

**CENTRO UNIVERSITARIO DO SUL DE MINAS**

**ENGENHARIA MECÂNICA**

**FELIPE FERREIRA BUTESLOFF CARVALHO**

Biblioteca Monsenhor Domingos Prado Fonseca
N. Class. <i>M 622.55</i>
Cutter <i>C 331 m</i>
Ano/Ed. <i>2010</i>

**SISTEMA DE BIBLIOTECAS  
FEPESMIG  
BIBLIOTECA MONSENHOR DOMINGOS PRADO FONSECA**

**MELHORIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA:  
SISTEMA DE LIMPEZA DE PERFIS DE BORRACHA COM AR COMPRIMIDO**

**Varginha  
2010**

**FELIPE FERREIRA BUTESLOFF CARVALHO**

**MELHORIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA:  
SISTEMA DE LIMPEZA DE PERFIS DE BORRACHA COM AR COMPRIMIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do Prof. Mairo Mazzeu Silveira.

**Varginha  
2010**

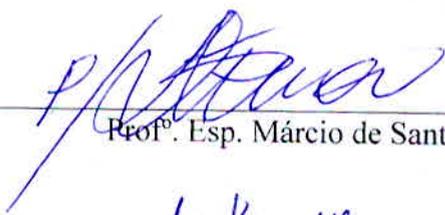
## FOLHA DE APROVAÇÃO

FELIPE FERREIRA BUTESLOFF CARVALHO

### MELHORIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: SISTEMA DE LIMPEZA DE PERFIS DE BORRACHA COM AR COMPRIMIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico pela banca Examinadora composta pelos membros: Prof. Esp. Márcio de Santana, Prof. Ms. Alexandre Soriano e Prof. Esp. Mairo Mazzeu Silveira.

Aprovado em 25/11/2010



Prof. Esp. Márcio de Santana



Prof. Ms. Alexandre Soriano



Prof. Esp. Mairo Mazzeu

OBS.:

Dedico este trabalho a minha família por ter acreditado em mim e sempre me apoiado durante todo o curso.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que me auxiliaram de alguma forma durante a realização deste trabalho seja com um simples incentivo ou com críticas e sugestões. Todas foram de fundamental importância para a conclusão deste trabalho.

Em especial ao Prof. Esp. Mairo Mazzeu Silveira, meu orientador, pelo incentivo, por acreditar em minha capacidade e pela paciência.

A Cooper Standard Automotive Brasil pela oportunidade de realização dos testes em sua linha de produção e pela disponibilização dos equipamentos para a realização dos testes.

Aos colegas de trabalho Aguinaldo Flausino, Edmilson Vicente, Ednelson de Souza, Jomar Rodrigues e Matheus Oliveira pelo apoio durante os testes.

Ao meu pai pelos conselhos e ensinamentos de vida que me trouxeram até aqui.

A minha mãe pelo carinho e dedicação que sempre teve ao cuidar de mim.

Aos familiares e amigos pelo incentivo e compreensão pela ausência.

E nunca considerem seu estudo como uma obrigação, mas sim como uma oportunidade invejável de aprender, sobre a influência libertadora da beleza no domínio do espírito, para seu prazer pessoal e para o proveito da comunidade à qual pertencerá o seu trabalho futuro.

Albert Einstein

## RESUMO

Este trabalho é um estudo para verificar o sistema combinado que utiliza ar como agente de limpeza na tiragem de micro esferas de vidro e na secagem de água depositados pelo processo de vulcanização de perfis de borracha utilizados como guarnição de porta na indústria automobilística. A tiragem destas partículas é uma preocupação no processo de fabricação pois compromete a qualidade do produto e sua aceitação pelo cliente, entretanto o sistema utilizado atualmente para esta tiragem demanda muita energia, sendo que esta não é totalmente utilizada na limpeza, gerando uma preocupação quanto a eficiência do sistema. Tendo em vista um melhor aproveitamento energético mantendo a qualidade da tiragem e da secagem de forma a não prejudicar o processo de fabricação, o trabalho busca alternativas para a geração do ar para esta limpeza além de estudar métodos e parâmetros para aplicação do mesmo. O trabalho faz um estudo da eficiência energética do sistema atual utilizado e do sistema proposto comparando-os do ponto de vista da eficiência na limpeza segundo padrões da empresa, do consumo energético e do custo de operação, ao final do trabalho propõe a troca do sistema atual pelo proposto.

