

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ÊNIO HENRIQUE PIRES DA SILVA

RAFAEL FERREIRA DE FREITAS

**PROJETO DE UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO COM  
PROGRAMA COMPUTACIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

ÊNIO HERIQUE PIRES DA SILVA  
RAFAEL FERREIRA DE FREITAS

**PROJETO DE UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO COM  
PROGRAMA COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico, do Departamento Acadêmico da Mecânica – DAMEC, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. Me. Luiz Otávio Corrêa.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

Às nossas famílias pelo amor incondicional, carinho e por sempre acreditar em nós.

Aos nossos amigos pelo suporte e companheirismo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos o Professor Me. Luiz Otávio Corrêa pela dedicação e orientação deste trabalho e, por meio dele, nós nos reportamos a toda a comunidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus de Cornélio Procopio, pelo apoio incondicional.

Aos Professores Dr. Adailton Silva Borges e Me. José Aparecido Lopes Junior agradecemos pela confiança e aceitarem fazer parte da nossa banca de avaliação.

A todos os colegas de turma gostaríamos de externar nossa satisfação de podermos compartilhar muitos momentos durante todos esses anos de universidade.

Gostaríamos de deixar registrado também, nosso agradecimento à nossas famílias, pois sem o apoio incondicional deles seria impossível vencer esse desafio.

*Faith is taking the first step even when you don't see the whole staircase. (KING JR, Martin Luther).*

Fé é dar o primeiro passo mesmo quando você não vê toda a escadaria. (KING JR, Martin Luther).

## RESUMO

O presente trabalho visa a otimização da eficiência energética de uma rede de ar comprimido de uma empresa de pequeno porte do norte do Paraná. O objetivo geral do trabalho é a aplicação dos conceitos de eficiência energética, mecânica dos fluidos e pneumática encontrados na literatura para que o sistema de ar comprimido estudado obtenha um melhor desempenho energético. Para a realização do trabalho foi necessário tratar os dados obtidos na empresa, tais como: consumo pneumático dos equipamentos, fator de utilização, singularidades e comprimento das tubulações, e levantar informações presentes na literatura à fim de comparar o sistema estudado com o modelo encontrado na literatura e, assim, otimizá-lo de forma a aumentar sua eficiência energética, ou seja, diminuir a perda de carga, vazamentos e consumo energético, além de otimizar o espaço físico dentro da empresa e facilitar futuras modificações na rede. Juntamente, foram desenvolvidas ferramentas computacionais no *software* Microsoft Excel que auxiliaram nos cálculos necessários durante o desenvolvimento do projeto. Nos resultados estão apresentados o *layout* da rede de ar comprimido recomendado, o material escolhido para as tubulações, o diâmetro calculado para as linhas de distribuição e serviço e os compressores selecionados para alimentar a rede. Conclui-se que o sistema de ar comprimido dimensionado poderá alimentar as máquinas com ar comprimido de melhor qualidade e uma maior eficiência energética.

**Palavras-chave:** Ar comprimido, compressor.

## ABSTRACT

The present work aims to optimize the energy efficiency of a compressed air system from a small company in Northern Paraná. The overall objective is the application of the concepts of energy efficiency, statistics, and fluid mechanics and found in the literature in order to the compressed air system studied get a better energy performance. To carry out the work was necessary to process the data obtained in the company, such as pneumatic equipment consumption, utilization factor, uniqueness and length of the pipes, and to gather information in the literature in order to compare the system studied to the model found in the literature and thus optimize it in order to increase its energy efficiency, in other words, reduce the pressure loss, leakage and energy consumption, while optimizing the physical space in the company and facilitate future modifications in the system. Furthermore, were developed a computational tool on Excel that was used to help with the calculations needed during the development of the project. In the results are shown the recommended layout of the air compressed system, the material chosen for the pipes, the diameter calculated for the distribution and service lines and the selected compressors to feed the system. Concluding that the air compressed system dimensioned can feed the machines with better quality air compressed and energy efficiency.

**Keywords:** Compressed air, compressor.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – COEFICIENTES DE PERDA PARA ESCOAMENTO ATRAVÉS DE MUDANÇA SÚBITA DE ÁREA.....	11
FIGURA 2 – RESISTÊNCIA TOTAL REPRESENTATIVA PARA (A) CURVAS DE 90° EM TUBOS E COTOVELOS FLANGEADOS E (B) CURVAS DE GOMOS OU DE MEIA ESQUADRIA.....	13
FIGURA 3 – TOMADAS NA PARTE SUPERIOR DA TUBULAÇÃO E INCLINAÇÃO NO SENTIDO DO FLUXO.....	16
FIGURA 4 – FUNÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRÃO.....	33
FIGURA 5 – COMPARATIVO DE INVESTIMENTO PARA UMA INSTALAÇÃO.....	37
FIGURA 6 – EXEMPLO DE REDE EM CIRCUITO ABERTO.....	44
FIGURA 7 – NOVA REDE DE AR COMPRIMIDO MODELADA.....	45
FIGURA 8 – DADOS TÉCNICOS DO COMPRESSOR GX 2-11.....	49
FIGURA 9 – DADOS TÉCNICOS DO COMPRESSOR AUTOMAN SÉRIE AT.....	50



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COEFICIENTES DE PERDAS MENORES PARA ENTRADAS DE TUBOS.....	11
TABELA 2 – COEFICIENTES DE PERDA (K) PARA CONTRAÇÕES GRADUAIS: DUTOS CIRCULARES E RETANGULARES.....	12
TABELA 3 – COMPRIMENTOS EQUIVALENTES ADIMENSIONAIS REPRESENTATIVOS PARA VÁLVULAS E ACESSÓRIOS.....	14
TABELA 4 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS TIPOS DE TUBULAÇÃO.....	20
TABELA 5 – VALORES DE AUMENTO POTÊNCIA DEVIDO À VAZAMENTOS.....	25
TABELA 6 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO GENÉRICO.....	27
TABELA 7 – CONSUMO DE AR DOS EQUIPAMENTOS EXISTENTES E FLUXO DE AR TOTAL DO SISTEMA.....	40
TABELA 8 – CONSUMO PNEUMÁTICO DOS EQUIPAMENTOS EXISTENTES.....	45
TABELA 9 – ESCOLHA DO TIPO DE COMPRESSOR.....	48

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>4</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>5</b>
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>6</b>
3.1. OBJETIVOS GERAIS.....	6
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>7</b>
4.1. O AR COMPRIMIDO.....	7
4.2. PERDA DE CARGA.....	8
4.2.1. Cálculo de perda de carga.....	8
4.2.1.1. Perdas maiores: fator atrito.....	8
4.2.1.2. Perdas menores ou localizadas.....	10
4.2.1.2.1. Entradas e saídas.....	10
4.2.1.2.2. Expansões e contrações.....	11
4.2.1.2.3. Curvas em tubos.....	12
4.2.1.2.4. Válvulas e acessórios.....	13
4.3. INSTALAÇÃO EFICIENTE DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO.....	14
4.3.1. Parâmetros da rede de distribuição.....	15
4.3.2. Definição da pressão de trabalho.....	16
4.3.3. Variação da pressão de trabalho.....	17
4.3.4. Cálculo da vazão de ar comprimido.....	17
4.3.5. Cálculo do diâmetro da tubulação.....	18
4.3.6. Seleção do material da tubulação.....	19
4.4. DEFINIÇÃO DE AÇÕES PARA MELHOR APROVEITAMENTO EM UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO.....	20
4.4.1. Definição de um sistema de ar comprimido.....	20
4.4.1.1. Sistema de geração de ar comprimido.....	21
4.4.1.1.1. Seleção do compressor.....	21
4.4.1.1.2. Sistema de compressores múltiplos.....	22
4.4.1.2. Sistema de distribuição de ar comprimido.....	22
4.4.1.3. Sistemas de uso final de ar comprimido.....	23

4.4.2. Oportunidade de melhoria de eficiência em rede de ar comprimido .....	23
4.4.2.1. Redução de eficiência por perda de carga.....	23
4.4.2.2. Redução de eficiência por vazamentos.....	25
4.4.3. Identificação das oportunidades de melhoria.....	26
4.4.3.1. Método genérico.....	26
4.4.4. Análise da aplicação das medidas adotadas para a melhor eficiência do sistema de ar comprimido.....	28
4.4.5. Tratamento do ar comprimido.....	28
4.4.5.1. Filtros de ar comprimido.....	29
4.4.5.1.1. Tipos de filtros.....	30
4.4.5.1.1.1. Queda de pressão nos filtros.....	30
4.4.5.2. Lubrificadores .....	30
4.4.5.3. Secadores.....	31
4.4.5.4. Purgadores .....	31
4.5. MICROSOFT EXCEL NA ENGENHARIA.....	32
4.6. DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	32
4.6.1. A distribuição normal padrão.....	33
4.7. GASTO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	34
<b>5. METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
5.1. COLETA DE DADOS.....	36
5.2. PROJETO DA REDE DE AR COMPRIMIDO.....	36
5.2.1. Seleção do material da tubulação.....	36
5.2.2. Pressão de regime.....	37
5.2.3. Queda de pressão admissível.....	37
5.2.4. Vazão de ar comprimido.....	38
5.3. DETERMINAÇÕES E ESPECIFICAÇÕES DOS COMPRESSORES.....	38
5.3.1. Quantidade de compressores.....	38
5.3.2. Determinação da pressão de trabalho dos compressores.....	39
5.3.3. Determinação da vazão de cada compressor.....	39
5.4. GASTO DE ENERGIA ELÉTRICA DOS COMPRESSORES.....	41
5.5. PROGRAMA COMPUTACIONAL.....	41
<b>6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
6.1. SELEÇÃO DO MATERIAL DA TUBULAÇÃO.....	42

6.2. DEFINIÇÃO DA NOVA REDE DE AR COMPRIMIDO.....	43
6.3. DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES.....	45
6.3.1. Dimensionamento da linha de distribuição.....	46
6.3.2. Dimensionamento da linha de serviço.....	47
6.4. ESCOLHA DOS COMPRESSORES.....	48
6.4.1. Compressor Principal.....	49
6.4.2. Compressor Auxiliar.....	50
6.5. CONSUMO ENERGÉTICO DOS NOVOS COMPRESSORES.....	50
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>51</b>
7.1. CONCLUSÕES.....	51
7.2. TRABALHOS FUTUROS.....	52
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO A – VISTA EM PERSPECTIVA DA REDE DE AR COMPRIMIDO EXISTENTE.....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO B - PLANTA BAIXA DA REDE DE AR COMPRIMIDO.....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXO C - TABELA DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRÃO.....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO D - PROGRAMA COMPUTACIONAL.....</b>	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A concorrência entre as empresas está cada vez mais acirrada nos mais diversos setores. Logo, as empresas precisam sempre buscar maneiras de reduzir seus custos, tanto diretos como indiretos, com o objetivo de ter um produto mais competitivo no mercado e, como consequência, ter um aumento nos seus lucros. Em meio a essa busca, o aumento da eficiência energética de seu sistema de ar comprimido vem como uma possibilidade de redução dos seus custos indiretos para as empresas.

Para dimensionar este sistema de ar comprimido de tal forma a aumentar sua eficiência, deve-se ater à diversos fatores de projeto, tais como perda de carga, diâmetro da tubulação, singularidades, pressão de trabalho e as normas especificadas para o caso (BOSCH, 2008). No dimensionamento, a ferramenta computacional Microsoft Excel auxiliará nos cálculos dos fatores acima citados e para plotar gráficos comparativos entre o modelo antigo e o novo proposto, a fim de identificar quantitativamente o grau de melhoria.

Deste modo, esse trabalho de conclusão de curso consiste em um projeto de um sistema de ar comprimido para uma empresa no norte do Paraná com o intuito de aumentar sua eficiência energética visando a redução de seus custos com energia elétrica, conseqüentemente, contribuindo com o meio ambiente através da redução de seu consumo energético e, similarmente, criando uma imagem sustentável que pode ser explorada pela empresa. Para isso foram utilizadas as seguintes ferramentas: *brainstorming*, comparação do sistema estudado com a teoria existente na literatura e um programa computacional com objetivo de auxiliar nos cálculos de dimensionamento da rede de ar comprimido (perda de carga, diâmetro ideal, vazão requerida e pressão de trabalho) e na escolha de quantos e quais compressores devem ser utilizados.

## 2. JUSTIFICATIVA

Através da melhora do aproveitamento energético em um sistema de ar comprimido é possível reduzir consideravelmente os custos com energia elétrica de uma fábrica, tornando assim seu produto mais competitivo no mercado.

O projeto aborda um caso de uma empresa não satisfeita com gastos em energia elétrica, oriundos do excessivo uso do compressor do sistema, as alternativas para a diminuição destes gastos resultarão na economia de dinheiro sem um alto investimento.

Portanto, o projeto apontará soluções aplicáveis para o aumento da eficiência energética desse sistema de ar comprimido, com base em estudo teórico, comparação com a bibliografia e cálculos computacionais.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho é a aplicação da teoria de eficiência energética em redes de ar comprimido, estatística e mecânica dos fluidos para melhorar o desempenho energético em um caso de ineficiência em uma empresa.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir os objetivos deve-se:

- Estudar a literatura de eficiência energética e redes de ar comprimido, utilizando-as para analisar o sistema estudado;
- Propor melhorias para o sistema estudado com base nos conteúdos encontrados na literatura;
- Usar um programa computacional (Microsoft Excel) para auxiliar no projeto de melhoria da rede de ar comprimido estudada;
- Propor uma nova rede de ar comprimido dimensionada com base no *layout* e nos equipamentos da empresa estudada;
- Estimar a eficiência do novo *layout* proposto, com gastos por hora dos novos compressores.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o melhor dimensionamento de uma rede de ar comprimido é necessário ater-se aos diversos fatores que podem prejudicar o desempenho energético da rede. Esses podem variar de erros de dimensionamento à não conformidades com normas que auxiliam no projeto e na instalação da rede (ROCHA, 2005).

