhado no memorial. Tal fato solidifica ainda mais a proposta de redimensionamento da rede, que atualmente funciona com uma elevada perda de energia, aumentando os custos de operação do sistema. Metalplan (2010), afirma que para o anel principal instalado, de acordo com o comprimento retilíneo da tubulação, a perda de carga máxima deveria ser de apenas 0,3 bar, muito inferior aos valores estimados para a rede em funcionamento.

O papel do Engenheiro Mecânico consiste em buscar a melhor solução para os problemas propostos, baseado nisso decidiu-se por redimensionar toda a tubulação, corrigindo os problemas de trajeto e dimensionamento, visando garantir uma operação eficiente do sistema, descartando a possibilidade de substituição parcial da tubulação.

#### 4.4.2 Dimensionamento proposto

Baseado no *layout* do Anexo B e nos problemas a serem corrigidos, foi possível realizar algumas alterações na rede, gerando um segundo *layout* prevendo o caminho e resultando nas medidas do comprimento total retilíneo aproximado da nova tubulação a ser dimensionada, como mostra o Anexo C.

#### 4.4.2.1 Tubulação do anel principal

O primeiro dado coletado através do novo *layout* da tubulação foi, de acordo com a escala, o comprimento retilíneo aproximado da tubulação do anel principal.

- Comprimento retilíneo total da tubulação do anel principal: 202 m.

O memorial de cálculos presente no Apêndice B, revela a aplicação da metodologia através dos cálculos realizados para o dimensionamento, onde os valores selecionados para o diâmetro interno mínimo e o comprimento característico das singularidades, seguiram as Tabelas presentes no Anexo A, que se baseiam nas tubulações disponíveis comercialmente segundo Fialho (2011).

Para o cálculo do comprimento característico da tubulação do anel principal, considerou-se os seguintes acessórios:

- 17 tês 4,0", fluxo em linha, rosqueados;
- Três tês 4,0", fluxo pelo ramal, rosqueados;
- Sete curvas de 90°, raio longo, rosqueadas;
- 15 válvulas tipo Gaveta rosqueadas.

As válvulas previstas no dimensionamento podem ser utilizadas em pontos estratégicos a serem definidos pela empresa. Partes da rede podem exigir desligamentos momentâneos, onde o posicionamento das válvulas permite manobras interrompendo o funcionamento em algumas partes, mantendo a operação nos demais pontos de consumo.

O resultado obtido nos cálculos e o diâmetro comercial escolhido, de acordo com a Figura 17, encontram-se expostos na Tabela 2 para o anel principal a ser instalado na indústria.

**Tabela 2 - Diâmetro interno mínimo calculado e comercial escolhido para a tubulação do anel principal**

<b>Tubulação</b>	<b>Diâmetro interno mínimo calculado e verificado [mm]</b>	<b>Diâmetro interno comercial escolhido [mm]</b>
Tubulação do anel principal	110,81	116,2

Fonte: Aatoria própria, 2018.

Maiores detalhes a respeito dos cálculos realizados e resultados obtidos, podem ser verificados no Apêndice A, que após a aplicação da metodologia, possibilitaram a escolha de um diâmetro comercial de tubulação para o anel principal.

#### 4.4.2.2 Tubulação secundária

A nova rede proposta tende a reduzir o comprimento do anel principal, exigindo o dimensionamento de uma tubulação secundária ligando alguns equipamentos instalados em pontos distantes, até o anel principal.

É o caso dos equipamentos 13, 14, 15 e 16, que exigem dois trechos de tubulação secundária, a localização dos equipamentos e o trajeto percorrido por suas respectivas tubulações, podem ser verificados no Anexo C, que representa um desenho preliminar da tubulação principal e secundárias, feito sobre o *layout* da indústria.

Para os equipamentos 13 e 14 considerou-se o seguinte comprimento retilíneo e as seguintes singularidades.

- Comprimento retilíneo tubulação secundária 13 e 14: 42 metros;
- Três curvas 90°, raio longo, rosqueadas;
- Tê fluxo pelo ramal, rosqueado;
- Tê fluxo em linha, rosqueado.

Para os equipamentos 15 e 16 considerou-se os seguintes parâmetros:

- Comprimento retilíneo tubulação secundária 15 e 16: 21,5 m
- Curva 90°, raio longo, rosqueada;
- Tê fluxo pelo ramal, rosqueado;
- Tê fluxo em linha, rosqueado.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos e verificados nos cálculos, de acordo com o memorial em anexo e diâmetros comerciais escolhidos para a instalação das tubulações secundárias.

**Tabela 3 - Diâmetro interno mínimo calculado e comercial escolhido para tubulação secundária.**

<b>Tubulação secundária dos equipamentos</b>	<b>Diâmetro interno mínimo calculado e verificado [mm]</b>	<b>Diâmetro interno comercial escolhido [mm]</b>
13 e 14	21,394	28,8
15 e 16	34,179	45,6

**Fonte: Autoria própria, 2018.**

#### 4.4.2.3 Tubulação de alimentação

Cada equipamento exige uma tubulação de alimentação que deve ser ligada no anel principal ou à tubulação secundária, onde seu comprimento retilíneo é estimado de acordo com a altura do anel principal e a distância até o ponto de consumo.

Alguns equipamentos terão sua tubulação de alimentação acoplada diretamente ao anel principal, outros, conforme dimensionado, exigem a instalação de uma tubulação secundária onde será ligada a tubulação de alimentação.

Para as tubulações de alimentação considerou-se o seguinte comprimento retilíneo e singularidades.

- Comprimento retilíneo da tubulação de alimentação: 3,5 m.
- Dois tês, fluxo em ramal, rosqueados;
- Curva longa 180°, rosqueada;
- Válvula Globo, rosqueada;
- Duas curvas 45°, rosqueadas.

Após os cálculos do diâmetro mínimo da tubulação de alimentação considerando apenas o comprimento retilíneo, os equipamentos foram classificados e generalizados utilizando três diâmetros comerciais de acordo com os resultados obtidos, a verificação do diâmetro interno mínimo utilizando o comprimento característico das singularidades, foi realizada seguindo a classificação efetuada.

Para o cálculo de verificação, a demanda considerada foi a maior entre os equipamentos a serem verificados, ou seja, partindo da generalização em três diâmetros comerciais, determinou-se o comprimento característico das singularidades e identificou-se a maior demanda de vazão entre os equipamentos que deveriam possuir a determinada tubulação. No memorial de cálculos no Apêndice A é possível verificar maiores detalhes.

Na Tabela 4 são mostrados os diâmetros calculados e verificados, além do diâmetro comercial escolhido, os quais foram corrigidos e generalizados conforme a medida calculada, padronizando as tubulações comerciais escolhidas e facilitando a execução e montagem do projeto.

**Tabela 4 - Diâmetro interno mínimo calculado e comercial escolhido para tubulações de alimentação.**

<b>Tubulação de alimentação (número de referência)</b>	<b>Diâmetro interno mínimo calculado (comprimento retilíneo) [mm]</b>	<b>Diâmetro interno mínimo e verificado [mm]</b>	<b>Diâmetro interno comercial escolhido [mm]</b>
1	7,496	14,559	18,0
2	22,711	35,279	36,2
3	22,711	35,279	36,2
3.1	10,295	14,559	18,0
4	18,463	27,548	28,8
5	15,045	27,548	28,8
6	14,286	27,548	28,8
7	22,711	35,279	36,2
8	8,554	14,559	18,0
9	8,327	14,559	18,0
10	9,318	14,559	18,0
11	-	14,559	18,0
12	20,052	35,279	36,2
13	8,71	14,559	18,0
14	10,762	14,559	18,0
15	8,71	14,559	18,0
16	22,033	35,279	36,2

Fonte: Autoria própria, 2018.

#### 4.5 LAYOUT DA REDE PNEUMÁTICA APÓS O REDIMENSIONAMENTO

Após uma análise da planta industrial e dos problemas encontrados na antiga instalação, foi possível realizar um planejamento corrigindo os problemas encontrados para o dimensionamento da rede.