**Palavras-chave:** Teste. Ar comprimido. Eficiência. Energia.

## ABSTRACT

This work is a study to verify the combined system that uses air as a cleaning agent in the printing of micro glass beads and drying of water deposited by the process of vulcanization of rubber profiles used as door trim in the auto industry. The circulation of these particles is a concern in the manufacturing process as it compromises the quality of the product and its acceptance by the client, however the system currently used for this drawing a lot of energy demand, and this is not fully utilized in the cleaning, creating a concern about efficiency. Given a better energy while maintaining the quality of drawing and drying so as not to hinder the manufacturing process, the work seeks alternatives to the generation of air cleaning for this besides studying methods and parameters for implementation. The paper studies the efficiency of the current system used and the proposed system by comparing them in terms of efficiency in the second cleaning company standards, energy consumption and operating cost at the end of the work has proposed changing the proposed by the current system.

**Keywords:** Test. Compressed air. Efficiency. Energy.

## LISTA DE FIGURAS E FOTOS

<i>Figura 1 – Diagrama tipos de compressores .....</i>	22
<i>Figura 2 – Esquema de funcionamento amplificador de ar traduzido.....</i>	24
<i>Figura 3 – Custos de uma instalação de ar comprimido .....</i>	27
<i>Foto 4 – Foto das extrusoras .....</i>	28
<i>Foto 5 – Foto forno de vulcanização .....</i>	29
<i>Foto 6 – Foto da escovadeira .....</i>	30
<i>Foto 7 – Foto dos bicos de tiragem micro esfera de vidro pós escovadeira.....</i>	30
<i>Foto 8 – Foto tanque de resfriamento e bicos para secagem.....</i>	31
<i>Figura 9 – Compressor radial.....</i>	33
<i>Foto 10 – Foto amplificador de ar .....</i>	33
<i>Foto 11 – Foto bico para teste.....</i>	34
<i>Foto 12 – Foto válvula reguladora de pressão com manômetro .....</i>	34
<i>Foto 13 – Foto amplificador de ar alimentado pela rede de ar comprimido.....</i>	35
<i>Foto 14 – Foto compressor radial com bicos.....</i>	35
<i>Foto 15 – Foto teste amplificador de ar .....</i>	44
<i>Foto 16 – Foto micro esferas de vidro depositadas no amplificador de ar .....</i>	45
<i>Foto 17 – Foto teste amplificador de ar passagem de água no perfil.....</i>	45
<i>Foto 18 – Foto compressor radial com adaptações para teste prático.....</i>	46

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Faixa de aplicação dos compressores.....</i>	23
<i>Tabela 2 – Perdas de vazão e potência por diâmetro a pressão de 6 bar.....</i>	25
<i>Tabela 3 – Perdas de ar devido a vazamentos em função do diâmetro e da pressão..</i>	25
<i>Tabela 4 – Consumo de ar comprimido de mangueiras ou tubos abertos .....</i>	26
<i>Tabela 5 – Vazamento em função da pressão e do diâmetro do orifício.....</i>	26
<i>Tabela 6 – Compressores da rede de ar comprimido.....</i>	32
<i>Tabela 7 – Tipos de tubos utilizados atualmente para tiragem e secagem. ....</i>	32
<i>Tabela 8 – Medição dos tempos de carga do compressor durante os teste para quantificar vazamentos .....</i>	41
<i>Tabela 9 – Medição dos tempos de carga do compressor durante os teste de consumo de ar comprimido dos bicos .....</i>	41
<i>Tabela 10 – Medição de pressão de trabalho.....</i>	43
<i>Tabela 11 – Potência media Compressor .....</i>	48
<i>Tabela 12 – Potência media dos secadores.....</i>	48