Dados relacionados ao dimensionamento da rede que podem estar mal projetados nas instalações de ar comprimido estão relacionados aos diâmetros das tubulações, a grande queda de pressão por perda de carga e a incapacidade do compressor de suprir a vazão de ar comprimido requerida pela rede (BOSCH, 2008).

Não conformidades com a literatura estão atreladas às condições de serviço, elas determinam o tipo de sistema (anel ou galhos) e o material dos tubos (aço galvanizado, aço inox, aço preto ou alumínio) (BOSCH, 2008).

As normas de instalação da rede e perda de carga serão mais detalhadas adiante.

### 4.1. O AR COMPRIMIDO

Ar comprimido é ar atmosférico pressurizado. Ele é condutor de energia térmica e fluxo de energia, pode ser armazenado e transportado por tubulações, assim como executa trabalhos através da conversão de energia em motores e cilindros.

As características físicas de desempenho do ar comprimido são determinadas pela temperatura, volume, pressão, volume do fluxo e características do fluxo (BOSCH, 2008). Além disso, o tratamento desse ar também influencia no seu desempenho, um tratamento adequado proporciona um aumento na produtividade, diminuição dos custos de manutenção, além de aumentar a vida útil dos equipamentos e dispositivos pneumáticos.



## 4.2. PERDA DE CARGA

Todos os escoamentos reais em dutos têm atrito. Por exemplo, em um duto horizontal de área constante o efeito do atrito será de diminuir a pressão, causando uma “perda” de pressão comparada com o ideal, caso do escoamento sem atrito. Para simplificar a análise, a “perda” de pressão será dividida em perdas maiores (causadas pelo atrito em trechos do sistema de área constante) e perdas menores (resultantes do escoamento através de válvulas, tês, cotovelos e efeitos de atrito em outros trechos do sistema de área transversal variada) (FOX, 2006).

### 4.2.1. Cálculo de perda de carga

A perda de carga total ( $h_{IT}$ ) é considerada como a soma das perdas maiores ( $h_l$ ) causadas por efeitos de atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante, com as perdas localizadas ( $h_{lm}$ ) causadas por entradas, acessórios, variações de área e outras (FOX, 2006).

#### 4.2.1.1. Perdas maiores: fator atrito

Para um escoamento completamente desenvolvido em um tubo de área constante, a equação para a perda de carga maior é (FOX, 2006)

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = g(z_2 - z_1) + h_l \quad (1)$$

Se o tubo é horizontal,

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = h_l \quad (2)$$

No escoamento turbulento deve-se avaliar a queda de pressão a partir de resultados experimentais e utilizar a análise dimensional para correlacioná-los. A experiência mostra que, no escoamento turbulento completamente desenvolvido, a queda de pressão causada por atrito em um tubo horizontal de área constante, depende do diâmetro, do comprimento, da rugosidade do tubo, da velocidade média do escoamento, da massa específica e da viscosidade do fluido (FOX, 2006). Logo, a equação para a perda de carga por atrito ( $h_l$ ). para um escoamento turbulento é definida por

$$h_l = f \frac{L \bar{V}^2}{D} \quad (3)$$

Ou

$$H_l = f \frac{L \bar{V}^2}{D 2g} \quad (4)$$

O fator de atrito ( $f$ ) pode ser determinado, para escoamentos turbulentos, a partir da expressão de Colebrook (FOX, 2006):

$$\frac{1}{f^{0,5}} = -2,0 \log \left( \frac{\frac{e}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re f^{0,5}} \right) \quad (5)$$

Em que, o valor da rugosidade é representado por  $e$  .

#### 4.2.1.2. Perdas menores ou localizadas

O escoamento em uma tubulação pode exigir a passagem do fluido através de uma variedade de acessórios, curvas ou mudanças súbitas de área. Perdas de carga adicionais são encontradas, sobretudo, como resultado da separação do escoamento (A energia é eventualmente dissipada por forte mistura nas zonas separadas.). Estas perdas são relativamente menores, se o sistema incluir longos trechos retos de tubo de seção constante. Dependendo do dispositivo, as perdas de carga menores ( $h_{lm}$ ) tradicionalmente são calculadas de duas formas, quais sejam (FOX, 2006):

$$h_{lm} = K \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (61)$$

Onde o coeficiente de perda ( $K$ ) deve ser determinado experimentalmente para cada situação.

Ou,

$$h_{lm} = f \frac{L_e}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (7)$$


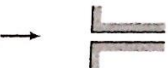

Onde  $L_e$  é o comprimento equivalente de um tubo reto.

##### 4.2.1.2.1. Entradas e saídas

Uma entrada mal projetada de um tubo pode causar uma perda de carga apreciável. Se a entrada tiver cantos vivos, a separação do escoamento ocorre nas quinas e a *vena contracta* (veia contraída) é formada. O fluido deve acelerar-se localmente para passar através da área reduzida de escoamento na *vena contracta*. Perdas de energia mecânica resultam da mistura não confinada, quando a corrente fluida desacelera para preencher novamente o tubo. A tabela

1 mostra três geometrias básicas de entrada e seus devidos coeficientes de perda (FOX, 2006).

**Tabela 1 - Coeficientes de Perdas Menores para Entradas de Tubos**

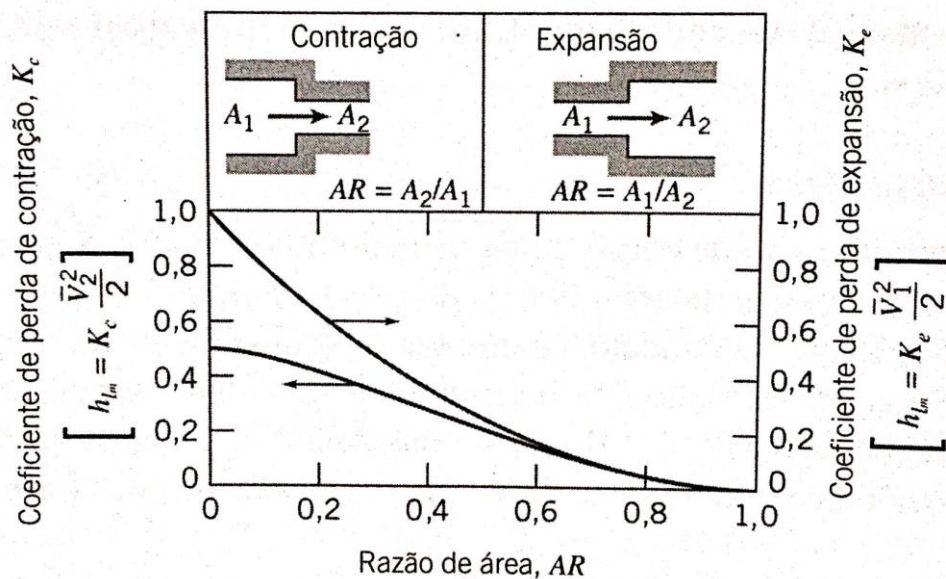
Tipo de Entrada		Coeficiente de Perda Localizada, $K^a$								
Reentrante		0,78								
Borda viva		0,5								
Arredondado		<table border="1"> <tr> <td><math>r/D</math></td> <td>0,02</td> <td>0,06</td> <td><math>\geq 0,15</math></td> </tr> <tr> <td><math>K</math></td> <td>0,28</td> <td>0,15</td> <td>0,04</td> </tr> </table>	$r/D$	0,02	0,06	$\geq 0,15$	$K$	0,28	0,15	0,04
$r/D$	0,02	0,06	$\geq 0,15$							
$K$	0,28	0,15	0,04							

<sup>a</sup> Baseado em  $h_{l_m} = K(\bar{V}^2/2)$ , onde  $\bar{V}$  é a velocidade média no tubo.

Fonte: FOX (2006, p.354).

#### 4.2.1.2.2. Expansões e contrações

Os coeficientes de perda menor para expansões e contrações súbitas em dutos circulares são dados na figura 1.

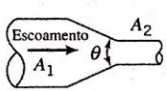


**Figura 1- Coeficientes de perda para escoamento através de mudança súbita de área.**

Fonte: FOX (2006, p. 354).

As perdas causadas por variação de área podem ser reduzidas um pouco com a instalação de um bocal ou difusor entre as duas seções de tubo reto. Dados bocais são apresentados na tabela 2.

**Tabela 2 - Coeficientes de Perda (K) para Contrações Graduais: Dutos Circulares e Retangulares**



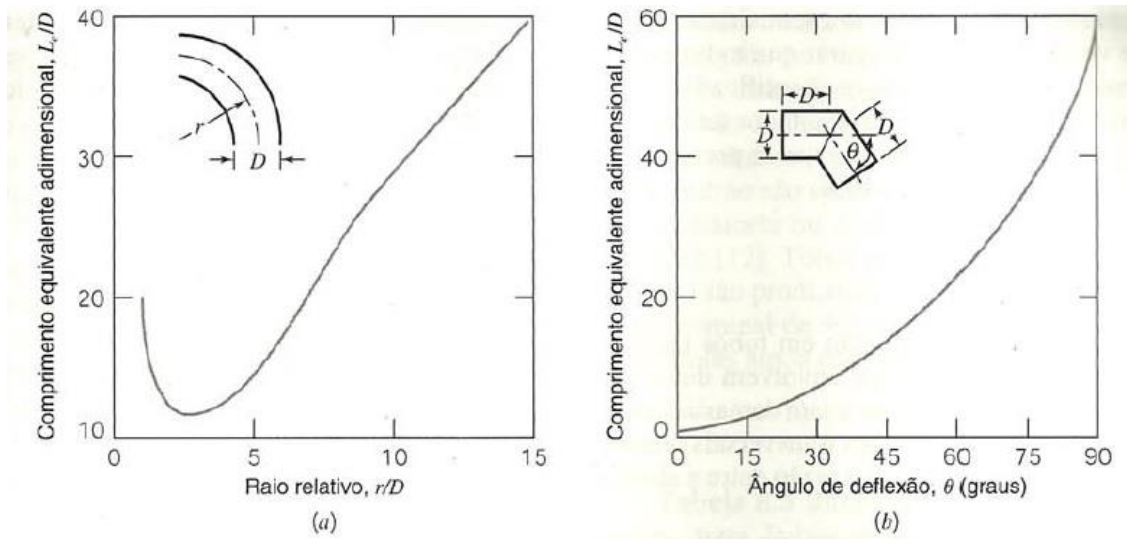
$A_2/A_1$	Ângulo Incluso, $\theta$ , Graus						
	10	15-40	50-60	90	120	150	180
0,50	0,05	0,05	0,06	0,12	0,18	0,24	0,26
0,25	0,05	0,04	0,07	0,17	0,27	0,35	0,41
0,10	0,05	0,05	0,08	0,19	0,29	0,37	0,43

Nota: Os coeficientes são baseados em  $h_{l_m} = K(\bar{V}_2^2/2)$ .

Fonte: FOX (2006, p. 355).

#### 4.2.1.2.3. Curvas em tubos

A perda de carga em uma curva de tubo é maior do que aquela para escoamento completamente desenvolvido em um trecho reto de tubo de igual comprimento. A perda adicional é de maneira mais conveniente por um comprimento equivalente de tubo reto. O comprimento equivalente depende do raio de curvatura relativo da curva, conforme mostra a figura 2 (FOX, 2006).



**Figura 2 - Resistência total representativa para (a) curvas de 90° em tubos e cotovelos flangeados e (b) curvas de gomos ou de meia esquadria.**

Fonte: FOX (2006, p. 357).

#### 4.2.1.2.4. Válvulas e acessórios

As perdas em escoamentos através de válvulas e acessórios também podem ser expressas em termos de um comprimento equivalente de tubo reto. Alguns dados representativos são apresentados na Tabela 3 (FOX, 2006).

Todas as resistências são dadas para válvulas totalmente abertas; as perdas aumentam muito quando as válvulas estão parcialmente abertas. O projeto de válvulas varia significativamente entre fabricantes (FOX, 2006).

Os acessórios de uma tubulação podem ter conexões rosqueadas, flangeadas ou soldadas. Para pequenos diâmetros, as junções rosqueadas são mais comuns; tubulações de grandes diâmetros geralmente têm conexões flangeadas ou soldadas (FOX, 2006).

**Tabela 3 - Comprimentos Equivalentes Adimensionais Representativos para Válvulas e Acessórios**

<b>Tipo de Acessório</b>	<b>Comprimento Equivalente,<sup>a</sup> <i>L<sub>e</sub>/D</i></b>
Válvulas (completamente abertas)	
Válvula gaveta	8
Válvula globo	340
Válvula angular	150
Válvula de esfera	3
Válvula de retenção: tipo globo	600
: tipo angular	55
Válvula de pé com crivo: disco guiado	420
: disco articulado	75
Cotovelo padrão: 90°	30
: 45°	16
Curva de retorno (180°), configuração curta	50
Tê padrão : escoamento principal	20
: escoamento lateral	60

<sup>a</sup> Baseado em  $h_{L_e} = f \frac{L_e}{D} \frac{\bar{V}^2}{2}$ .