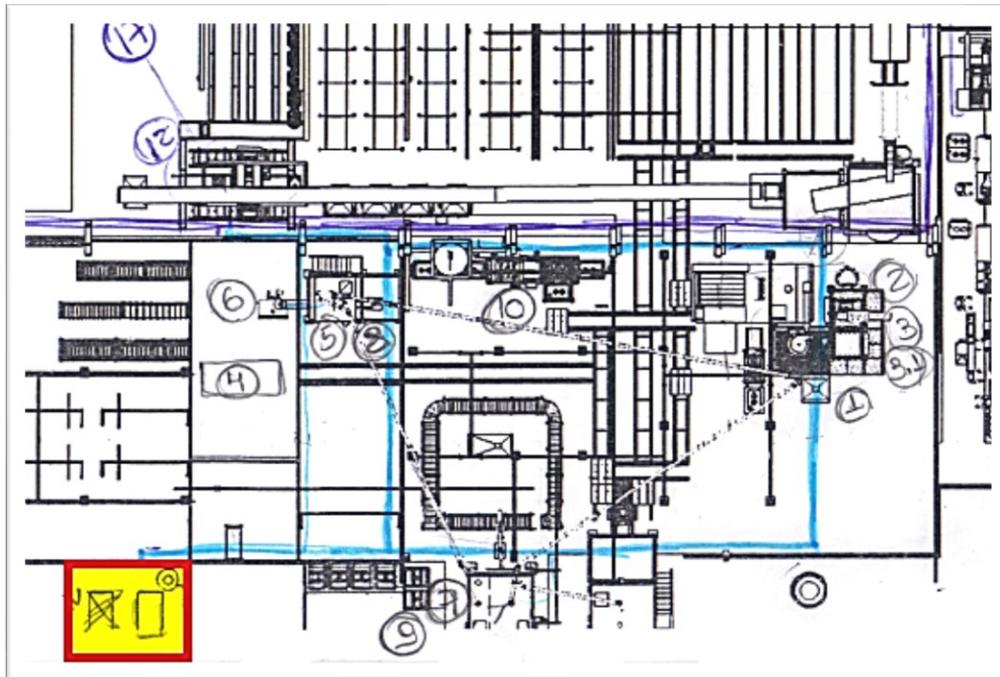
O novo *layout* conta com algumas alterações significativas em seu trajeto e construção.

- Alteração do caminho da tubulação, desviando os fornos e otimizando o trajeto;

- Dimensionamento do diâmetro interno mínimo da tubulação de acordo com a metodologia estabelecida;
- Substituição da tubulação instalada em material metálico por tubos em PPR;
- Alteração do local de instalação de alguns compressores e reservatórios;
- Inclusão no dimensionamento de diversas válvulas de controle que permitem o desligamento de partes da rede para manutenção, oferecendo maior segurança e controle para operação do sistema.

Um dos problemas verificados na tubulação foi a posição de uma das salas de compressores, a qual encontra-se a cerca de 30 metros do ponto de entrada da tubulação na indústria, conforme é mostrado na Figura 10. O novo projeto prevê a alteração do local de instalação dos equipamentos, os quais serão concentrados em um mesmo espaço onde são acomodados atualmente um compressor e um reservatório, localizados junto ao barracão da indústria e próximo a vários equipamentos com elevada demanda de ar comprimido. Na Figura 18 foi possível observar em destaque o novo local de instalação dos compressores na planta industrial. A alteração provoca uma redução significativa no comprimento retilíneo da tubulação do anel principal, influenciando diretamente no diâmetro interno mínimo calculado. É possível observar na figura a concentração de diversos equipamentos próximos a sala dos compressores, os quais são representados pelos respectivos números de referência.

Figura 18 - Sala de compressores e concentração de equipamentos.



Fonte: Adaptado do *Layout* atual fornecido pela empresa, 2018.

O local de instalação dos compressores sugerido para a empresa deve ser avaliado de forma detalhada, pois o funcionamento dos equipamentos gera ruído intenso. Sugeriu-se um estudo aprofundado dos níveis de ruído no ambiente e, se necessário, a instalação de isolamento acústico na sala dos compressores.

Os compressores fazem a captação do ar atmosférico podendo levar para o interior da tubulação a poeira presente no ambiente. Visando preservar os filtros e reduzir a captação de poeira, que pode ser formada pelo trânsito de veículos em áreas próximas à sala de compressores, sugeriu-se para a empresa, o isolamento do local e a instalação de um tubo de captação, para que o ar seja sugado em um ponto com altura elevada, localizado por exemplo, no telhado da indústria.

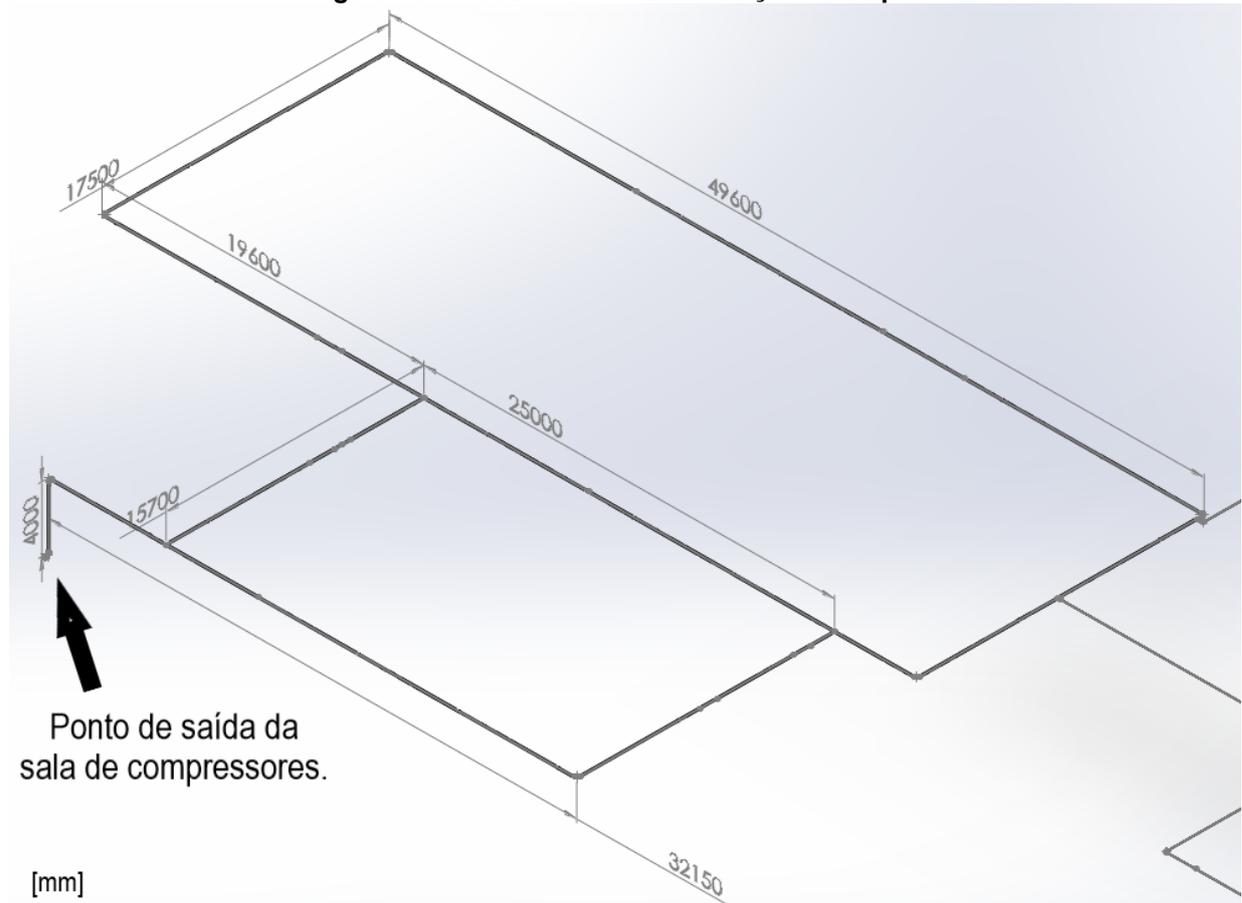
No Apêndice A é mostrada uma representação preliminar de toda a tubulação do anel principal e das tubulações secundárias a serem instaladas na empresa, a demarcação da rede teve seu trajeto planejado sobre o *layout* da empresa apresentado no Anexo B.

Os cálculos realizados para o dimensionamento, permitiram a elaboração de um modelo em CAD representando a tubulações projetadas, o qual será parte do trabalho a ser fornecido para a empresa.

#### 4.5.1 Anel principal

Na Figura 19, é mostrada parte do modelo feito em software CAD, que representa o anel principal dimensionado para a indústria, partindo da sala de compressores onde será concentrada toda geração de ar comprimido da indústria.

**Figura 19 - Modelo em CAD Tubulação Principal.**



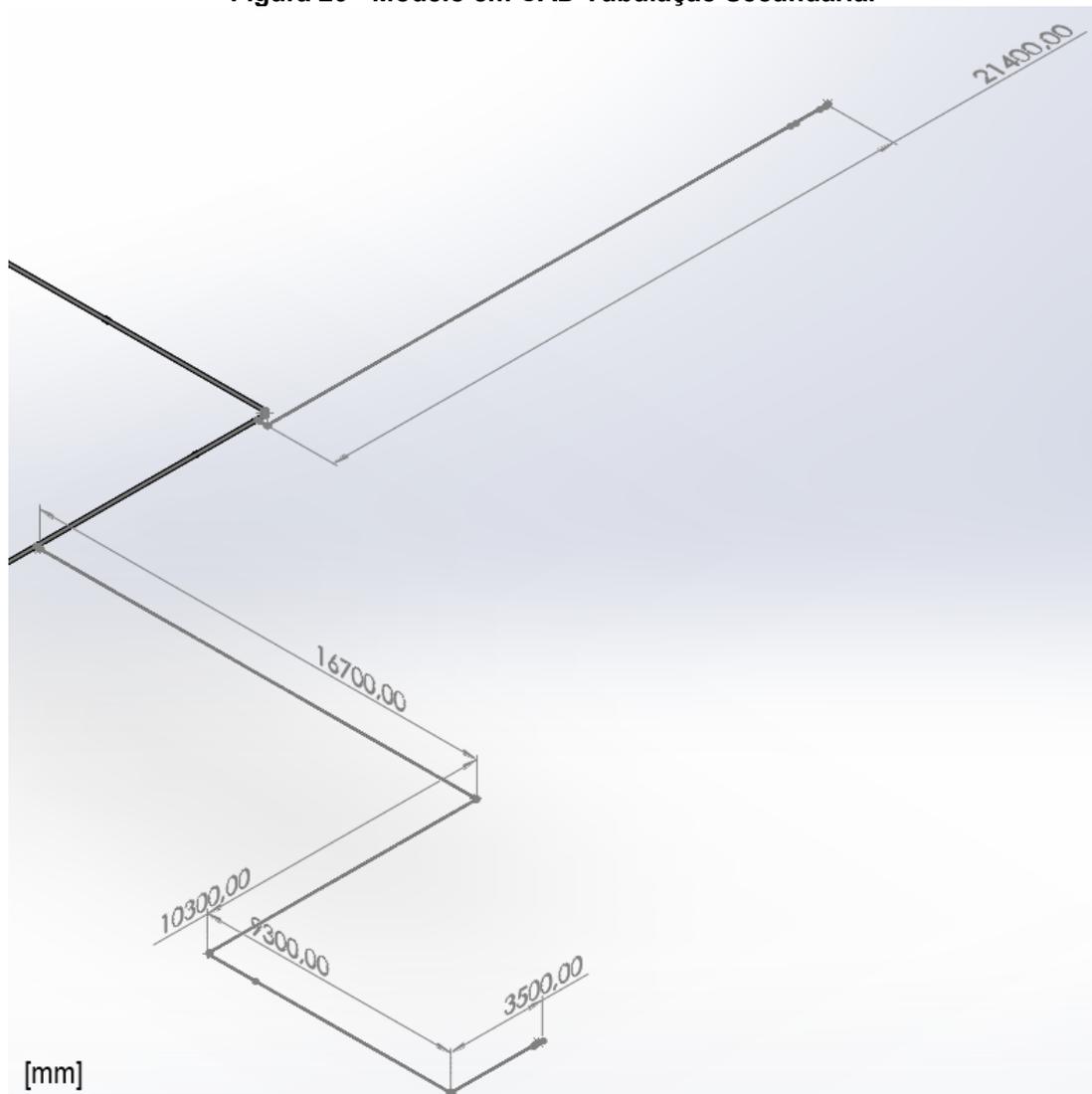
**Fonte: Autoria própria, 2018.**

As dimensões presentes na figura são representadas em milímetros.

#### 4.5.2 Tubulações secundárias

De acordo com a representação mostrada na Figura 20, é possível verificar uma segunda parte do modelo, a qual revela as tubulações secundárias projetadas com suas respectivas dimensões em milímetros.

Figura 20 - Modelo em CAD Tubulação Secundária.

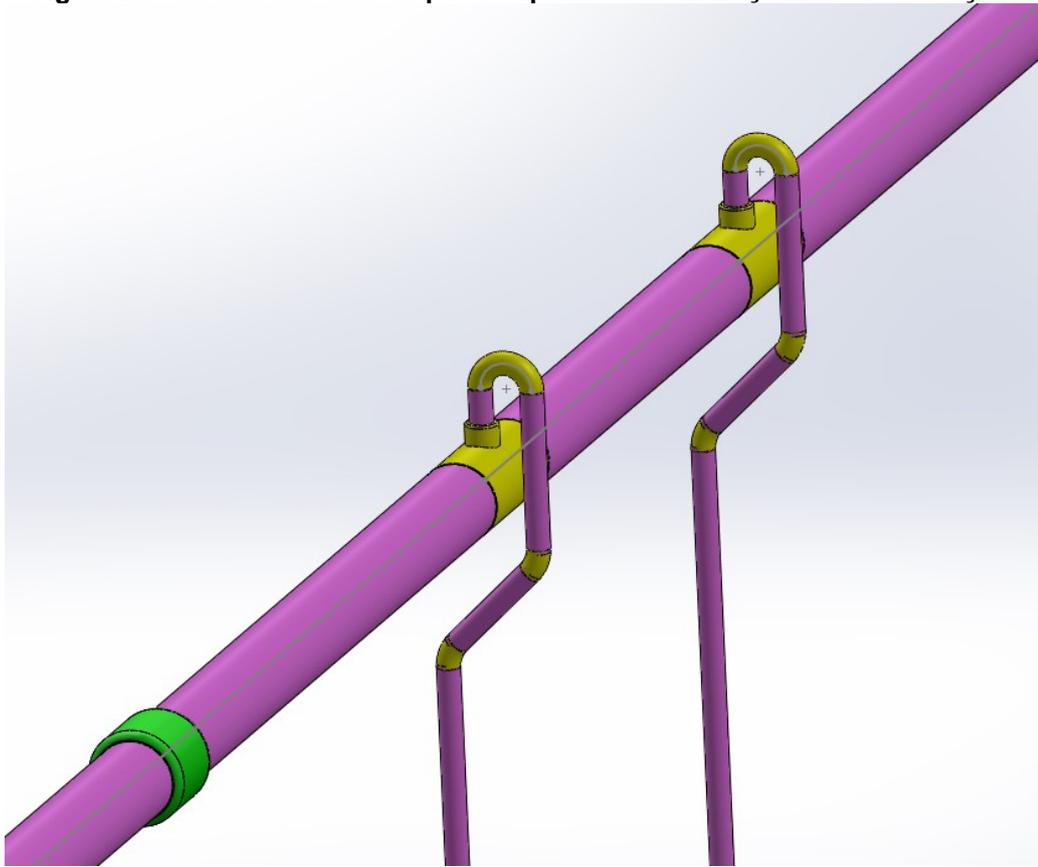


Fonte: Autoria própria, 2018.

#### 4.5.3 Tubulação de alimentação

Conforme mostrado na Figura 21, as tubulações de alimentação foram dimensionadas de acordo com os padrões apresentados, tendo sua saída pela parte superior da tubulação indo até o ponto de consumo, dificultando que condensados presentes na rede, possam ser levados até o equipamento. A imagem faz parte do modelo em CAD construído representando toda a tubulação a ser instalada na planta industrial.

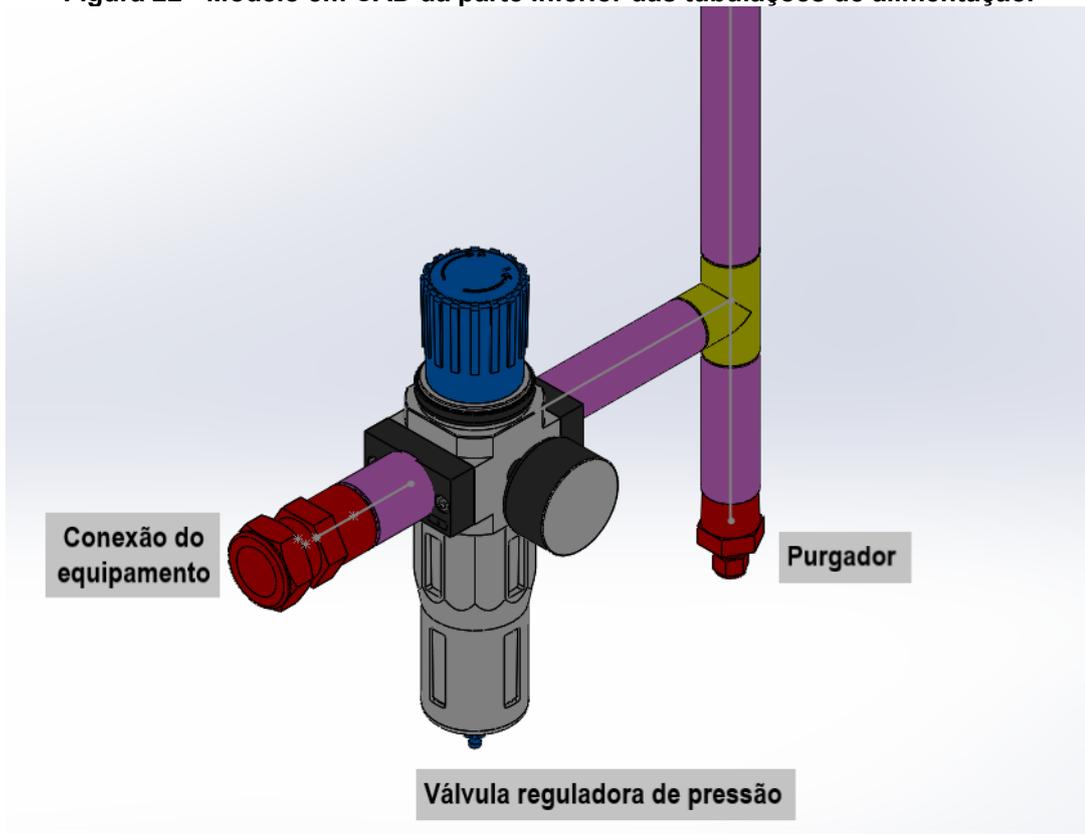
**Figura 21 - Modelo em CAD da parte superior das tubulações de alimentação.**