**Fonte: FOX (2006, p. 357).**

Embora as perdas discutidas nesta seção sejam denominadas “perdas menores”, elas podem representar uma grande parcela da perda total do sistema, notadamente em tubulações curtas (FOX, 2006).

#### 4.3. INSTALAÇÃO EFICIENTE DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

Para a instalação eficiente do sistema, deve-se levar em consideração vários fatores do projeto da planta da empresa. Pode-se obter uma grande economia com diferentes compressores de diferentes vazões em pontos distintos dentro da planta, de acordo com a necessidade de cada local. Uma outra alternativa é a adesão de válvulas redutoras, ou até mesmo um outro reservatório para locais que exigem uma vazão muito grande de ar comprimido (ROCHA, 2005).

#### 4.3.1. Parâmetros da rede de distribuição

Para planejar e instalar uma rede de distribuição de ar comprimido, devem-se observar alguns pontos importantes:

- Identificar e localizar os principais pontos de consumo na fábrica.
- Calcular o diâmetro das tubulações mestras e secundárias para abastecer a fábrica (ROCHA, 2005).

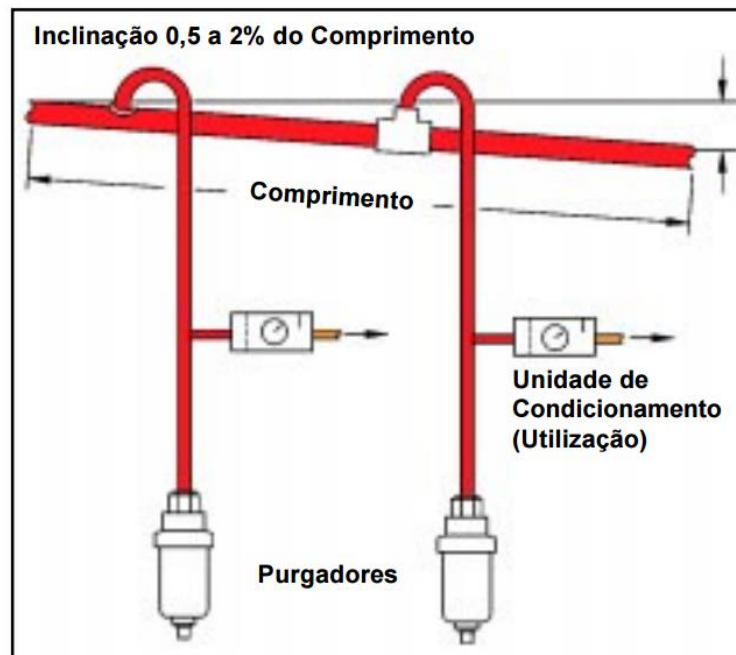
Preferencialmente, devem-se utilizar tubulações de aço (galvanizado, inox ou preto) ou então alumínio (ROCHA, 2005).

As válvulas devem ter passagem plena e as curvas a serem usadas devem ser de raio longo para a diminuição de perda de carga. (ROCHA, 2005)

As redes de alimentação devem ser aéreas ou, no caso de impossibilidade, devem ser colocadas em valetas no chão, com tampas de metal ou concreto. É necessária também uma inclinação no sentido do fluxo de 0,5% até 1,0% (ROCHA, 2005).

Todas as tomadas das redes secundárias e de alimentação das máquinas devem ser executadas pela parte superior da tubulação (ROCHA, 2005).





**Figura 3 - Tomadas na parte superior da tubulação e inclinação no sentido do fluxo.**

Fonte: Parker Hannifin (2000, p. 23).

#### 4.3.2. Definição da pressão de trabalho

A pressão de trabalho é definida pela pressão de trabalho dos equipamentos na linha de distribuição mais a pressão que é perdida devida a perda de carga desde o início da rede.

A melhor pressão para a rede deve ser a menor e que permita a operação de todos os itens sem perda de performance. Portanto o ideal é o posicionamento próximo de itens que demandam a mesma quantidade de ar comprimido e que possuam a mesma pressão de trabalho (ROCHA, 2005).

A pressão ideal pode ser expressa pela fórmula (ROCHA,2005):

$$p = \text{máximo} \left[ \sum_i^n (p_i + h_{pT}) \right] \quad (8)$$

Onde,

$p$  = Pressão de ajuste dos compressores;

$p_i$  = Pressão de operação de cada equipamento;

$h_{pT}$  = Perda de carga entre o compressor e cada equipamento.

Na indústria é comum adotar como pressão de trabalho a de 6 kgf/cm<sup>2</sup> (pressão considerada como sendo econômica), enquanto a pressão de regime gira em torno de 7 e 8 kgf/cm<sup>2</sup>, podendo chegar até a 12 kgf/cm<sup>2</sup> (FIALHO, 2009).

#### 4.3.3. Variação da pressão de trabalho

Alguns equipamentos possuem seu rendimento de trabalho exclusivamente ligado a pressão, uma vez que a vazão exigida pelo equipamento é muito baixa. Para esses equipamentos é aconselhada a adesão de um compressor secundário que atenda a pressão requerida, porém sendo acionado com uma frequência muito mais baixa que o compressor principal, economizando energia (ROCHA, 2005).

#### 4.3.4. Cálculo da vazão de ar comprimido

A vazão de ar comprimido, bem como a pressão do sistema são os principais fatores no projeto do sistema de ar comprimido (ROCHA, 2005).

Para o cálculo da vazão ideal, são necessários a quantidade e o catálogo de todos os equipamentos disponíveis na empresa, pois os dados de cada equipamento são fundamentais para o projeto (ROCHA, 2005).

Para o cálculo são necessários valores da utilização dos equipamentos, os mesmos podem ser obtidos de forma observacional. A partir destes dados, pode-se obter o consumo por hora de cada equipamento, que quando somados, representarão o consumo máximo exigido pela empresa com todos os equipamentos funcionando (ROCHA, 2005).

Quando a empresa utiliza apenas um compressor para suprir toda a demanda, é aconselhável um sistema de adesão para um compressor móvel, que possa suprir alguma necessidade inesperada de ar comprimido (ROCHA, 2005).

#### 4.3.5. Cálculo do diâmetro da tubulação

Rocha (2011) afirma que o diâmetro mínimo necessário para atender a demanda da tubulação principal de ar comprimido é calculado pela equação 9. O diâmetro das linhas de serviço também pode ser obtido aplicando a mesma equação, porém, deve-se ajustar os valores das variáveis da vazão e do comprimento total.

$$d = \sqrt[5]{\frac{0,842 \times L \times Q^2}{R \times \Delta P}} \quad (9)$$

Sendo,

d= diâmetro interno em cm;

L= comprimento real = comprimento reto + perdas, em m;

Q= vazão de ar, m<sup>3</sup>/min;

R= pressão do ar final + 1, em kgf/cm<sup>2</sup>;

ΔP= perda de carga permitida, em kgf/cm<sup>2</sup>.

O diâmetro obtido corresponderá ao diâmetro interno e sua unidade é cm. O estabelecimento do diâmetro comercial do tubo pode ser feito por meio de catálogos de possíveis fornecedores.

#### 4.3.6. Seleção do material da tubulação

Uma das decisões mais importantes de se fazer ao montar um sistema de ar comprimido é a escolha do tipo de tubulação e conexões por onde o ar vai passar: da geração ao ponto de uso. O material do qual os dutos são feitos interfere diretamente na ocorrência de vazamentos, na vazão do sistema e na qualidade do ar (ATLAS COPCO, 2016).

Uma tubulação de ar comprimido pode ser utilizada com alguns tipos de materiais, como por exemplo, o aço inox, o plástico, cobre e os aços sem costura, mas isso vai depender das características exigidas e adequadas para cada tipo de aplicação (ACEPIL).

Por isso é fundamental saber optar pelo tipo de tubulação de ar comprimido correta, caso contrário, afetará de forma direta o fluxo, pressão e até a qualidade do ar, causando uma carência na forma de funcionamento, alterando também com gastos em energia elétrica, crescimento no valor com as instalações e manutenções (ACEPIL).

Para a realização da melhor seleção, podemos utilizar a tabela 4, ela mostra um comparativo entre os principais materiais que são utilizados nas tubulações de redes de ar comprimido.

Tabela 4 - Tabela comparativa entre os tipos de tubulação.

	ALUMÍNIO	PPR (PLÁSTICO)	PRETO (AÇO CARBONO)	GALVANIZADO (AÇO CARBONO)	AÇO INOX
<i>Eficiência energética</i>	excelente ●	bom ●	ruim ●	regular ●	excelente ●
<i>Perda de carga</i>	mínima ●	baixa ●	alta ●	média ●	baixa ●
<i>Vazamentos</i>	0% ●	0% ●	15 ~ 20% ●	15 ~20% ●	0% ●
<i>Rugosidade interna</i>	mínima ●	baixa ●	alta ●	média ●	baixa ●
<i>Resist. à corrosão</i>	excelente ●	excelente ●	baixa ●	média ●	excelente ●
<i>Resist. ao calor</i>	alta ●	alta/baixa ●	alta ●	alta ●	alta ●
<i>Resist. ao impacto</i>	alta ●	baixa ●	alta ●	alta ●	alta ●
<i>Resist. radiação UV</i>	alta ●	média ●	alta ●	alta ●	alta ●
<i>Resist. a hidrocarbonetos</i>	alta ●	baixa ●	alta ●	alta ●	muito alta ●
<i>Resist. à pressão</i>	alta ●	baixa ●	muito alta ●	muito alta ●	baixa ●
<i>Pintura externa</i>	eletrostática (azul) ●	pigmento azul ●	exige pintura ●	exige pintura ●	exige pintura ●
<i>Reutilizável</i>	sim ●	eventualmente ●	eventualmente ●	eventualmente ●	eventualmente ●
<i>Tempo de montagem</i>	muito baixo ●	médio ●	alto ●	médio ●	alto ●
<i>Pressão x Temp.</i>	16/70 bar(e) a 100°C ●	20 bar(e) a 20°C ●	OK ●	OK ●	OK ●
<i>Distância entre suportes</i>	3 a 4 metros ●	0,4 a 1,4 metro ●	3 a 4 metros ●	3 a 4 metros ●	3 a 4 metros ●

Fonte: Atlas Copco (2016).

#### 4.4. DEFINIÇÃO DE AÇÕES PARA MELHOR APROVEITAMENTO EM UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

A melhoria do sistema de ar comprimido passa pela melhoria das tubulações (singularidades e diâmetros), compressores, e utilizações dos equipamentos ligados à rede.

##### 4.4.1. Definição de um sistema de ar comprimido

Segundo (ROCHA, 2005), podem-se utilizar três categorias para discutir os componentes de um sistema de ar comprimido: geração, distribuição e uso final.

#### 4.4.1.1. Sistema de geração de ar comprimido

A obtenção de ar comprimido é obtida pela captação e pressurização do ar atmosférico, no entanto são necessários vários subcomponentes e subsistemas para obter-se o ar comprimido. Os componentes mais comumente utilizados são compressores, equipamentos de tratamento do ar e reservatório (ROCHA, 2005).

##### 4.4.1.1.1. Seleção do compressor

A principal decisão quanto à seleção de compressores, é o tipo do compressor. Para quase todo o campo de ferramentas pneumáticas, a escolha mais correta é o compressor de parafuso ou o compressor de pistão (BOSCH, 2008).

As melhores condições para o uso de compressor de parafuso são:

- Longos períodos de funcionamento;
- Alto consumo de ar comprimido sem altos picos de carga;
- Grandes volumes de fornecimento;
- Fluxo de volumes contínuo;
- Capacidade de compressão de 5 a 14 bar.

As melhores condições para o uso de compressor de pistão são:

- Demanda de ar intermitente;
- Picos de carga;
- Mudanças frequentes de carga;
- Baixos volumes de fornecimento;
- Capacidade de compressão até 35 bar.

A escolha certa de um sistema de ar não deveria depender do preço de compra, o qual se paga muito rapidamente em função da economia com os custos operacionais. Esses custos não só incluem os custos com energia para a geração de ar comprimido, mas também os custos com manutenção e outros custos indiretos.

#### 4.4.1.1.2. Sistema de compressores múltiplos

Para sistemas de ar comprimido com consumo de ar flutuante, não é recomendado instalar somente um compressor grande para suprir toda a demanda de ar comprimido. Para esses casos recomenda-se a utilização de dois ou mais compressores, sendo um para a maior demanda (maior taxa de utilização) e um de menor demanda que seria ligado somente quando a vazão de ar exigida pela rede ultrapassasse o limite do compressor de maior utilização (BOSCH, 2008).

Os benefícios fundamentais de um sistema de compressores composto são:

- Confiança operacional;
- Opções favoráveis de manutenção;
- Eficiência econômica.

A melhor confiança operacional é resultado do maior número de compressores e da não dependência total de um único equipamento. A melhor manutenibilidade ocorre quando a parada para manutenção não determina a parada de abastecimento do sistema de ar comprimido, podendo outro compressor entrar em ação quando a demanda for necessária. A eficiência econômica acontece devido à utilização de um compressor de menor potência (em relação ao compressor único) e de compressores auxiliares somente quando altas vazões forem necessárias, ao contrário de um único compressor de alta potência funcionando sempre que necessário (BOSCH, 2008).