**Fonte: Autoria própria, 2018.**

Uma representação da parte inferior das tubulações de alimentação é mostrada na Figura 22, que também é parte do modelo em CAD construído para a rede de tubulações. Nela é possível verificar a posição de instalação do purgador, para remover uma possível condensação formada no interior da tubulação, da válvula reguladora de pressão, para adequar a pressão de fornecimento de ar comprimido da rede às necessidades do equipamento e, por fim, um acoplamento onde a tubulação passa a fornecer o ar comprimido para a máquina instalada na indústria. Uma válvula globo deve ser instalada ao longo tubo que liga a parte superior e inferior da tubulação de alimentação, possibilitando uma interrupção rápida do fornecimento de ar comprimido para o equipamento caso seja necessário.

Figura 22 - Modelo em CAD da parte inferior das tubulações de alimentação.



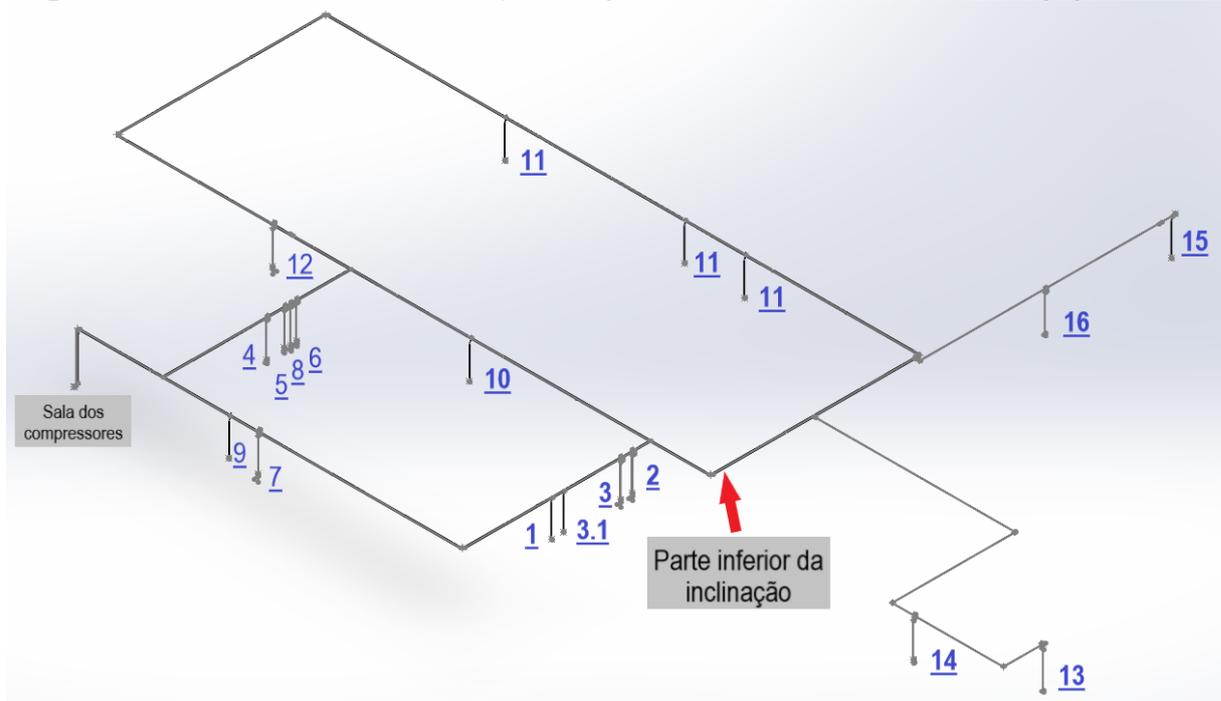
Fonte: Autoria própria, 2018.

Os acessórios apresentados na figura tratam-se apenas de uma representação da forma construtiva dimensionada para parte inferior das tubulações de alimentação, não possuindo referências técnicas, pois os componentes instalados podem variar de acordo com ponto de consumo, isso se deve ao fato de que cada equipamento alimentado pela rede que pode possuir diferentes modelos de acoplamento ou possuir internamente válvulas reguladoras de pressão e purgadores, eliminando a necessidade de implantação destes acessórios na tubulação.

#### 4.5.4 Layout completo

Na Figura 23 é mostrada uma imagem do modelo completo da tubulação, incluindo o anel principal, as tubulações secundárias e todas as tubulações de alimentação, sinalizadas pelos números de referência dos equipamentos conforme descrito na Tabela 1. A rede foi projetada com as tubulações principais e secundárias mantendo uma elevação de 4,5 metros em relação ao piso da indústria.

Figura 23 - Modelo em CAD da tubulação completa, número de referência dos equipamentos.



Fonte: Autoria própria, 2018.

No modelo estão representados todos os acessórios presentes na tubulação, incluindo emendas, válvulas, curvas, tês e demais componentes presentes no sistema de acordo com o dimensionamento, entretanto as elevadas dimensões da rede prejudicam a visualização de tais componentes nas figuras.

De acordo com Topfusión ([201-?]) e parâmetros estabelecidos para o projeto, recomendou-se a instalação de um purgador a cada 30 metros de tubo, para remover líquidos que possam condensar no interior das tubulações principais e secundárias. A rede deve possuir uma inclinação de 2% do comprimento para favorecer a drenagem de condensados, o sentido da inclinação está caracterizado pelo trecho inferior representado na Figura 23.

#### 4.6 AVALIAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS

Para avaliação dos reservatórios, de acordo com Metalplan (2010), para compressores rotativos, verificou-se a necessidade de reservatórios com uma capacidade total mínima de 2.577 litros, conforme cálculos presentes no memorial em anexo.

Uma análise do potencial instalado verificou que a empresa possui atualmente três reservatórios com capacidade de 1.500, 500 e 350 litros, resultando em um armazenamento total de 2.350 litros.

Para atender de forma satisfatória às demandas da empresa, recomenda-se a instalação de mais um reservatório com capacidade de 350 litros, o qual irá suprir às necessidades da indústria garantindo o pleno funcionamento da rede com uma capacidade total de armazenamento de 2.700 litros.

#### 4.7 AVALIAÇÃO DOS COMPRESSORES

Atualmente a empresa conta com três compressores à parafuso instalados na planta, os quais são fabricados pela empresa Chigago Pneumatic.

- Compressor 1: CPVS75/10 (75 hp).
- Compressor 2: CPB30/8 (30 hp).
- Compressor 3: CPC50/8G (50 hp).

De acordo com o Anexo B, pode-se observar que atualmente os compressores dois e três, encontram-se instalados em um ponto distantes do barracão, os quais devem ser transferidos para outro ponto da indústria onde hoje encontra-se instalado o compressor um.

De acordo com os catálogos do fabricante Chigago Pneumatic (2012), os compressores possuem uma capacidade de vazão e uma faixa de pressão de trabalho de aproximadamente:

- Compressor 1: 350 pcm, 4 ~ 10.8 bar
- Compressor 2: 125 pcm, 4 ~ 8 bar.
- Compressor 3: 215 pcm, 4 ~ 8.5 bar.

A pressão de trabalho da rede estipulada pela empresa foi atendida de forma satisfatória, os três equipamentos são capazes de fornecer uma pressão de 8 bar, conforme estabelecido no projeto para o correto funcionamento dos equipamentos, entretanto nota-se uma capacidade máxima vazão de 690 pcm, fornecida pelos três compressores, a qual é inferior a demanda da empresa que atualmente encontra-se próxima a 910 pcm.

Para corrigir problemas de falta de vazão na rede em momentos de elevada demanda de ar comprimido, sugere-se a instalação de um quarto compressor, conforme Chicago Pneumatic CPC (2012), possuindo as seguintes especificações técnicas, ou similar.

- Compressor 4: CPC60/10G (60 hp), 240 pcm, 4 ~ 10 bar.

Desta forma os compressores teriam uma capacidade de vazão total de 930 pcm, atendendo a demanda da rede em pleno funcionamento de todos os equipamentos instalados, conforme estabelecido para o projeto em acordo com a engenharia da empresa.