#### 4.4.1.2. Sistema de distribuição de ar comprimido

O sistema de distribuição em uma rede de ar comprimido é responsável pelo transporte do ar desde o reservatório até sua estação de uso final. Sua finalidade é a entrega da quantidade suficiente de ar limpo, seco, estável e em pressão adequada, sendo preferencialmente entregue da forma mais confiável e

econômica. O sistema de distribuição é de suma importância para o melhor aproveitamento energético de um sistema de ar comprimido. Para o desempenho eficiente do sistema de distribuição é requerido um correto balanceamento da pressão do ar comprimido nas linhas, com regulação eficaz da pressão, boa drenagem de condensado e perfeita estanqueidade (ROCHA, 2005).

#### 4.4.1.3. Sistemas de uso final de ar comprimido

Caracteriza-se como sistema de uso final de ar comprimido a aplicação final do sistema, sendo o abastecimento de máquinas, comando de válvulas e sistemas de controle. O conhecimento do balanço energético característico deste sistema contribui muito na identificação das perdas que reduzem a eficiência do sistema, portanto é um excelente ponto de partida para a identificação de oportunidades de implementação de ações de melhorias da eficiência (ROCHA, 2005).

#### 4.4.2. Oportunidade de melhoria de eficiência em rede de ar comprimido

Segundo ROCHA (2005), problemas com eficiência relacionados à rede de ar comprimido, que podem ser facilmente resolvidos, estão ligados à duas causas principais. As duas causas são perda de carga na rede e vazamentos.

##### 4.4.2.1. Redução de eficiência por perda de carga

A queda de pressão por perda de carga é um fator crucial a ser levado em consideração no momento do dimensionamento da rede. Para o dimensionamento da mesma, será necessário levar em consideração possíveis



ampliações no sistema, principalmente no dimensionamento da rede principal. Uma boa aplicação dos cálculos de perda de carga terá seus custos rapidamente compensados com vantagens pelo ganho operacional. Um baixo consumo de ar comprimido deve também ser levado em consideração no projeto, pois momentos de baixo consumo aumentarão as perdas por vazamentos e também aumentarão a pressão no sistema, podendo prejudicar algum equipamento (ROCHA, 2005).

Os valores adotados em literatura oriundos de análises práticas para não prejudicar o sistema, são os seguintes:

- Perda máxima de pressão para o ponto mais afastado do compressor: 0,3 bar;
- Tubulações principais (mestras): 0,02 bar para cada 100 metros de tubo;
- Tubulações secundárias: 0,08 bar para cada 100 metros de tubo;
- Tubulações de acesso direto ao consumidor: 0,2 bar para cada 100 metros de tubo;
- Mangueiras de alimentação de marteleiros, perfuratrizes etc: 0,4 bar para cada 100 metros de mangueira.
- Velocidade nas tubulações principais: 6 a 8 m/s;
- Velocidades nas tubulações secundárias: 8 a 10 m/s;
- Velocidades nas mangueiras: 15 a 30 m/s (ROCHA, 2005).

Também segundo Bosch (2008), as bases para os cálculos de pressão na rede variam de acordo com as pressões máximas e mínimas exigidas pelos equipamentos instalados na rede e com o total das perdas de pressão no sistema. A pressão em toda a rede deve ser obrigatoriamente maior que a pressão de trabalho dos equipamentos ligados ao sistema. Além disso, o projeto da rede de ar comprimido deve ser feito visando uma perda de carga de até 0,1 bar na linha principal e nas linhas de serviço ela não pode ultrapassar 0,03 bar.

#### 4.4.2.2. Redução de eficiência por vazamentos

Os vazamentos em redes de ar comprimido apresentam na maioria das vezes valores em torno de 10% a 40% em um sistema de ar comprimido, variando de acordo com o projeto do sistema e da manutenção realizada em equipamentos, uma vez que os mesmos apresentam deterioração periódica que acaba gerando vazamentos excessivos (ROCHA, 2005).

Os itens que compõem o sistema, como tubos e conexões, devem ser periodicamente checados e trocados de acordo com uma boa estratégia de manutenção preditiva e preventiva da empresa, de modo a não deixar tubos corroídos ou conexões sem vedação no sistema (ROCHA, 2005).

Dentre os itens que podem compor um sistema pneumático, observa-se com a prática que alguns deles apresentam maiores e mais frequentes índices de vazamento, como acoplamentos (juntas, uniões), mangueiras, tubos, adaptações, uniões de tubulações, engates rápidos, FRLs (filtro, regulador e lubrificador), purgadores de condensado, válvulas, flanges, roscas de vedação e dispositivos de uso final (ROCHA, 2005).

O problema com a manutenção preventiva ligada ao sistema de distribuição do ar comprimido é muitas vezes negligenciada por ser considerada um investimento sem retorno financeiro, no entanto, a potência exigida dos compressores pode ter um aumento significativo devido aos altos índices de vazamentos (ROCHA, 2005).

**Tabela 5 - Valores de aumento potência devido à vazamentos**

<b>Diâmetro do Furo de Vazamento (mm)</b>	<b>Escape de Ar a pressão de 6 bar (m³/min)</b>	<b>Potência para Suprir a Compressão Perdida (kW)</b>
1	0,006	0,3
3	0,6	3,1
5	0,1	8,3
10	6,3	33,0
15	25,2	132,0

Fonte: ROCHA (2005, p. 65).

É possível ter uma noção dos índices de vazamento à partir da idade e do estado aparente da instalação, segundo ROCHA (2005), os números são:

- Instalações com até 7 anos de idade e em bom estado de conservação: não superior a 5%;
- Instalações com até 7 anos de idade e em estado precário: de 5 a 10%;
- Instalações com idade entre 7 e 15 anos e em estado regular: de 10% a 15%;
- Instalações com idade entre 7 e 15 anos e em estado precário: de 15% a 20%;
- Instalações com idade superior a 15 anos e em estado precário: superior 20%.

#### 4.4.3. Identificação das oportunidades de melhoria

Segundo a literatura, é possível a divisão da seleção de oportunidade para uma situação genérica ou específica (rocha, 2005).

##### 4.4.3.1. Método genérico

Aplica-se basicamente na troca de componentes, baseando-se em dados obtidos através da manutenção preditiva. Segundo ROCHA (2005), algumas trocas podem-se aplicar em uma porcentagem muito grande dentro da indústria, como no exemplo mostrado na tabela a seguir:

Tabela 6 - Exemplo de aplicação do método genérico

<b>Medidas de economia de energia</b>	<b>Aplicabilidade (%)</b>	<b>Ganhos (%)</b>	<b>Contribuição Potencial (%)</b>
Melhoria dos acionamentos (motores de alta eficiência)	25	2	0,5
Melhoria dos acionamentos (Reguladores de velocidade)	25	15	2,8
Troca de compressores por versões mais modernas	30	7	2,1
Uso de Sistema de Controle Sofisticado	20	12	2,4
Recuperação de Calor Rejeitado	20	20	4,0
Melhoria do Resfriamento, Secagem e Filtragem do Ar	10	5	0,5
Projeto Global do Sistema, incluindo multipressões	50	9	4,5
Redução na Perda por Queda de Pressão no Sistema	50	3	1,5
Otimização de Dispositivos de Uso Final	5	40	2,0
Redução de Vazamento de Ar	80	20	16
Substituição mais frequente de filtros	40	2	0,8
<b>Total</b>			<b>32,9</b>

Fonte: ROCHA (2005, p. 17).

**Notas:**

Aplicabilidade: Percentual de situações onde esta medida é aplicável.

Ganhos: Percentual de redução no consumo anual de energia.

Contribuição potencial: Potencial de contribuição = Aplicabilidade x Ganho.

Dados obtidos sobre a avaliação das condições operacionais de um dos três sistemas de ar comprimido da fábrica da DAIMLER-CHRYSLER de São Bernardo do Campo (SP). (ROCHA, 2005).

#### 4.4.4. Análise da aplicação das medidas adotadas para a melhor eficiência do sistema de ar comprimido

O resultado de qualquer ação implementada deve ser avaliado, e seu impacto no sistema deve ser analisado, para determinar se a ação já pode ser considerada concluída e reiniciar o ciclo do plano de ação para outras oportunidades identificadas (ROCHA, 2005).

#### 4.4.5. Tratamento do ar comprimido

Geralmente, os possíveis contaminantes do ar comprimido são:

- Partículas: Provenientes do próprio ambiente, dos compressores e da parte interna da tubulação do ar comprimido, pode causar marcas e imperfeições nos processos de pintura, erro de leitura nos instrumentos, contaminações de alimentos e embalagens e abrasão sobre hastes e cilindros pneumáticos;
- Água: Proveniente da umidade contida no ar do próprio ambiente aspirado pelo compressor e conseqüentemente causa ferrugem na tubulação, imperfeições nos processos de pintura, erro de leitura nos instrumentos, necessidade de manutenção frequente nos equipamentos pneumáticos, falhas de repetição nos movimentos pneumáticos, imperfeição na lubrificação de válvulas e ferramentas pneumáticas ;
- Óleo: Proveniente do contato do ar com as partes lubrificadas do compressor e acarreta manchas nos processos de pintura, erro de leitura nos instrumentos, emperramento dos atuadores pneumáticos e contaminação dos processos onde atua diretamente (FARGON, 2006).

Os equipamentos mais utilizados para o tratamento de ar comprimido são:

- Lubrificadores: para reduzir o atrito das peças móveis de determinados componentes pneumáticos, aumentando sua vida útil e diminuindo o consumo energético;
- Filtros: para remoção de emulsões de óleo e água condensada e partículas sólidas, a fim de evitar desgaste excessivo e engripamentos no sistema pneumático.
- Secadores: para a remoção do vapor d'água, fornecendo assim um ar tratado para aplicações específicas. Sua perda de carga usual deve se situar na faixa de 0,15 a 0,25 bar (para o modelo por adsorção) e 0,25 a 0,5 bar (para o modelo por refrigeração);
- Purgadores automáticos: devem ser verificados periodicamente quanto à vazamentos e(ou) entupimentos (FARGON, 2006).

Conhecendo os possíveis contaminantes, torna-se mais fácil a determinação dos equipamentos que serão utilizados para tratar o ar comprimido (FARGON, 2006).

#### 4.4.5.1. Filtros de ar comprimido

Alguns fatores são fundamentais para a seleção do melhor filtro para a rede de ar comprimido, são eles:

- Capacidade de separação do filtro;
- Queda de pressão;
- Volume do fluxo de ar (BOSCH, 2008).

#### 4.4.5.1.1. Tipos de filtros

Dependendo da pureza do ar desejado e do acúmulo de impurezas no filtro, pode-se escolher o melhor tipo de filtro para determinada rede de ar comprimido. Os filtros mais comuns existentes são: precipitador tipo ciclone, filtro preliminar, filtro de alto desempenho e filtro de carvão atividade.

##### 4.4.5.1.1.1. Queda de pressão nos filtros

A queda de pressão em filtros novos ocorre em 0,02 e 0,2 bar dependendo do tipo de filtro. O limite economicamente permissível ocorre em 0,6 bar. Para determinar a diferença de pressão, os filtros são geralmente equipados com um medidor de diferença de pressão. Quando a queda ultrapassa 0,6 bar, o filtro deve ser limpo ou trocado (BOSCH, 2008).

Existem diversos tipos de filtros para rede de ar comprimido, cada um variando de acordo com os contaminantes mais comuns para determinadas aplicações. Os mais comuns são: filtros com elemento sinterizado, filtros com elemento coalescente, filtros com elemento de carvão ativo, filtros com elemento esterilizante (FARGON, 2006).

#### 4.4.5.2. Lubrificadores

A lubrificação dos componentes pneumáticos contribuem para o aumento da sua vida útil, redução dos custos de manutenção, redução dos intervalos de reparo e reposição de peças. Para lubrificar os componentes e ferramentas pneumáticas, o método mais utilizado é a dosagem de lubrificante no ar que aciona o sistema (PARKER, 2000).

Lubrificadores são utilizados para reduzir o atrito das peças móveis de determinados dos componentes pneumáticos, aumentando sua vida útil e diminuindo o consumo energético.

Erroneamente leva-se a concluir que o óleo utilizado nos compressores lubrificados seria benéfico para algumas aplicações. Porém este óleo na saída do compressor está contaminado com água proveniente do ar, resultando em um líquido branco corrosivo e prejudicial aos equipamentos pneumáticos. Neste caso deve-se remover primeiramente esta emulsão através de um filtro adequado para posteriormente utilizar um lubrificador (FARGON, 2006).

#### 4.4.5.3. Secadores

Secadores são equipamentos destinados à remoção do vapor d'água contido no ar, e também de outros gases comprimidos que não podem ser removidos por filtros por se encontrar na forma de gás. Em conjunto com filtros, o secador forma um eficiente conjunto de tratamento, removendo todos os componentes indesejáveis tais como: partículas sólidas, óleo, água condensada e vapor d'água (FARGON, 2006).

O funcionamento do secador baseia-se na transferência de calor entre um fluido refrigerante e o ar comprimido, provocando a condensação do vapor d'água através do resfriamento ocorrido (FARGON, 2006).

#### 4.4.5.4. Purgadores

São geralmente instalados na parte inferior do filtro e em outros equipamentos. Eles servem para eliminar o condensado removido pelo elemento filtrante. Esta operação é automática pelo purgador automático ou realizada manualmente através da abertura da válvula manual de dreno. O purgador automático pode ser do tipo bóia, termodinâmico ou eletrônico temporizado.



Os purgadores são comumente encontrados em reservatórios de ar comprimido, filtros, separadores de condensado, secadores por refrigeração.