Um dos compressores, possivelmente o de menor capacidade, pode atuar como um equipamento reserva entrando em funcionamento apenas quando necessário, em situações de elevada demanda de ar ou manutenção onde acontece o desligamento de algum outro compressor.

#### 4.9 SECADORES

O processo industrial presente na fundição exige, em alguns equipamentos, que o ar esteja isento de umidade e condensados, para isso, a empresa conta com alguns equipamentos que realizam a preparação e secagem do ar, atendendo às necessidades e evitando danos e prejuízos aos equipamentos ou processos.

Atualmente o controle de umidade é realizado e poderá ser mantido caso a tubulação seja substituída com a implantação do projeto, eliminando a necessidade de sugestão e implantação de novos secadores.

#### 4.8 LISTA DE COMPONENTES

A Tabela 5 fornece uma lista parcial de componentes da fabricante Topfusión [201-?], a qual tem objetivo de facilitar a aquisição dos itens necessários para implantação do projeto, entretanto, fica a critério da empresa a utilização ou não dos itens descritos, os quais podem sofrer alterações de acordo com a disponibilidade e custo, sendo estes apenas uma referência para as especificações técnicas de cada componente.

Tabela 5 - Lista parcial de componentes, fabricante Topfusión [201-?].

Tubulação	Componente	Código do fabricante	Quantidade
Tubulação do anel principal	Tubo PN-20 Ø 160 mm - 6mts	TU1602006A	34
	Luva 160mm	LU1600A	32
	Joelho 90° 160 mm	JO1600A	7
	TE 160 mm	TE1600A	3
Tubulação de alimentação com diâmetro interno mínimo de 18.8 mm	Tubo PN-20 Ø 25 mm - 3mts	TU252003A	12
	Curva 180° 25 mm	CU250A	9
	Joelho 45° 25 mm	JO255A	18
	TE 25 mm	TE250A	9
	Registro Esfera 25 mm	RES250A	9
Tubulação de alimentação com diâmetro interno mínimo de 36.2 mm	Tubo PN-20 Ø 50 mm - 3mts	TU502003A	7
	Curva 180° 50 mm	-	5
	Joelho 45° 50 mm	JO505A	10
	TE 50 mm	TE500A	5
	Registro Esfera 50 mm	RES500A	5
Tubulação de alimentação com diâmetro interno mínimo de 28.8 mm	Tubo PN-20 Ø 40 mm - 3mts	TU402003A	4
	Curva 180° 40 mm	-	3
	Joelho 45° 40 mm	JO405A	6
	TE 40 mm	TE500A	3
	Registro Esfera 40 mm	RES400A	3
Tubulação secundária equipamentos 13 e 14	Tubo PN-20 Ø 40 mm - 3mts	TU402003A	14
	Luva 40 mm	LU400A	12
	Curva 90° 40 mm	CR400A	3
	CAP 40 mm	CP400A	1
Tubulação secundária equipamentos 15 e 16	Tubo PN-20 Ø 63 mm - 3mts	TU632003A	8
	Curva 90° 63 mm	CR630A	1
	CAP 63 mm	CP630A	1
	Luva 63 mm	LU630A	6

Fonte: Autoria própria, 2018.



## 5 CONCLUSÃO

Buscando um funcionamento eficiente e com baixo custo em processos industriais, instalações com operação baseada em sistemas pneumáticos, têm sido cada dia mais utilizados em empresas de diversos segmentos. Onde o ar comprimido é o agente principal em atuadores que permitem a realização de diversos processos.

O presente trabalho alcançou seus objetivos nas diversas etapas de projeto. Partindo do referencial bibliográfico que forneceu um embasamento teórico a respeito do ar comprimido, suas propriedades, vantagens, desvantagens, aplicações, além de informações a respeito de acessórios, tubulações e seu correto dimensionamento para atender as demandas de pressão e vazão de ar comprimido dos equipamentos instalados na planta industrial. Uma metodologia foi elaborada onde as etapas de projeto e cálculos de dimensionamento, foram sintetizadas em fluxogramas que facilitam e orientam a elaboração do projeto.

O projeto analisou dados de demanda, problemas presentes na rede atual e algumas solicitações e informações fornecidas pela empresa, permitindo a realização de diversas alterações no *layout* da rede, fornecendo a empresa um projeto otimizado que conta com a tubulação dimensionada para atender a demanda de ar comprimido da indústria em regime de plena capacidade.

As tubulações do anel principal, as secundárias e as de alimentação, foram dimensionadas de acordo com a metodologia, que foi elaborada tendo o amparo das referências utilizadas, seguindo o método de cálculo descrito por Fialho (2011). Foi realizada uma consideração de plena demanda de vazão para o dimensionamento, entretanto, sabe-se que os equipamentos não funcionam todos ao mesmo tempo, o que reduz a vazão necessária na rede. Tal consideração confere a tubulação dimensionada uma margem significativa para futuras ampliações, cabendo a empresa a decisão de implantação da rede. A margem de segurança do projeto tende a elevar a vida útil da rede, que pode receber ampliações e garantir o atendimento da demanda de vazão de outros equipamentos, além dos atualmente instalados.

O redimensionamento resultou em uma rede simples que concentrou a tubulação principal próxima aos pontos de maior demanda. Futuras ampliações podem ser instaladas através de tubulações secundárias, atendendo a necessidade em qualquer ponto do espaço físico da indústria e sendo dimensionadas de forma simples, de acordo com a metodologia estabelecida.

O novo *Layout* criado para empresa, juntamente com a lista parcial de componentes, permite que a instalação da tubulação seja realizada de forma simplificada e seguindo os parâmetros do projeto para tubulações e acessórios.

Durante uma apresentação do projeto para o engenheiro mecânico responsável pela empresa, foi possível receber uma avaliação positiva, onde o *layout* da rede foi classificado como ideal, pois atende todos os pontos de consumo e possui uma configuração que concentra a geração de ar comprimido em um ponto próximo a diversos equipamentos. Ampliações podem ser dimensionadas de forma simplificada através da metodologia de cálculos estabelecida. Durante a coleta de dados de demanda de ar comprimido realizada pela empresa, observou uma dificuldade em obter valores precisos a respeito do consumo de ar comprimido dos equipamentos, fazendo com que em diversos pontos fossem realizadas considerações elevadas, resultando em um ponto positivo para o projeto, que possui uma significativa margem de ampliação para futuros equipamentos. Segundo a avaliação realizada, acredita-se que o projeto tem grande chance de execução, pois atende de forma satisfatória os requisitos estabelecidos, solucionando diversos problemas que ocorrem atualmente na rede pneumática da empresa e prejudicam a produção da indústria.

Como sugestão de trabalhos futuros, deve-se avaliar a posição dos reservatórios, que podem ser estrategicamente escolhidas, avaliando os equipamentos com maior demanda e instalando em pontos próximos um reservatório de pequeno porte, gerando um pequeno pulmão e garantindo o funcionamento em momentos de elevada demanda. O ruído gerado pelos compressores após avaliado, se necessário, deve ser corrigido isolando acusticamente a sala onde serão instalados para evitar problemas de ruído excessivo em postos de trabalho próximos.

## REFERÊNCIAS

BOSCH. **Tecnologia de Ar Comprimido**. Campinas, 2008.

CHCAGO PNEUMATIC, **Compressores COM - CPA - CPB**. Barueri, 2012.

CHCAGO PNEUMATIC, **CPC**. Barueri, 2012.

CHCAGO PNEUMATIC, **CPVS 40 - 120**. Barueri, 2012.

ELETROBRÁS. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**. Rio de Janeiro, 2005.

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

GOOGLE MAPS, Imagem de satélite, disponível em: <  
<https://www.google.com.br/maps/place/Paran%C3%A1/@-24.6003385,-53.5655366,833057m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x94db0b9430b8629d:0xe893fd5063cef061!8m2!3d-25.2520888!4d-52.0215415>>. Acessado em 06 de abril de 2018.

KARMOUCHE, Andrea Romero. **Análise da eficiência energética em compressores a pistão em sistemas de ar comprimido**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

METALPLAN. **Manual de ar comprimido**. 4<sup>a</sup> ed. 2010.

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

PARKER TRAINING. **Catálogo 1001-8 BR - Válvulas pneumáticas e terminais de válvulas**. Jacareí, [2006?].

PAVANI, Sergio Adalberto. **Comandos Pneumáticos e Hidráulicos**. Santa Maria, 2011.

PROCEL INDUSTRIA. **Compressores - Guia Básico**. Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, Emílio Carlos Nélli. **Apostila de Pneumática**. São Paulo, 2002.

TELLES, Pedro Carlos da Silva, **Tubulações Industriais - Materiais, Projeto, Montagem**. 10ª ed. São Paulo, 2001.

TOPFUSIÓN. **PPCR (Polipropileno Copolímero Random)**. Araquari, [201-?].