#### 4.5. MICROSOFT EXCEL NA ENGENHARIA

O Microsoft Office Excel é um editor de planilhas produzido pela Microsoft para computadores. Seus recursos incluem uma interface intuitiva e capacitadas ferramentas de cálculo e de construção de gráficos.

No Excel, você pode compartilhar uma pasta de trabalho com outros usuários, isso permite o acesso de pessoas e empresas ao *software*, tornando-o muito acessível e de fácil manipulação.

Pode-se utilizar no Excel ferramentas de teste de hipóteses para resultados e previsões. Pode-se avaliar diferentes cenários, como casos de melhores e piores hipóteses e comparar os dados resultantes das diferentes. Portanto, o Microsoft Excel é amplamente utilizado dentro da engenharia nas mais diversas áreas e para os mais variados fins.

#### 4.6. DISTRIBUIÇÃO NORMAL

A distribuição normal é a mais importante das distribuições de probabilidades. Ela tem sua origem associada aos erros de mensuração. Construindo-se o histograma desses valores, obtém-se uma figura com forma aproximadamente simétrica. Gauss deduziu matematicamente a distribuição normal como distribuição de probabilidade dos erros de observação, denominando-a então “lei normal dos erros” (CORREA, 2003).

A distribuição normal tem sua função de densidade de probabilidade dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad -\infty < x < \infty \quad (10)$$

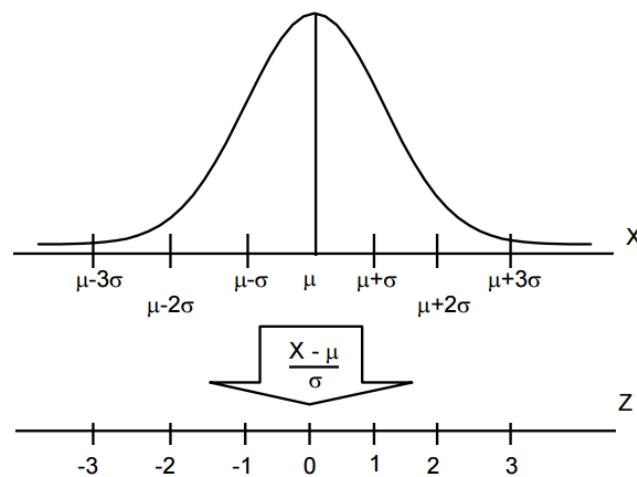
$\mu$ : posição central da distribuição (média,  $\mu x$ );

$\sigma$ : dispersão da distribuição (desvio padrão,  $\sigma x$ );

A determinação dessas probabilidades é realizada matematicamente através da integração da função de densidade de probabilidade entre os pontos a e b de interesse.

#### 4.6.1. A distribuição normal padrão

A distribuição normal particular com média 0 e desvio padrão 1 é chamada de distribuição normal padrão e costuma ser denotada por Z, e demonstrada pela curva a seguir:



**Figura 4 - Função da distribuição normal padrão.**  
**Fonte: Correa (2003, pg. 90).**

Utilizando-se a transformação acima, podemos obter as probabilidades para qualquer função ( $\mu, \sigma$ ), onde o valor de Z pode ser dado pela fórmula:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

Assim, com os valores de  $\mu$  e  $\sigma$  conhecidos é possível encontrar o valor de  $Z$ , possibilitando a consulta na tabela normal (vide anexo C), para a determinação do valor da probabilidade de acontecimentos dos fatores estudados.

#### 4.7. GASTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Todo equipamento elétrico possui uma faixa de potência de operação, que deve ser dada em W ou kW, para calcular o consumo de um equipamento multiplique sua potência pelo tempo de funcionamento em horas, obtendo-se assim um valor dado em unidade de energia, que pode ser Wh ou kWh.

## 5. METODOLOGIA

Primeiramente foi analisada a disposição dos equipamentos pneumáticos na planta da fábrica, juntamente com a coleta dos dados referentes à vazão, pressão de operação e fator de utilização. Para facilitar a visualização, confeccionou-se o desenho técnico, em planta baixa e perspectiva (vide anexo A e B), do sistema e de sua disposição dentro da fábrica.

Em seguida, a literatura foi estudada a fundo e, então, o sistema existente foi analisado a fim de encontrar não conformidades no projeto da rede de ar comprimido. Encontrou-se divergências a respeito da pressão de trabalho utilizada na rede. Outra divergência encontrada está na existência de equipamentos que necessitam alta demanda de ar comprimido e estão localizados no final da rede, a literatura indica que estes devem ser posicionados no começo desta. Além destas, a ausência dos chamados “pescoços de ganso” na saída da linha de distribuição que, segundo a literatura, são fundamentais para o bom funcionamento da rede também difere da bibliografia. Ainda comparando com bibliografia e falando sobre a rede de distribuição, a utilização de mangueiras como linha de alimentação, e não tubos aumenta a perda de carga e aumenta o risco de vazamentos, não sendo, então, indicada pela literatura. Por fim, a literatura recomenda a utilização de um sistema de compressores múltiplos para casos em que há uma alta variação de vazão de ar comprimido, e a empresa estudada não faz uso deste sistema.

Finalmente foi projetada a rede de ar comprimido com embasamento literário com a pressão de trabalho ideal para o sistema, levando-se em conta a perda de carga total e o espaço físico disponível, a fim de minimizar as perdas por vazamento e danos às máquinas e maximizar a eficiência energética da rede. E para o dimensionamento dos parâmetros de projeto (diâmetro dos tubos, perda de carga, pressão de trabalho e vazão requerida) foi elaborado um programa computacional utilizando o *software* Microsoft Excel com o intuito de facilitar, agilizar e otimizar o cálculo, além de auxiliar na escolha do melhor tipo de compressor a ser adquirido.

## 5.1. COLETA DE DADOS

Os dados foram coletados durante o horário de funcionamento da empresa, em diversos horários ao longo de uma semana. Foram obtidos dados referentes à taxa de utilização de ar comprimido e de pressão na rede.

Para a taxa de utilização, observou-se o tempo em que os equipamentos eram utilizados no período de uma hora, coletando assim diferentes amostragens ao longo da semana, obtendo-se assim uma média e um desvio padrão para a taxa de utilização.

Para a pressão, foi utilizado um manômetro padrão conectado em diferentes pontos na rede.

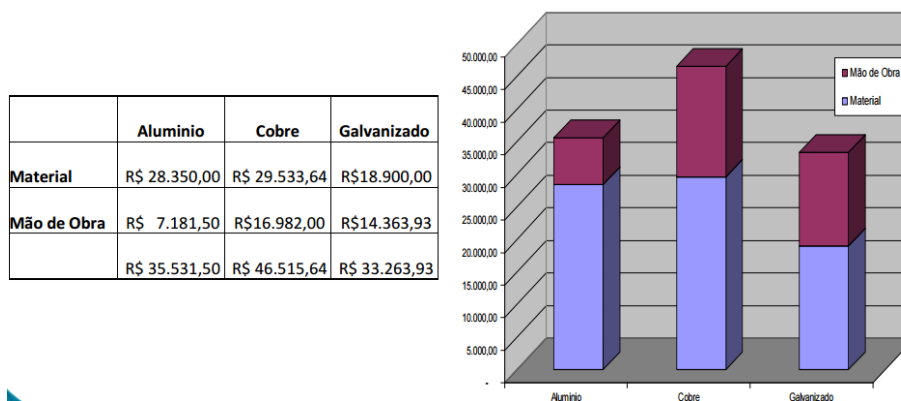
## 5.2. PROJETO DA REDE DE AR COMPRIMIDO

A rede de ar comprimido foi projetada de acordo com as recomendações encontradas na literatura. Nesta seção será comentado sobre os critérios utilizados para a seleção do material das tubulações e alguns dos parâmetros utilizados no dimensionamento da rede de ar comprimido, sendo estes: pressão de regime, queda de pressão admissível e considerações sobre a vazão de ar comprimido dos equipamentos.

### 5.2.1. Seleção do material da tubulação

A seleção do material da tubulação que transportará o ar comprimido foi baseada no ramo de atuação da empresa em que ela será instalada e das principais atividades ali executadas. Além disso, foram considerados para a seleção do melhor material a ser utilizado os seguintes fatores: eficiência energética, perda de carga, vazamentos, facilidade de expansão e preço.

Por fim, o último quesito analisado foi o custo de instalação e manutenção desta tubulação comparado com as demais existentes no mercado. A figura 5 mostra um exemplo comparativo de investimento para uma instalação feita pela empresa Kcal Engenharia.



**Figura 5 - Comparativo de investimento para uma instalação.**

**Fonte: Kcal Engenharia (2011, p.20).**

A análise feita, seus resultados e a apresentação do material selecionado para compor as tubulações serão descritos na seção de apresentação e análise dos resultados.

### 5.2.2. Pressão de regime

No caso estudado, a pressão de trabalho dos equipamentos da rede de ar comprimido é 6 kgf/cm<sup>2</sup>. Então, a pressão de regime utilizada será de 7 kgf/cm<sup>2</sup>, estando assim, dentro dos limites descritos por Fialho (2009).

### 5.2.3. Queda de pressão admissível

Há algumas variações na literatura em relação a queda de pressão admissível nas redes de ar comprimido. No dimensionamento do diâmetro das linhas de distribuição e pressão deste trabalho a queda de pressão utilizada foi,

conforme descrita por Bosch (2008), de 0,1 bar para a linha de distribuição e 0,03 bar para as linhas de serviço. Já para os elementos de filtro a queda de pressão pode variar, segundo Bosch (2008), entre 0,002 e 0,2 bar, dependendo do tipo de filtro. O limite economicamente permissível da queda de pressão ocorre aproximadamente em 0,6 bar, se a queda de pressão exceder esse limite, o filtro deve ser limpo ou o elemento de filtro deve ser substituído.

#### 5.2.4. Vazão de ar comprimido

Dados sobre o consumo de ar comprimido dos equipamentos da empresa estudada foram coletados. A partir desses dados foi calculado a vazão total da rede de ar comprimido considerando:

- 5% do fluxo de ar requerido total para compensar o desgaste da tubulação,
- 10% do fluxo de ar requerido total para compensação de vazamentos da tubulação;
- 30% do fluxo de ar requerido total para futuras expansões da rede de ar comprimido.

### 5.3. DETERMINAÇÕES E ESPECIFICAÇÕES DOS COMPRESSORES

#### 5.3.1. Quantidade de compressores

Para o sistema de geração de ar comprimido, foi utilizado o sistema de compressores múltiplos, pois a rede apresenta um consumo de ar comprimido flutuante ao longo do dia e a instalação do sistema múltiplo melhoraria a eficiência energética da rede.

As especificações de cada compressor variam de acordo com a quantidade, logo, a quantidade de compressores foi o primeiro aspecto a ser considerado para a determinação das especificações.

O método utilizado para a determinação da quantidade de compressores foi baseado na vazão exigida de ar comprimido e na pressão de trabalho, sendo obrigatória uma pressão maior do compressor em relação a pressão de trabalho.

### 5.3.2. Determinação da pressão de trabalho dos compressores

Para determinar a pressão de trabalho dos compressores, utiliza-se como base a pressão de regime do reservatório, considerando que a mesma deve ser obrigatoriamente maior que a pressão de trabalho na rede.

Considerando a pressão de trabalho igual a 7 bar, e a indicação da literatura por uma pressão de até 12 bar, recomenda-se para este caso a pressão de regime entre 10 e 12 bar.

### 5.3.3. Determinação da vazão de cada compressor

A vazão máxima na rede foi baseada no fluxo real máximo possível com todos os itens da rede ligados. Obteve-se então a tabela 7.



**Tabela 7 - Consumo de ar dos equipamentos existentes e fluxo de ar total do sistema**

Fonte de consumo	Consumo de ar (L/s)	Quantidade	Utilização (s/h)	Nível de utilização	Fluxo de ar Requerido (L/s)
Socador Pneumático	12.000	5	960	0.267	16.000
Rebarba	10.000	3	1000	0.278	8.333
Pistola Pneumática	3.000	7	290	0.081	1.692
Moldadora	0.460	4	300	0.083	0.153
Sopradora	2.222	2	2700	0.750	3.333
Fluxo de ar requerido total (L/s)					29.511
Consumo instantâneo de ar comprimido					0.000
Desgaste (5% do fluxo de ar requerido total)					1.476
Vazamento (10% do fluxo de ar requerido total)					2.951
Expansão (30% do fluxo de ar requerido total)					8.853
Fluxo de ar real (L/s)					42.791
Fluxo de ar real (VM) (m <sup>3</sup> /h)					154.049

Com a vazão máxima (VM) conhecida, estipulou-se a probabilidade de certa vazão ocorrer através da distribuição normal, considerando esta vazão (X) partindo da vazão de 0 L/s até VM, ou seja  $0 < X < VM$ . Portanto, aplicando a distribuição normal para  $X \rightarrow VM$ , X teria 100% de chance de acontecer, logo, o valor médio da distribuição normal deu-se por:

$$\bar{X} = \frac{VM + 0}{2} \quad (3)$$

Assim sendo, a probabilidade de X estar em  $0 < X < \bar{X}$  é de 50%, pois representa metade da área abaixo da curva da distribuição normal padrão.

Utilizando o Microsoft Excel, isolou-se o valor de X da função da distribuição normal padrão, deixando-o em função de Z, da forma:

$$X = Z\sigma + \bar{X} \quad (4)$$

Assim, pode-se estimar probabilidade de 0 a X acontecer, de acordo com o valor de Z que representa a probabilidade desejada (vide anexo C).