## ANEXO A – Comprimento de tubos equivalente a perda de carga por singularidades

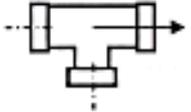
Conexões		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
 90° Cotovelo comum	ROSQ.	1,1	1,34	1,58	2	2,25	2,6	2,8
	FLAN.	0,30	0,37	0,50	0,62	0,73	0,95	1,1
		Diâmetro Nominal (in)						
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
	ROSQ.	3,4	3,7	4,0	-	-	-	-
	FLAN.	1,3	1,55	1,8	2,2	2,7	3,7	4,3

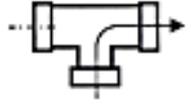
Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
 Curva 90° raio longo	ROSQ.	0,67	0,70	0,83	0,98	1,0	1,1	1,1
	FLAN.	0,33	0,40	0,49	0,61	0,70	0,83	0,88
		Diâmetro Nominal (in)						
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
	ROSQ.	1,2	1,3	1,4	-	-	-	-
	FLAN.	1,0	1,15	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4

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

Fonte: Fialho, 2006, p. 290.

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) <sup>1</sup>						
		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

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
 <p>Válvula globo</p>	ROSQ.	6,7	7,3	8,8	11,3	12,8	16,5	18,9
	FLAN.	11,6	12,2	13,7	16,5	18,0	21,4	23,5
		Diâmetro Nominal (in)						
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
	ROSQ.	24,0	27,25	33,5	-	-	-	-
	FLAN.	28,7	32,65	36,6	45,7	47,9	49,3	94,5

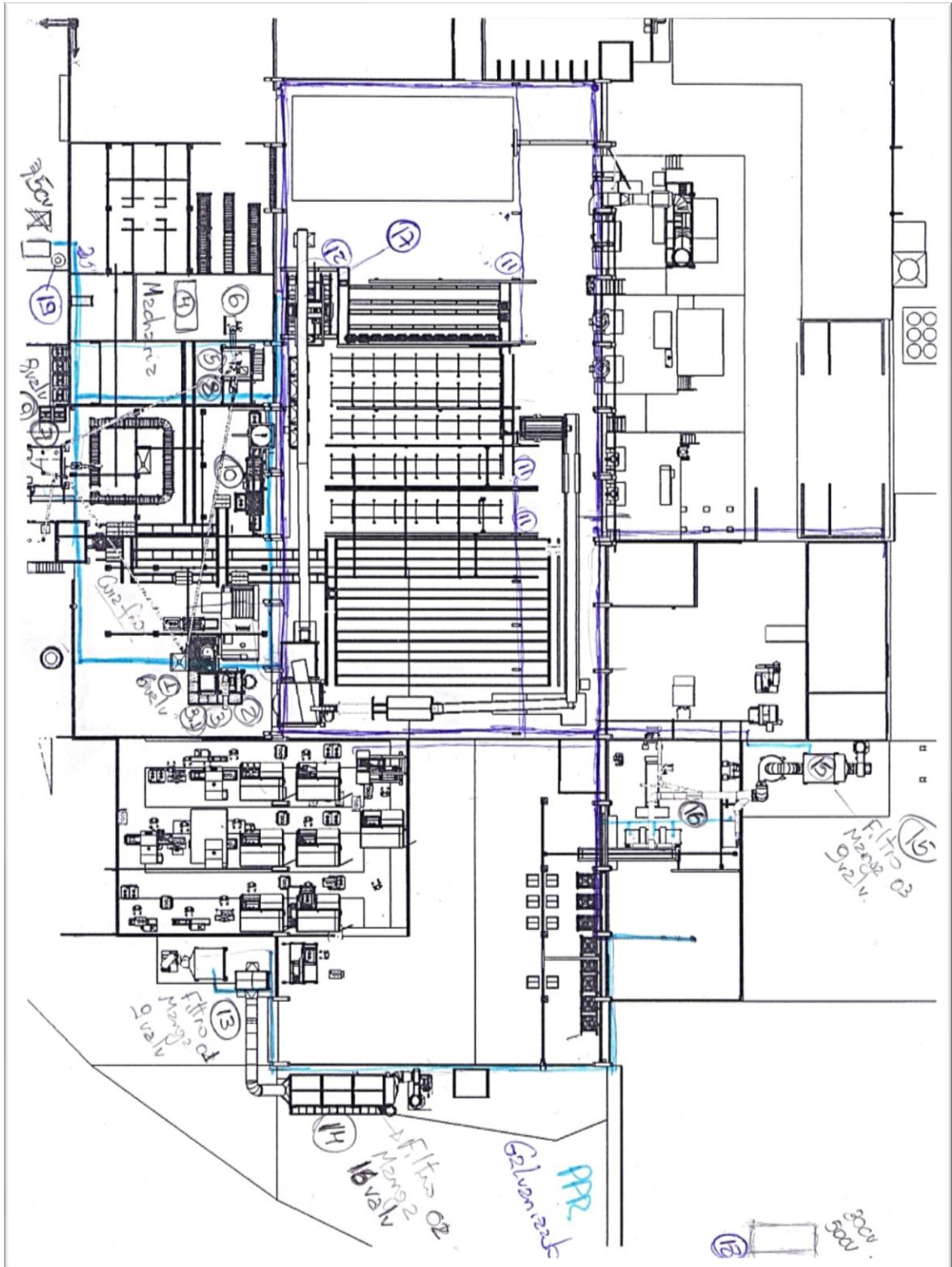
Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
 Válvula angular	ROSQ.	4,6	4,6	5,2	5,5	5,5	5,55	5,55
	FLAN.	4,6	4,6	5,2	5,5	5,5	6,4	6,7
		Diâmetro Nominal (in)						
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
	ROSQ.	5,55	5,55	5,55	-	-	-	-
	FLAN.	8,5	10,05	11,6	15,2	19,2	27,4	36,6

Conexão		Diâmetro Nominal (in)						
		1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2
Válvula Retenção Portinhola	ROSQ.	2,4	2,7	3,4	4,0	4,6	5,8	6,7
	FLAN.	1,2	1,6	2,2	3,0	3,7	5,2	6,4
		Diâmetro Nominal (in)						
		3	3.1/2	4	5	6	8	10
	ROSQ.	8,2	9,7	11,6	-	-	-	-
	FLAN.	8,3	9,6	11,6	15,2	19,2	27,4	36,6

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

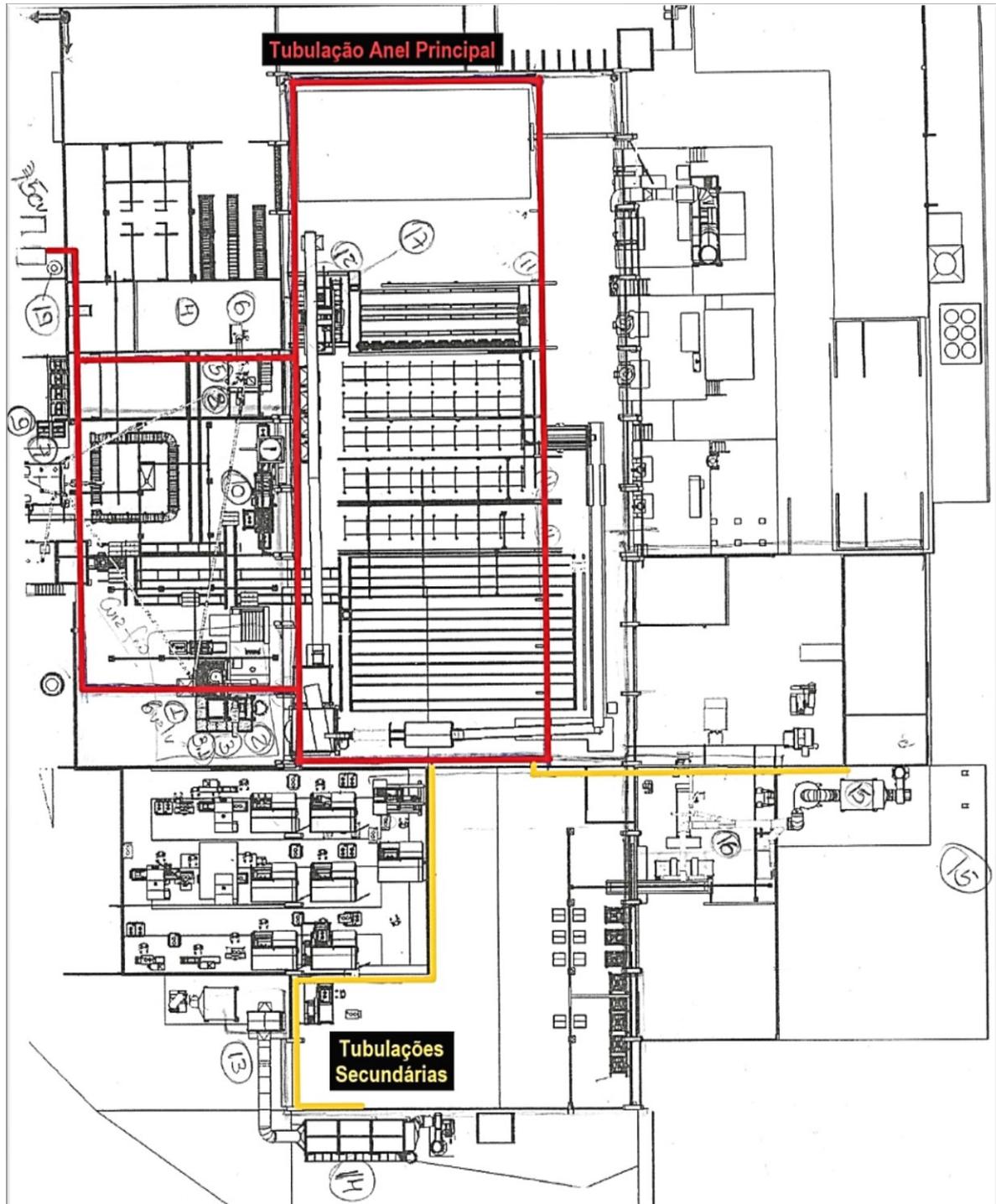
Fonte: Fialho, 2006, p. 292.