Por lógica, pode-se deduzir que a probabilidade da vazão do compressor estar entre 0 e X é igual a probabilidade de tempo que a vazão da rede estará trabalhando entre os mesmos valores.

Assim sendo, é possível estimar a faixa de tempo que deseja-se utilizar o compressor de alta vazão e o(s) auxiliar(es), comprando o compressor principal com a respectiva vazão X obtida.

Para nossa proposta, foi utilizada uma vazão para o compressor principal estimada para suprir até 80% do tempo de funcionamento da fábrica, sendo os outros 20% representados por um compressor auxiliar de menor vazão.

#### 5.4. GASTO DE ENERGIA ELÉTRICA DOS COMPRESSORES

Para o cálculo do gasto com energia elétrica dos novos compressores propostos, utilizou-se a potência máxima de operação dos mesmos, multiplicada pela taxa de utilização e pela quantidade de horas trabalhadas.

Utilizou-se 1 para a taxa de utilização do compressor principal e 0,2 para o compressor auxiliar, o tempo de utilização exemplificado foi de 24 horas, valor máximo possível de energia que poderia ser gasta em um dia.

#### 5.5. PROGRAMA COMPUTACIONAL

Um programa computacional foi feito utilizando o *software* Microsoft Excel com o intuito de facilitar, agilizar e padronizar os cálculos de projeto da nova rede de ar comprimido e auxiliar na escolha do melhor tipo de compressor a ser utilizado.

Os dados de entrada do programa são: consumo pneumático das máquinas que farão parte da rede de ar comprimido e seu fator de utilização, as singularidades (válvulas, conexões, etc) que serão utilizadas na rede e os parâmetros de projeto (comprimento linear da rede, pressão de trabalho e queda de pressão admitida). A partir desses dados de entrada são calculados os seguintes parâmetros: a vazão total utilizada, levando em consideração vazamentos, futuras expansões e desgaste da tubulação, o comprimento total

linear, levando em consideração a perda de carga devido às singularidades e, por fim, o diâmetro interno ideal para a tubulação da rede de ar comprimido.

Além disso, utilizando o programa feito também é possível determinar qual o melhor compressor para uma determinada demanda de ar comprimido. Esta determinação foi possível através de dados obtidos em catálogos de fabricantes de compressores, analisando pressão e vazão disponíveis para cada tipo de compressor, facilitando assim, a seleção de compressores disponíveis no mercado. Os dados de entrada para esse caso são: a vazão total de ar comprimido e a pressão de regime.

## **6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Após o estudo do ar comprimido e dos componentes que fazem parte do sistema de produção, preparação e distribuição deste e a definição da metodologia a ser seguida, partiu-se, então, para a seleção do material das tubulações de ar comprimido, a definição do *layout* da nova rede, o dimensionamento das linhas de distribuição e serviço e, por fim, a seleção dos compressores que irão alimentar a rede.

### **6.1. SELEÇÃO DO MATERIAL DA TUBULAÇÃO**

A análise comparativa entre os possíveis materiais foi feita através da tabela 4, na qual se foi observado as características de cada material. Então, constatou-se o alumínio é o material que melhor atende aos fatores acima citados, por ele ter um excelente desempenho energético, mínima perda de carga, zero por cento de vazamentos e pode ser reutilizado.

Além disso, Kcal Engenharia (2011) afirma que outra vantagem das tubulações em alumínio é sua facilidade de ser modificada. Isso se deve ao fato dessas tubulações possuírem conexões rápidas (sem solda e sem rosca), sistema de corte dos tubos fácil e rápido e suas derivações podem ser montadas

e desmontadas em minutos. Logo, caso, futuramente, seja necessário uma expansão da rede de ar comprimido, esta pode ser facilmente feita.

Fica claro ao observar a figura 6, que os custos com material são maiores para as tubulações em alumínio, quando comparado com as feitas de cobre e aço galvanizado. Porém, os custos com mão-de-obra para a instalação são bem menores para as tubulações feitas de alumínio devido ao fato de sua instalação ser mais rápida e necessitar uma menor e menos qualificada mão-de-obra, como destaca McDonough (2016). Com isso, o valor final de instalação das tubulações feitas de alumínio acaba ficando muito similar ao das tubulações de aço galvanizado.

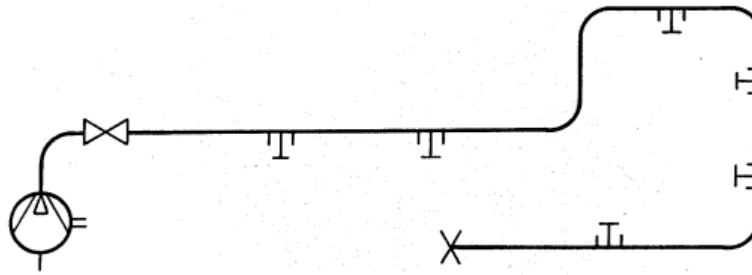
Outro ponto destacado pela Kcal Engenharia (2011) é que as tubulações para ar comprimido feitas de alumínio necessitam de menos manutenção e um menor tempo de parada de produção para sua instalação ou modificação, agregando ainda mais valor para as tubulações feitas desse material.

Portanto, o material escolhido para compor a tubulação da nova rede de ar comprimido é o alumínio, devido ao fato de se destacar em todos os fatores analisados e ditos como mais importantes.

## 6.2. DEFINIÇÃO DA NOVA REDE DE AR COMPRIMIDO

O *layout* da nova rede de ar comprimido foi projetado baseando-se na rede existente (vide anexos A e B), para que se minimize ao máximo a necessidade de alteração da disposição das máquinas. Além disso, o projeto deste novo *layout* visou a redução da perda de carga e o tamanho total das tubulações, além de melhorar a qualidade do ar transportado.

Nesse ponto, o tipo de rede de distribuição que melhor atende a essas necessidades é a rede em circuito aberto, mostrado na figura 6, onde o ar flui em uma única direção. Porém, esse tipo de rede impossibilita uma alimentação uniforme em todos os pontos, logo, as máquinas com maior consumo pneumático foram posicionadas no início da rede, mais próximas ao compressor, conforme já é feito no *layout* existente.



**Figura 6 - Exemplo de rede em circuito aberto.**  
**Fonte: SILVA (2002, p.36).**

Portanto, a nova rede de ar comprimido foi projetada visando os seguintes aspectos:

- Diminuir o comprimento das tubulações: com isso também se diminui o uso de singularidades o que resulta na diminuição da perda de carga por atrito e pelo uso de singularidades. Além disso, o custo de instalação e manutenção também diminui;
- Facilitação do uso de dreno de condensado ao longo da rede: visando a eliminação do acúmulo de condensado, melhorando então, a vida útil das máquinas e do compressor;
- Posicionar as máquinas com maior consumo pneumático no início da rede: otimizando a qualidade de trabalho dessas máquinas e possibilitando trabalhar com pressões menores no compressor;
- Melhor distribuição dos equipamentos e máquinas pela fábrica: otimizando o espaço física existente e facilitando possíveis modificações futuras.

Então, o novo *layout* da rede de ar comprimido foi modelado no *software* Autodesk Inventor, como mostra a figura 7.

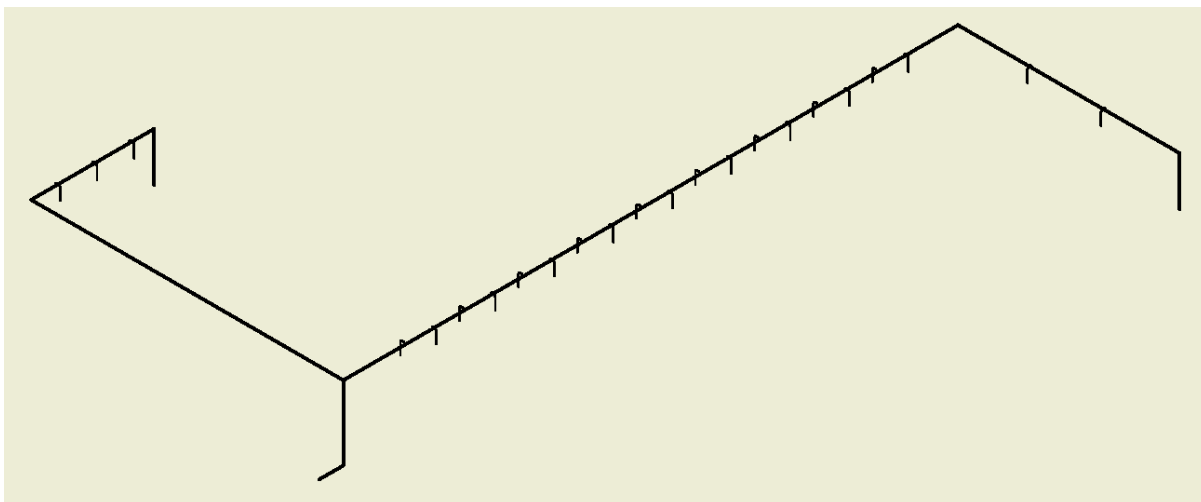


Figura 7 - Nova rede de ar comprimido modelada.

### 6.3. DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES

Primeiramente, foi desenvolvido um programa computacional no *software* microsoft excel para a verificação da perda de carga das tubulações atuais e para o dimensionamento das novas tubulações visando uma certa perda de carga admissível. Para a realização desses cálculos foi levado em consideração o consumo pneumático dos equipamentos existentes, como mostra a tabela 8. A disposição desses equipamentos na fábrica pode ser vista no anexo B.

Tabela 8 - Consumo pneumático dos equipamentos existentes

Equipamento	Quantidade	Fator de Utilização	Consumo de ar (l/s)
Socador pneumático	5	0,267	12,00
Rebarbadora	3	0,278	10,00
Pistola Pneumática	7	0,081	3,00
Moldadora	4	0,083	0,460
Sopradora	2	0,75	2,22

Além disso, foi necessário o levantamento das singularidades existentes nas linhas, do comprimento total da tubulação, da perda de carga admissível para

cada linha e, só então, foi possível através da equação 9 a verificação da perda de carga nas tubulações existentes e o dimensionamento das linhas para o novo *layout*.

Verificou-se então que a tubulação existente tem uma grande perda de carga nos trechos em que seu diâmetro é de 1/2", sendo essa muito maior do que a admissível pela literatura. Além disso, há perda de carga e de qualidade do ar na linha de distribuição devido as diversas mudanças de diâmetro existentes. Por esse motivo, estava sendo necessário utilizar uma pressão de trabalho na rede de, conforme os dados coletados na empresa, 10 bar para conseguir suprir as necessidades pneumáticas de todos os equipamentos, causando, assim, um aumento no consumo de energia elétrica.

Com isso, o dimensionamento das linhas de distribuição e de serviço foi realizado com o objetivo de diminuir as perdas de carga do ar transportado.

### 6.3.1. Dimensionamento da linha de distribuição

A linha de distribuição conduz o ar comprimido do compressor às linhas de serviço. As características da linha de distribuição estão apresentadas abaixo:

- Comprimento da tubulação real: 59,7 m;
- Queda de pressão admitida: 0,1 kgf/cm<sup>2</sup>;
- Pressão de regime: 7 kgf/cm<sup>2</sup>;
- Volume de ar consumido: 2,567 m<sup>3</sup>/min.

E, as seguintes singularidades foram consideradas para o dimensionamento:

- 5 curvas R=2d;
- 20 têes com saída bilateral;
- 2 separadores de condensado;
- 3 válvulas gaveta.

Com todos dados definidos, foi possível calcular o valor do diâmetro interno da tubulação da linha de distribuição utilizando a planilha criada no

software Microsoft Excel. Logo, o diâmetro interno da tubulação da linha de distribuição deve ser no mínimo igual a 34,5 mm a fim de atender a demanda com as condições desejadas.

Através de catálogos de possíveis fornecedores foi encontrado que o diâmetro comercial para tubos de alumínio mais próximo do calculado possui diâmetro interno de 37 mm sendo, assim, o recomendado para compor a rede de ar comprimido devido ao fato de preencher todos os requisitos de projeto.

### 6.3.2. Dimensionamento da linha de serviço

O dimensionamento da linha de serviço pode ser realizado utilizando a mesma equação, porém, ajustando-se o valor da variável do comprimento da tubulação e da variável da vazão. São vinte linhas de serviço, logo, a vazão total deve ser dividida pelo número total de linhas de serviço.

As características da linha de serviço são:

- Comprimento da tubulação linear: 1,5 m;
- Queda de pressão admitida: 0,03 kgf/cm<sup>2</sup>;
- Pressão de regime: 7 kgf/cm<sup>2</sup>;
- Volume de ar: 0,122 m<sup>3</sup>/min.

Singularidades:

- 1 Curva R=2d;
- 1 tê com saída bilateral;
- 1 Válvula gaveta;
- 1 Conexão com pescoço de cisne.

Então, para o cálculo do diâmetro interno da linha de serviço foi feito o uso da planilha elaborada no programa Microsoft Excel a fim de se agilizar e padronizar o processo. Logo, o diâmetro interno da linha de serviço deve ser no mínimo igual a 7,4 mm.



O diâmetro interno mais próximo do calculado para tubos de alumínio que é comercializado é igual a 13 mm sendo este, então, o recomendado para ser utilizado na rede de ar comprimido dimensionada.

#### 6.4. ESCOLHA DOS COMPRESSORES

Utilizou-se a planilha elaborada no Microsoft Excel para determinar o tipo de compressor a ser utilizado na empresa.

Com a planilha foi possível determinar a vazão máxima que seria possível na rede se todos os equipamentos fossem ligados simultaneamente, com correções devido à expansão, vazamento e desgaste.

Com a tabela, pode-se determinar a vazão com probabilidade de 80% de acontecer, logo, foi escolhido um compressor para suportar a vazão em 80% do tempo, e um auxiliar para suprir possíveis picos de pressão.

O valor da vazão para 80% do tempo obtido foi de 83,95 m<sup>3</sup>/h e pressão de regime utilizada foi de 8 a 9 bar.

A tabela a seguir mostra o resultado da tabela para os dados de entrada expostos nos parágrafos anteriores:

**Tabela 9 - Escolha do tipo de compressor**

<b>Escolha do tipo de compressor</b>	
Vazão de Ar (m <sup>3</sup> /h)	83.95
Pressão do Compressor (bar)	8
Compressor Centrífugo Engrenado	Não
Compressor de Pistão com Inj. de Óleo	Sim
Compressor de Parafuso com Inj. de Óleo	Sim
Soprador Centrífugo Isento de Óleo	Não
Compressor Centrífugo Isento de Óleo	Não
Compressor de Pistões Isento de Óleo	Não

O melhor tipo de compressor a ser utilizado nessa operação é o compressor de parafusos com injeção de óleo, pois segundo os catálogos de fabricantes, ele é facilmente encontrado no mercado, e é também o compressor que melhor se adequa para a aplicação da empresa e ao mesmo tempo possui

uma melhor eficiência comparado ao compressor de pistão, que também foi sugerido pela planilha.

#### 6.4.1. Compressor principal

O compressor principal escolhido foi o GX 2-11FF da Atlas Copco. Este compressor apresenta tratamento de ar integrado, capaz de remover a água antes de entrar no sistema de ar comprimido.



Especificações técnicas	
Capacidade FAD (l/s)	4 - 27.8 l/s
Capacidade FAD (m³/h, cfm)	14.4 - 100.1 m³/h
Pressão de trabalho	7.5 - 13 bar(e)
Potência instalada do motor	2.2 - 11 kW

**Figura 8 - Dados técnicos do compressor GX 2-11.**  
**Fonte: Atlas Copco (2016).**

### 6.4.2. Compressor Auxiliar

Determinou-se a vazão para o compressor auxiliar subtraindo a vazão do compressor principal da vazão máxima possível na rede, obtendo-se assim 54 m<sup>3</sup>/h.

Os tipos de compressor auxiliar oferecido pela planilha são de pistão e de parafusos, ambos lubrificados. Para este projeto foi escolhido um compressor de pistão, levando em conta que sua baixa eficiência energética seria compensada pelo seu preço de compra mais baixo em relação ao parafuso.

O compressor auxiliar escolhido foi o compressor de pistão Automan série AT da Atlas Copco.



Especificações técnicas	
Potência instalada do motor	4 - 11 kW
Capacidade FAD (l/s, cfm)	9 - 23.5 l/s

**Figura 9 - Dados técnicos do compressor Automan série AT.**  
**Fonte: Atlas Copco (2016).**

## 6.5. CONSUMO ENERGÉTICO DOS NOVOS COMPRESSORES

Considerando a potência dos compressores escolhidos como P1 (potência do compressor principal) = 11 kW e P2 (potência do compressor auxiliar) = 11 kW, e a taxa de utilização do compressor principal de 24 horas e 5 horas para o auxiliar, obter-se-ia o consumo de 319 kWh em um dia.

Deve considerar que as propostas da nova rede diminuiria a taxa de utilização, diminuindo-se assim a energia elétrica gasta em um dia.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Foram propostas melhorias em relação à rede e ao compressor, bem como os gastos possíveis com a utilização dos novos compressores para a comparação da empresa com os gastos atuais da mesma.

### **7.1. CONCLUSÕES**

Após os estudos e análises realizadas durante este trabalho, pode-se dizer que os objetivos inicialmente propostos foram alcançados, avaliando a linha de ar comprimido existente, apontando falhas e possíveis melhorias de acordo com a literatura, o uso de um *software* para facilitar o entendimento e a aplicação em diferentes trabalhos foi um sucesso, sendo possível adaptar os dados para diferentes situações. A rede de ar comprimido atual da empresa possui altíssima perda de carga, pois ela é origem de adaptações feitas ao longo da rede para acompanhar o crescimento da empresa. A saída apontada foi uma nova rede de ar comprimido com as permissividades de perda de carga de acordo com a literatura, aumentando assim a eficiência da rede. A nova rede proposta, além de possuir uma baixa perda de carga, está dividida dentro dos padrões em linha principal, linha de distribuição e linha de serviço, algo que não existia na rede antiga. Todos os diâmetros das tubulações calculados para a nova rede são compatíveis com os disponíveis no mercado e o material escolhido para a nova rede foi o alumínio. Depois que a nova rede foi dimensionada, começou o estudo para definir o melhor compressor para a nova rede, visto que o mesmo é um dos grandes responsáveis pela baixa eficiência energética, sendo o compressor da empresa inapto para suportar todos os equipamentos ligados ao mesmo tempo. A rede será equipada com tratamento de ar no compressor principal, que será

responsável pela qualidade do ar na rede. Através de análises estatísticas pôde-se escolher dois compressores para suportar a vazão de ar comprimido na fábrica, sendo um principal de parafusos com alto rendimento energético, e um auxiliar de pistões com baixo preço de compra. Após todas as análises e sugestões fica a critério da empresa a instalação da nova rede sugerida, sendo esta nova rede condizente com as especificações de diversos autores na literatura.

Durante o desenvolvimento deste trabalho verificou-se a importância do aprofundamento em alguns dos assuntos discutidos e o desenvolvimento de outros novos, para assim, auxiliar e aperfeiçoar os resultados alcançados. Estes serão tratados, a seguir, como trabalhos futuros.

## 7.2. TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento da planilha no Microsoft Excel, não foram encontrados materiais parecidos utilizados no projeto de redes de ar comprimido. Portanto, o aprofundamento no estudo de uma planilha para projetos de redes de ar comprimido seria algo diferente e em falta no mercado.

O estudo de estatística para determinação dos compressores pode ser mais aprofundado, com uso de ferramentas computacionais mais avançadas, uma lógica específica e com mais variáveis, diminuindo o erro e melhorando a qualidade do projeto.

Por fim, seria interessante a comparação do custo de energia consumida pelo sistema de ar comprimido existente na empresa e o consumo energético da nova rede dimensionada a fim de validar o projeto e verificar sua viabilidade econômica.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEPIL. **Tubulação de ar comprimido.** Disponível em: <<http://www.acepil.com.br/artigos/tubulacao-ar-comprimido>>. Acesso em: 17 set. 2016.

Atlas Copco. **Tipos de rede de ar comprimido: Aço, plástico ou alumínio. Qual devo usar?.** Disponível em: <<http://eficienciaenergetica.atlascopco.com.br/tipos-de-rede-de-ar-comprimido/>>. Acesso em: 17 set. 2016.

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

CORREA, Sonia M. B. B. **Probabilidade e Estatística.** 2 ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003.

Eficiência Máxima. **Como calcular o consumo de energia elétrica.** Belo Horizonte, 2016. Disponível em: < <http://www.eficienciamaxima.com.br/como-calcular-o-consumo-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 15 out. 2016.

FARGON. **Manual de Tratamento de Ar Comprimido.** Santo Amaro, 2016. Disponível em: < [http://www.fargon.com.br/catalogos/manual\\_tratamento\\_ar\\_comprimido\\_Fargon.pdf](http://www.fargon.com.br/catalogos/manual_tratamento_ar_comprimido_Fargon.pdf)> Acesso em: 15 out. 2016.

FIALHO, Arivelto Bustamante. **Automação pneumática: projetos, dimensionamento e análise de circuitos.** 6. ed. São Paulo: Érica, 2009. 324p.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

GOLDEMBERG, J; LUCON, O. **Energia e Meio Ambiente no Brasil,** 2006.

Kcal Engenharia. **Tubulações em alumínio.** Ribeirão Preto, 2011. Disponível em: <<http://www.kcal.com.br/apresentacao/Tubula%C3%A7%C3%A3o%20de%20Aluminio%20-%20Ar%20Comprimido%20-%20Kcal.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2016.

Legris Transair. **Catálogo de produtos.** Disponível em: <<http://www.valuecomercial.com.br/wp-content/uploads/Produtos-Legris1.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2016.

MCDONOUGH, Kyri. **Cinco razões por que faz sentido usar tubulação de alumínio em sistemas de ar comprimido.** Disponível em: <<http://www.schneider-electric.com.br/pt/work/insights/five-reasons-why-aluminum-piping-makes-sense-for-compressed-air-systems.jsp>>. Acesso em: 15 out. 2016.

Microsoft Corporation. **Excel 2016 Quick Start Guide.** Disponível em: <<https://support.office.com/pt-br/article/Explorar-o-Excel-2016-c6cd2046-4387-41bf-a874-b03a01ee3c87>>. Acesso em: 24 set. 2016.

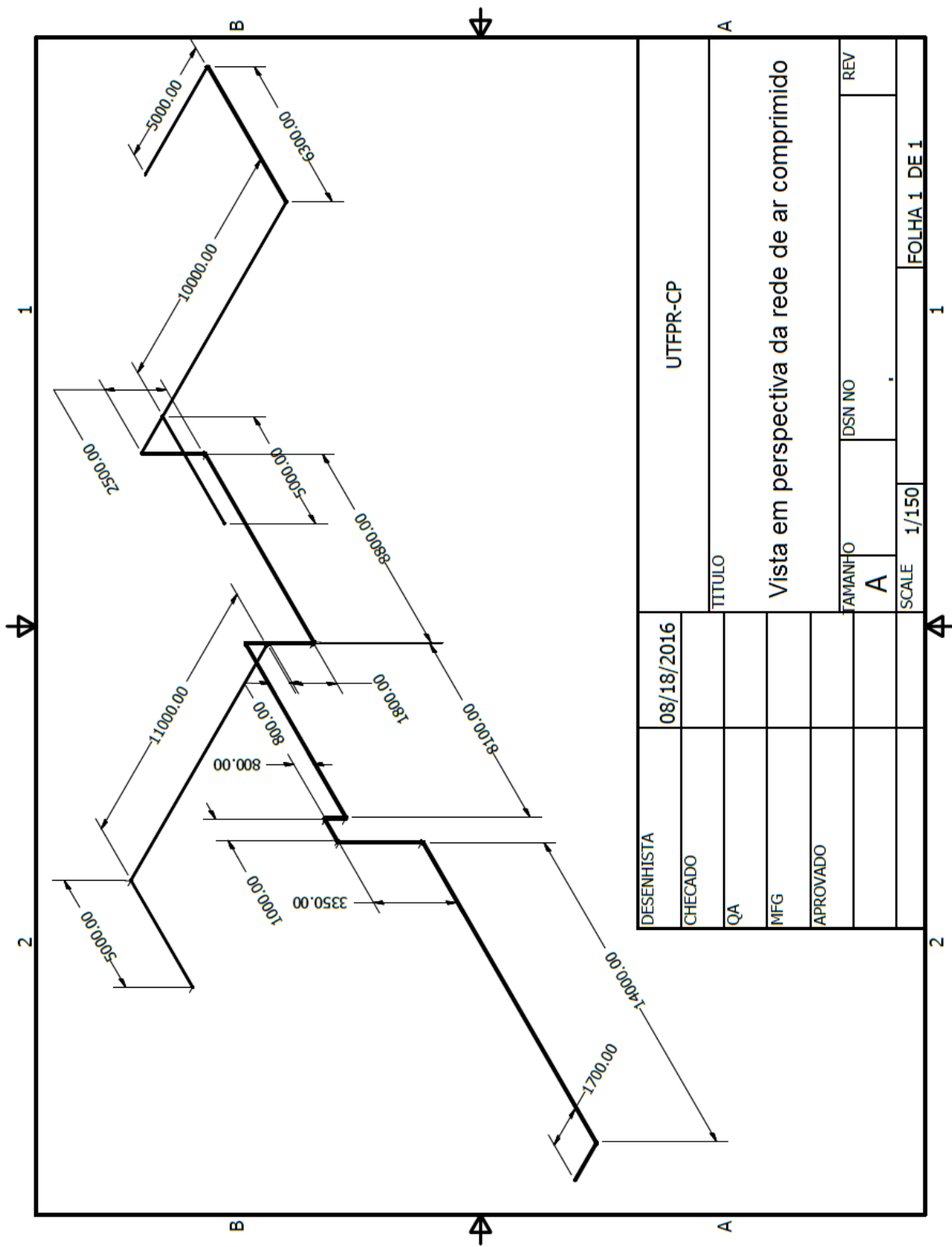
Parker Hannifin. **Tecnologia Pneumática Industrial.** Jacareí: Parker Training, 2000.

ROCHA, N.R. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido.** Rio de Janeiro: Eletrobrás; Procel, 2005.

SILVA, Emílio C. N. **Apostila de Pneumática.** São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2481/pneumat2481.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2016.

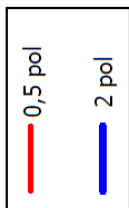
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos.** Curitiba, 2008.