**ANEXO B – Layout da indústria fornecido com traçado da tubulação original.**



Fonte: *Layout* fornecido pela empresa, 2017.

**ANEXO C – Definição inicial do *Layout* planejado para tubulação principal e secundárias.**



Fonte: Adaptado do *Layout* fornecido pela empresa, 2018.

**APÊNDICE A – Entrevista realizada com o Engenheiro responsável pela  
empresa respondida por e-mail**

**- Quais os principais problemas de funcionamento observados na rede pneumática da empresa?**

O principal problema é a queda de pressão em determinados equipamentos.

**- Qual a pressão ideal de trabalho da rede para o pleno funcionamento dos equipamentos? (Aproximadamente)**

A pressão deve estar acima de 6,5bar, em torno de 7bar.

**- Abaixo de que valores de pressão, observados nos compressores, o sistema apresenta falhas de funcionamento? (Aproximadamente)**

Alguns equipamentos possuem pressostatos ajustados em 6,5bar, abaixo disso o equipamento para, gerando perdas de produção.

**- Referente a vazão de ar comprimido da empresa (medida em pcm). Pode-se considerar para o dimensionamento da tubulação o valor total obtido pela planilha de demanda fornecida pela empresa (aproximadamente 910 pcm) garantindo o funcionamento pleno da rede independente de fatores de uso de determinados equipamentos?**

Sim, este valor de 910 pcm, acredito que já esteja superdimensionado.

**- Referente a parte da tubulação atualmente instalada na indústria utilizando tubos em PPR, deve-se considerar como um pré-requisito de projeto a preservação da tubulação?**

Acredito que para o projeto não, acredito que a melhor forma seja desenvolver o projeto como um todo, considerando condições ideais, o que ficaria a critério de decisão, seria a execução ou não do projeto, podendo ser executado de forma parcial, em um primeiro momento, substituindo a tubulação antiga e posteriormente, em um segundo momento, substituindo a tubulação “nova”.

**- Quanto ao ponto de instalação dos compressores e reservatórios, é possível uma alteração no local de instalação, ou seja, a transferência dos equipamentos para outro ponto da indústria?**

Sim, isso é possível e acredito que seria o melhor caminho, construindo novamente uma casa de máquinas, centralizando toda a geração de ar comprimido da empresa.

## APÊNDICE B – Memorial de cálculos

Memorial de cálculos		
Consumo total de ar comprimido (pcm=cfm)		
$Q1 := 7 \text{ cfm}$	$Q6 := 40 \text{ cfm}$	$Q12 := 100 \text{ cfm}$
$Q2 := 140 \text{ cfm}$	$Q7 := 140 \text{ cfm}$	$Q13 := 10.5 \text{ cfm}$
$Q3 := 140 \text{ cfm}$	$Q8 := 10 \text{ cfm}$	$Q14 := 18.6 \text{ cfm}$
$Q3.1 := 16.5 \text{ cfm}$	$Q9 := 9.3 \text{ cfm}$	$Q15 := 10.5 \text{ cfm}$
$Q4 := 80 \text{ cfm}$	$Q10 := 12.6 \text{ cfm}$	$Q16 := 129 \text{ cfm}$
$Q5 := 46 \text{ cfm}$	$Q11 := 0 \text{ cfm}$	
$Q_T := Q1 + Q2 + Q3 + Q3.1 + Q4 + Q5 + Q6 + Q7 + Q8 + Q9 + Q10 + Q11 + Q12 + Q13 + Q14 + Q15 + Q16$		
$Q_T = 910 \text{ cfm}$		
$Q_T = (1.546 \cdot 10^3) \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$		
$Q_T := 1546 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$		
Pressão de trabalho mínima da rede:		
$P_{TR} := 8 \text{ bar}$		
Queda de pressão máxima da linha, de acordo com Metalplan (2010):		
$\Delta P := 0.3 \text{ bar}$		
Verificação do diâmetro interno da tubulação instalada no anel principal		
Comprimento total instalado (Aproximadamente):		
$L_{inst} := 435 \text{ m}$		
Diâmetro mínimo necessário:		
$d_{inst} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_T^{1.85} \cdot L_{inst}}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 119.092$		
$d_{inst} := 119.092 \text{ mm} = 4.689 \text{ in}$		
Portanto a verificação mostra que não é possível aproveitar parte da rede existente substituindo apenas a tubulação metálica, tendo em vista que a parte da tubulação que deveria ser preservada tem no máximo 2.5" de diâmetro.		
Pode-se estimar a queda de pressão aproximada presente na tubulação atual, considerando uma tubulação de 3", onde:		
$d_{inst} := 76.2 \text{ mm}$		
$\Delta P_{aprox} := \left( \frac{(1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_T^{1.85} \cdot L_{inst})}{\left(\frac{d_{inst}}{10}\right)^5 \cdot P_{TR}} \right) = 2.797$		
$\Delta P_{aprox} := 2.79 \text{ bar}$		

### Redimensionamento da rede

Será sugerida a instalação de uma rede nova de acordo com o layout mostrado no Anexo C, com o seguinte dimensionamento:

Comprimento retílinio aproximado da linha principal:

$$L_1 := 202 \text{ m}$$

O diâmetro interno mínimo estimado para a tubulação:

$$d_1 := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_T^{1.85} \cdot L_1}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 102.154$$

$$d_1 := 102.154 \text{ mm} = 4.022 \text{ in}$$

Comprimento característico dos acessórios considerando uma tubulação de 4.0":

- 3 Tês 4,0", fluxo pelo ramal, rosqueados;
- 17 Tês 4,0", fluxo em linha, rosqueados;
- 7 Curvas 90° raio longo, rosqueados;
- 15 Válvulas Gaveta rosqueadas.

$$L_2 := (3 \cdot 6.4) + (17 \cdot 5.2) + (7 \cdot 1.4) + (15 \cdot 0.76) = 128.8 \text{ m}$$

Comprimento total da linha:

$$L := L_1 + L_2 = 330.8 \text{ m}$$

Verificação do diâmetro interno mínimo da tubulação:

$$d_f := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_T^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 112.745$$

$$d_f := 112.745 \text{ mm} = 4.439 \text{ in}$$

De acordo com a primeira verificação realizada o diâmetro interno mínimo encontrado foi acima de 4", portanto uma segunda verificação é necessária para verificar os cálculos realizados. De acordo com as tabelas do Anexo A, fornecidas por Fialho (2011), será realizada uma verificação para uma tubulação de 5", onde alguns acessórios serão alterados devido ao diâmetro da tubulação.

Comprimento característico dos acessórios considerando uma tubulação de 5.0":

- 3 Tês 4,0", fluxo pelo ramal, flangeados;
- 17 Tês 4,0", fluxo em linha, flangeados;
- 7 Curvas 90° raio longo, flangeadas;
- 15 Válvulas Gaveta, flangeadas.

$$L_2 := (3 \cdot 4.6) + (17 \cdot 1) + (7 \cdot 1.5) + (15 \cdot 0.95) = 55.55 \text{ m}$$

Comprimento total da linha:

$$L := L_1 + L_2 = 257.55 \text{ m}$$

Verificação do diâmetro interno mínimo da tubulação:

$$d_f := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_T^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 107.24$$

$$d_f := 107.24 \text{ mm} = 4.222 \text{ in}$$

Portanto verificou-se que a tubulação ideal para a rede deve ter um diâmetro interno mínimo de 4.4", pois os cálculos de verificação para ambos os casos, 4" e 5", resultaram em diâmetros internos mínimos inferiores.