**ANEXO A – VISTA EM PERSPECTIVA DA REDE DE AR COMPRIMIDO EXISTENTE**

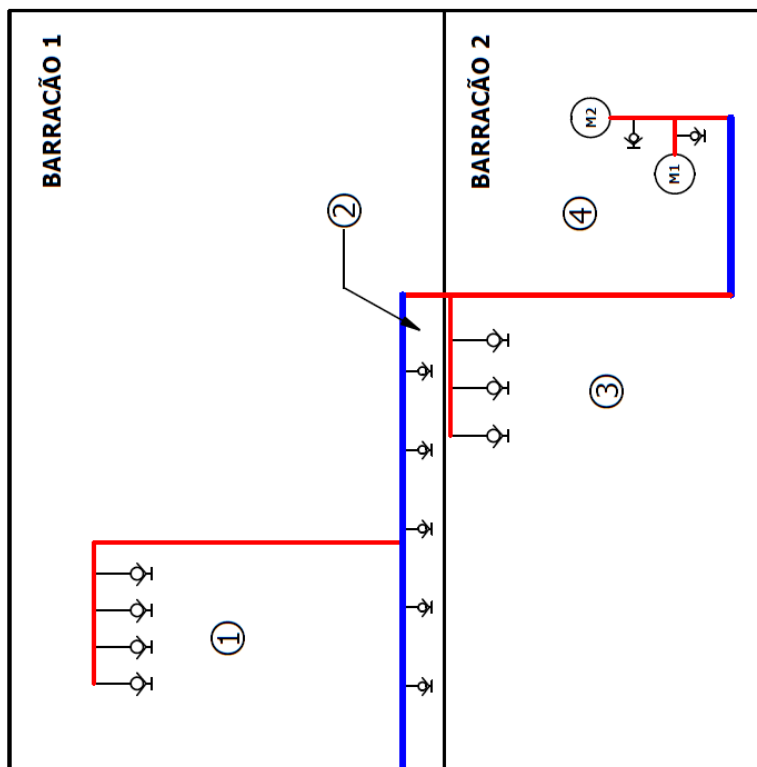




**ANEXO B – PLANTA BAIXA DA REDE DE AR COMPRIMIDO EXISTENTE**

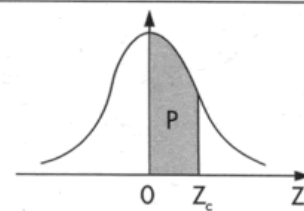


Seção	Dispositivo	Quantidade
1	Pistola Pneumática	4
2	Moldadoras	4
	Socador Pneumático	5
3	Pistola Pneumática	3
	Rebarba	3
4	Sopradora	2



## ANEXO C - TABELA DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRÃO

<p><b>Tabela III — Distribuição Normal Padrão</b>  <math>Z \sim N(0, 1)</math>  Corpo da tabela dá a probabilidade <math>p</math>, tal que <math>p = P(0 &lt; Z &lt; Z_c)</math></p>											
parte inteira e primeira decimal de $Z_c$	Segunda decimal de $Z_c$										parte inteira e primeira decimal de $Z_c$
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	p = 0										
0,0	00000	00399	00798	01197	01595	01994	02392	02790	03188	03586	0,0
0,1	03983	04380	04776	05172	05567	05962	06356	06749	07142	07535	0,1
0,2	07926	08317	08706	09095	09483	09871	10257	10642	11026	11409	0,2
0,3	11791	12172	12552	12930	13307	13683	14058	14431	14803	15173	0,3
0,4	15542	15910	16276	16640	17003	17364	17724	18082	18439	18793	0,4
0,5	19146	19497	19847	20194	20540	20884	21226	21566	21904	22240	0,5
0,6	22575	22907	23237	23565	23891	24215	24537	24857	25175	25490	0,6
0,7	25804	26115	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230	28524	0,7
0,8	28814	29103	29389	29673	29955	30234	30511	30785	31057	31327	0,8
0,9	31594	31859	32121	32381	32639	32894	33147	33398	33646	33891	0,9
1,0	34134	34375	34614	34850	35083	35314	35543	35769	35993	36214	1,0
1,1	36433	36650	36864	37076	37286	37493	37698	37900	38100	38298	1,1
1,2	38493	38686	38877	39065	39251	39435	39617	39796	39973	40147	1,2
1,3	40320	40490	40658	40824	40988	41149	41309	41466	41621	41774	1,3
1,4	41924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056	43189	1,4
1,5	43319	43448	43574	43699	43822	43943	44062	44179	44295	44408	1,5
1,6	44520	44630	44738	44845	44950	45053	45154	45254	45352	45449	1,6
1,7	45543	45637	45728	45818	45907	45994	46080	46164	46246	46327	1,7
1,8	46407	46485	46562	46638	46712	46784	46856	46926	46995	47062	1,8
1,9	47128	47193	47257	47320	47381	47441	47500	47558	47615	47670	1,9
2,0	47725	47778	47831	47882	47932	47982	48030	48077	48124	48169	2,0
2,1	48214	48257	48300	48341	48382	48422	48461	48500	48537	48574	2,1
2,2	48610	48645	48679	48713	48745	48778	48809	48840	48870	48899	2,2
2,3	48928	48956	48983	49010	49036	49061	49086	49111	49134	49158	2,3
2,4	49180	49202	49224	49245	49266	49286	49305	49324	49343	49361	2,4
2,5	49379	49396	49413	49430	49446	49461	49477	49492	49506	49520	2,5
2,6	49534	49547	49560	49573	49585	49598	49609	49621	49632	49643	2,6
2,7	49653	49664	49674	49683	49693	49702	49711	49720	49728	49736	2,7
2,8	49744	49752	49760	49767	49774	49781	49788	49795	49801	49807	2,8
2,9	49813	49819	49825	49831	49836	49841	49846	49851	49856	49861	2,9
3,0	49865	49869	49874	49878	49882	49886	49889	49893	49897	49900	3,0
3,1	49903	49906	49910	49913	49916	49918	49921	49924	49926	49929	3,1
3,2	49931	49934	49936	49938	49940	49942	49944	49946	49948	49950	3,2
3,3	49952	49953	49955	49957	49958	49960	49961	49962	49964	49965	3,3
3,4	49966	49968	49969	49970	49971	49972	49973	49974	49975	49976	3,4
3,5	49977	49978	49978	49979	49980	49981	49981	49982	49983	49983	3,5
3,6	49984	49985	49985	49986	49986	49987	49987	49988	49988	49989	3,6
3,7	49989	49990	49990	49990	49991	49991	49992	49992	49992	49992	3,7
3,8	49993	49993	49993	49994	49994	49994	49994	49995	49995	49995	3,8
3,9	49995	49995	49996	49996	49996	49996	49996	49996	49997	49997	3,9
4,0	49997	49997	49997	49997	49997	49997	49998	49998	49998	49998	4,0
4,5	49999	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	4,5



## ANEXO D – PROGRAMA COMPUTACIONAL

## FLUXO DE AR REQUERIDO

TRECHO TOTAL DA LINHA DE AR					
Fonte de consumo	Consumo de ar (L/s)	Número	Utilização (s/h)	Nível de utilização	Fluxo de ar Requerido (L/s)
Socador Pneumático	12.000	5	960	0.267	16.000
Rebarba	10.000	3	1000	0.278	8.333
Pistola Pneumática	3.000	7	290	0.081	1.692
Moldadora	0.460	4	300	0.083	0.153
Sopradora	2.222	2	2700	0.750	3.333
Fluxo de ar requerido total (L/s)					29.511
Consumo instantâneo de ar comprimido					0.000
Desgaste (5% do fluxo de ar requerido total)					1.476
Vazamento (10% do fluxo de ar requerido total)					2.951
Expansão (30% do fluxo de ar requerido total)					8.853
Fluxo de ar real (L/s)					42.791
Fluxo de ar real (m³/min)					2.567

## Valores de entrada:

- Descrição do equipamento existente
- Consumo Pneumático do equipamento em litros por segundo
- Quantidade de equipamentos
- Utilização deste equipamento em segundos por hora

## Valores de saída:

- Nível de utilização do equipamento
- Fluxo de ar requerido pelo equipamento em litros por segundo
- Fluxo de ar real de todos os equipamento em metros cúbicos por minuto

## SINGULARIDADES

Cálculo do comprimento equivalente da linha principal e de distribuição devido as perdas de carga por conta das singularidades do sistema

SINGULARIDADES: NOVO LAYOUT			
TRECHO DA LINHA DE AR: LINHA PRINCIPAL E DISTRIBUIÇÃO		COMPRIMENTO EQUIVALENTE	
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE (m)	TOTAL (m)
Curva R=2d -1 pol	3	0.3	1.5
T saída bilateral -1 pol	1	1.7	1.7
Separador de condensado	2	4	8
Válvula de gaveta - 1 pol	3	0.3	0.9
TOTAL PERDA DE CARGA - LINHA PRINCIPAL			12.1
TRECHO DA LINHA DE AR: LINHA DE SERVIÇO		COMPRIMENTO EQUIVALENTE	
DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE (m)	TOTAL (m)
Curva R=2d -1/2 pol	1	0.2	0.2
T saída bilateral - 1/2 pol	1	1	1
Válvula de gaveta - 1/2 pol	1	0.2	0.2
Conexão com pescoço de Cisne - 1/2 pol	1	1.3	1.3
TOTAL PERDA DE CARGA - LINHA DE SERVIÇO			2.7

Cálculo do comprimento equivalente das linhas de serviço

## Dados de entrada:

- Descrição da singularidade existente
- Quantidade desta singularidade
- Perda de carga em metros desta singularidade (dado proveniente de tabelas)

## Dados de saída:

- Perda de carga devido a sigularidade especificada, em metros
- Perda de carga total da linha devido as singularidades descritas, em metros

## ANEXO D – PROGRAMA COMPUTACIONAL (cont.)

### CÁLCULO DO DIÂMETRO IDEAL DAS TUBULAÇÕES

Dados principais da linha principal e distribuição

Dados preliminares baseados no comprimento nominal das tubulações

Comprimento equivalente das tubulações devido às singularidades

Cálculo do diâmetro ideal para esta rede de ar comprimido

TRECHO DA LINHA DE AR: LINHA PRINCIPAL E DISTRIBUIÇÃO		
PRESSÃO	bar	7
	kgf/cm <sup>2</sup>	7.13804
FLUXO DE AR	l/s	42.79143
	m <sup>3</sup> /min	2.567486
COMPRIMENTO DA TUBULAÇÃO	m	59.7
DADOS PRELIMINARES		
DIÂMETRO	cm	3.326263
QUEDA DE PRESSÃO	bar	0.098066
	kgf/cm <sup>2</sup>	0.1
CORREÇÃO DOS FATORES PARA PERDA DE PRESSÃO		
COMPRIMENTO DO TUBO EQUIVALENTE	m	12.1
COMPRIMENTO DO TUBO CORRIGIDO	m	71.8
DIÂMETRO	cm	3.4513307
QUEDA DE PRESSÃO	bar	0.098066
	kgf/cm <sup>2</sup>	0.1
<b>PORTANTO, O DIÂMETRO IDEAL É DE 34.5 mm PARA A LINHA PRINCIPAL E DE DISTRIBUIÇÃO</b>		
TRECHO DA LINHA DE AR: LINHA DE SERVIÇO		
PRESSÃO	bar	9
	kgf/cm <sup>2</sup>	9.17748
FLUXO DE AR	l/s	2.037687
	m <sup>3</sup> /min	0.122261
COMPRIMENTO DA TUBULAÇÃO	m	1.5
DADOS PRELIMINARES		
DIÂMETRO	cm	0.573118
QUEDA DE PRESSÃO	bar	0.02942
	kgf/cm <sup>2</sup>	0.03
CORREÇÃO DOS FATORES PARA PERDA DE PRESSÃO		
COMPRIMENTO DO TUBO EQUIVALENTE	m	2.7
COMPRIMENTO DO TUBO CORRIGIDO	m	4.2
DIÂMETRO	cm	0.704167
QUEDA DE PRESSÃO	bar	0.02942
	kgf/cm <sup>2</sup>	0.03
<b>PORTANTO, PARA A LINHA DE SERVIÇO O DIÂMETRO IDEAL É DE 7 mm</b>		

Dados de entrada:

- Pressão de regime, em bar
- Comprimento da linha analisada, em metros
- Queda de pressão admissível, em kgf/cm<sup>2</sup> (encontrada na literatura)

Dados de saída:

- Diâmetro ideal, em cm e mm, respectivamente, para a rede de ar comprimido analisada

## ANEXO D – PROGRAMA COMPUTACIONAL (cont.)

Dados de utilização da empresa e estimativa de uso em 80% do tempo

MÉDIA DE UTILIZ	DESVIO PADRÃO	VAZÃO	UNIDADE
21.396	2.139571667	23.19296	L/s
		83.49464	m³/h

Dados obtidos de catálogos e do site da Atlas Copco

**DETERMINOU-SE A VAZÃO DE 23,19 L/s**

ESCOLHA DO TIPO DE COMPRESSOR	
Vazão de Ar (m³/h)	83.95
Pressão do Compressor (bar)	12
Compressor Centrifugo Engrenado	Não
Compressor de Pistão com Inj. de Óleo	Sim
Compressor de Parafuso com Inj. de Óleo	Sim
Soprador Centrifugo Isento de Óleo	Não
Compressor Centrifugo Isento de Óleo	Não
Compressor de Pistões Isento de Óleo	Não

**APONTOU-SE OS TIPOS DE COMPRESSORES MAIS COMUNS NO MERCADO PARA ESSA VAZÃO E PRESSÃO**

**Dados de entrada:**

- Média de Utilização
- Desvio Padrão
- Pressão do Compressor

**Dados de saída:**

- Vazão de Ar
- Tipo de Compressor Existente