De acordo com o catálogo da fabricante TOPFUSIÓN (200-), será utilizado um tubo com diâmetro interno de 116.2 mm equivalente a 4.57 in, o qual é superior as duas verificações realizadas, atendendo as necessidades e requisitos de projeto e dimensionamento.

### Tubulações secundárias

Para as tubulações secundárias será admitida uma queda de pressão de:

$$\Delta P := 0.3 \text{ bar}$$

Caso 1: Tubulação secundária para os equipamentos 13 e 14:

Demanda de ar comprimido:

$$Q_{13.14} := Q_{13} + Q_{14} = 29.1 \text{ cfm}$$

$$Q_{13.14} = 49.441 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

$$Q_{13.14} := 49.441 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Comprimento retilíneo da tubulação:

$$L_1 := 42 \text{ m}$$

Diâmetro interno mínimo da tubulação:

$$d_{13.14} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{13.14}^{1.85} \cdot L_1}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 20.876$$

$$d_{13.14} := 20.876 \text{ mm} = 0.822 \text{ in}$$

Singularidades presentes na tubulação:

- 1 Tê 1", fluxo pelo ramal, rosqueado;
- 1 Tê 1", fluxo em linha, rosqueado;
- 3 Curvas 90°, raio longo, roqueadas.

$$L_2 := (2) + (0.99) + (3 \cdot 0.83) = 5.48 \text{ m}$$

Comprimento total da linha:

$$L := L_1 + L_2 = 47.48 \text{ m}$$

Verificação do diâmetro interno mínimo da tubulação:

$$d_{13.14} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{13.14}^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 21.394$$

$$d_{13.14} := 21.394 \text{ mm} = 0.842 \text{ in}$$

Caso 2: Tubulação secundária equipamentos 15 e 16:

Demanda de ar comprimido:

$$Q_{15.16} := Q_{15} + Q_{16} = 139.5 \text{ cfm}$$

$$Q_{15.16} = 237.012 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

$$Q_{15.16} := 237.012 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Comprimento retilíneo da tubulação:

$$L_1 := 21.5 \text{ m}$$

Diâmetro interno mínimo da tubulação:

$$d_{15.16} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{15.16}^{1.85} \cdot L_1}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 32.608$$

$$d_{15.16} := 32.608 \text{ mm} = 1.284 \text{ in}$$

Singularidades da tubulação:

1 Tê 1 1/2", fluxo pelo ramal, rosqueado;

1 Tê 1 1/2", fluxo em linha, rosqueado;

1 Curvas 90°, raio longo, rosqueada.

$$L_2 := (3) + (1.7) + (1) = 5.7 \text{ m}$$

Comprimento total da linha:

$$L := L_1 + L_2 = 27.2 \text{ m}$$

Verificação do diâmetro interno mínimo da tubulação:

$$d_{15.16} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{15.16}^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 34.179$$

$$d_{15.16} := 34.179 \text{ mm} = 1.346 \text{ in}$$

Ambos os casos estão validados, onde a tubulação secundária para os equipamentos 13 e 14 resultou em um diâmetro interno mínimo de 1" e os equipamentos 15 e 16 utilizam uma tubulação secundária com diâmetro interno mínimo de 1 1/2".

#### Tubulações de alimentação

Para as tubulações de alimentação será considerada uma queda de pressão de:

$$\Delta P := 0.3 \text{ bar}$$

O comprimento retilíneo da tubulação secundária será:

$$L := 3.5 \text{ m}$$

Equipamento 1

$$Q_1 = 11.893 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_1 := 11.893 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f1} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_1^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 7.496$$

Equipamento 2

$$Q_2 = 237.862 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_2 := 237.862 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f2} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_2^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 22.711$$

Equipamento 3

$$Q_3 = 237.862 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_3 := 237.862 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f3} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_3^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 22.711$$

Equipamento 3.1

$$Q_{3.1} = 28.034 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_{3.1} := 28.034 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f3.1} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{3.1}^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 10.295$$

Equipamento 4

$$Q_4 = 135.921 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_4 := 135.921 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f4} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_4^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 18.463$$

Equipamento 5

$$Q_5 = 78.154 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_5 := 78.154 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f5} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_5^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 15.045$$

Equipamento 6

$$Q_6 = 67.96 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_6 := 67.96 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f6} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_6^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 14.286$$

Equipamento 7

$$Q_7 = 237.862 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_7 := 237.862 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f7} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_7^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 22.711$$

Equipamento 8

$$Q_8 = 16.99 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_8 := 16.99 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f8} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_8^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 8.554$$

Equipamento 9

$$Q_9 = 15.801 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_9 := 15.801 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f9} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_9^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 8.327$$

Equipamento 10

$$Q_{10} = 21.408 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_{10} := 21.408 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f10} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{10}^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 9.318$$

Equipamento 11

$$Q_{11} = 0 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_{11} := 0 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f11} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{11}^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 0$$

O equipamento 11 possui um consumo extremamente baixo e uma utilização esporádica, portanto será desconsiderada sua demanda e a tubulação instalada será a mesma da menor dimensionada.

Equipamento 12

$$Q_{12} = 169.901 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_{12} := 169.901 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f12} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{12}^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 20.052$$

Equipamento 13

$$Q_{13} = 17.84 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_{13} := 17.84 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f13} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{13}^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 8.71$$

Equipamento 14

$$Q_{14} = 31.602 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_{14} := 31.602 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f14} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{14}^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 10.762$$

Equipamento 15

$$Q_{15} = 17.84 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_{15} := 17.84 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f15} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{15}^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 8.71$$

Equipamento 16

$$Q_{16} = 219.172 \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_{16} := 219.172 \frac{m^3}{hr}$$

$$d_{f16} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{16}^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 22.033$$

#### Verificação tubulação de alimentação

Após o cálculo utilizando apenas o comprimento linear das tubulações de alimentação, será feita a verificação do diâmetro comercial escolhido, de acordo com as tabelas presentes no "Anexo A", para três diâmetros comerciais generalizados de acordo com os resultados obtidos nos cálculos individuais.

O comprimento retilíneo da tubulação secundária será:

$$L_1 := 3.5 \text{ m}$$

Para o cálculo do diâmetro interno mínimo das tubulações de alimentação serão considerados os seguintes acessórios:

- 2 Tês fluxo em ramal;
- 1 Curva de 180°, raio longo, rosqueada;
- 1 Válvula Globo, rosqueada;
- 2 Curvas de 45°.

De acordo com os valores obtidos, serão considerados três diâmetros comerciais de tubos para as tubulações secundárias.

Equipamentos 1, 3.1, 8, 9, 10, 11, 13, 14 e 15 (Demanda $Q_{14}$ ) -	Tubo 3/4"
Equipamentos 4, 5 e 6 (Demanda $Q_4$ ) -	Tubo 1 1/2"
Equipamentos 2, 3, 7, 12 e 16 (Demanda $Q_2$ ) -	Tubo 2"

#### Comprimento característico - Verificação diâmetro interno mínimo

Tubo 3/4"

$$L_2 := (2 \cdot 1.6) + (1.3) + (7.3) + (2 \cdot 0.28) = 12.36 \text{ m}$$

O comprimento total para tubulação secundária será:

$$L := L_1 + L_2 = 15.86 \text{ m}$$

Diâmetro interno mínimo verificado:

$$d_{f0.75} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{14}^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 14.559$$

$$d := 14.559 \text{ mm} = 0.573 \text{ in}$$

Tubo 1 1/2"

$$L_2 := (2 \cdot 3) + (2.3) + (12.8) + (2 \cdot 0.64) = 22.38$$

O comprimento total para tubulação secundária será:

$$L := L_1 + L_2 = 25.88 \text{ m}$$

Diâmetro interno mínimo verificado:

$$d_{f1.5} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_4^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 27.548$$

$$d := 27.548 \text{ mm} = 1.085 \text{ in}$$

Tubo 2"

$$L_2 := (2 \cdot 3.7) + (2.6) + (16.5) + (2 \cdot 0.83) = 28.16$$

O comprimento total para tubulação secundária será:

$$L := L_1 + L_2 = 31.66 \text{ m}$$

Diâmetro interno mínimo verificado:

$$d_{f2} := 10 \cdot \left( \sqrt[5]{\frac{1.663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q_2^{1.85} \cdot L}{\Delta P \cdot P_{TR}}} \right) = 35.279$$

$$d := 35.279 \text{ mm} = 1.389 \text{ in}$$

Verificação dos reservatórios

De acordo com Metalplan (2010), para a vazão total da rede  $Q_T$ , quando gerados por compressores rotativos é necessário uma capacidade de armazenamento conforme descrito nos cálculos.

$$Q_T = 1.546 \cdot 10^3$$

$$Q_T := 1546 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} = 25.767 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$Q_T := 25.767 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

Volume mínimo total para os reservatórios:

$$V_{res} := Q_T \cdot 0.1 = 2.577$$

$$V_{res} := 2.577 \text{ m}^3 = (2.577 \cdot 10^3) \text{ L}$$