## LISTA DE UNIDADES

[ / ]: adimensional

**K:** Kelvin

**°C:** grau Celsius

**°F:** grau Fahrenheit

**Pa:** Pascal

**kPa:** kilopascal

**N:** Newton

**N/m<sup>2</sup>:** Newton por metro quadrado

**psi:** *pound per square inch*

**bar:** bar

**mmH<sub>2</sub>O:** milímetro de coluna d'água

**mm:** milímetro

**m:** metro

**m/s:** metro por segundo

**m<sup>3</sup>:** metro cúbico

**m<sup>3</sup>/s:** metro cúbico por segundo

**m<sup>3</sup>/min:** metro cúbico por minuto

**m<sup>3</sup>/h:** metro cúbico por hora

**ft<sup>3</sup>:** *cubic foot*

**l/s:** litros por segundo

**lpm:** litro por minuto

**slpm:** *standard liter per minute*

**cfm:** *cubic feet per minute*

**pcm:** pé cúbico por minuto

**kW:** kilowatt

**cv:** cavalo vapor

**hp:** *horse power*

**rpm:** rotações por minuto

**RS/ano:** reais por ano

**RS/m<sup>3</sup>:** reais por metro cúbico

**RS/kWh:** reais por kilowatt hora

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

**P:** Pressão [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]

**F:** Força [N]

**A:** Área [ $\text{m}^2$ ]

**P<sub>atm</sub>:** Pressão atmosférica [bar]

**P<sub>man</sub>:** Pressão manométrica [bar]

**P<sub>abs</sub>:** Pressão absoluta [bar]

**V:** Volume [ $\text{m}^3$ ]

**DLL:** Descarga de ar livre

**DLE:** Descarga efetiva

**DLP:** Descarga padrão normal

**Q:** Vazão [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

**R:** Taxa de compressão [ / ]

**V<sub>p</sub>:** Vazão perdida pelos vazamentos [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

**V<sub>c</sub>:** Vazão do compressor [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

**t<sub>i</sub>:** Tempo em carga do compressor durante a medição [s]

**t<sub>t</sub>:** Tempo total da medição [s]

**n:** numero de ciclos de carga e alívio na medição [ / ]

**ABTB:** Associação Brasileira de Tecnologia da Borracha

**USDOE:** *United States Department of Energy* (Departamento de Energia dos Estados Unidos)

**Pay back:** retorno de investimento

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	15
1.2 OBJETIVOS .....	16
1.2.1 OBJETIVO GERAL .....	16
1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	16
<b>2 REFERÊNCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE FÍSICA E TERMODINÂMICA .....	17
2.1.1 TEMPERATURA .....	17
2.1.2 PRESSÃO .....	17
2.1.3 VOLUME .....	18
2.1.4 VAZÃO .....	18
2.1.4 GASES PERFEITOS .....	19
2.1.4 GASES REAIS .....	19
2.2 AR .....	20
2.2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO AR .....	20
2.2.1.1 COMPRESSIBILIDADE .....	20
2.2.1.2 ELASTICIDADE .....	20
2.2.1.3 DIFUSIBILIDADE .....	20
2.2.1.4 EXPANSIBILIDADE .....	20
2.3 AR COMPRIMIDO .....	20
2.4 COMPRESSORES .....	21
2.4.1 CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO OS PRINCÍPIOS DE TRABALHO .....	21
2.4.1.1 DESLOCAMENTO VOLUMÉTRICO .....	21
2.4.1.2 DESLOCAMENTO DINÂMICO .....	22
2.4.1.3 TIPOS DE COMPRESSORES .....	22
2.4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO COMPRESSOR DE PARAFUSO .....	23
2.4.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO COMPRESSOR RADIAL .....	23
2.5 EQUIPAMENTOS .....	24
2.5.1 AMPLIFICADORES DE AR .....	24
2.5.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO AMPLIFICADOR DE AR .....	24
2.6 PERDAS DE AR COMPRIMIDO .....	25
2.7 CUSTOS DO AR COMPRIMIDO .....	27

<b>3 MATERIAL .....</b>	<b>28</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO .....	28
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE LIMPEZA ATUAL .....	31
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO PARA TESTE .....	32
<b>4 MÉTODO .....</b>	<b>36</b>
4.1 CONSUMO DE AR COMPRIMIDO NO PROCESSO .....	36
4.2 TESTE DE EFICIÊNCIA NA LIMPEZA .....	37
4.3 MÉTODO DE ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	37
4.4 LEVANTAMENTOS DE CUSTOS E VIABILIDADE DE TROCA .....	38
4.4.1 CALCULOS DE CUSTO DO AR COMPRIMIDO .....	38
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>40</b>
5.1 QUANTO AO CONSUMO DE AR COMPRIMIDO .....	40
5.2 QUANTO A EFICIÊNCIA NA TIRAGEM E SECAGEM .....	42
5.2.1 EFICIÊNCIA DE LIMPEZA DO SISTEMA ATUAL .....	42
5.2.1 EFICIÊNCIA DE LIMPEZA DOS SISTEMAS PROPOSTOS .....	44
5.2.1.1 EFICIÊNCIA DO SISTEMA PROPOSTO A .....	44
5.2.1.2 EFICIÊNCIA DO SISTEMA PROPOSTO B .....	46
5.2.3 COMPARAÇÕES DE EFICIÊNCIA NA LIMPEZA .....	47
5.3 QUANTO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	47
5.3.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA ATUAL .....	47
5.3.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA PROPOSTO B .....	49
5.3.3 COMPARAÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	49
5.4 QUANTO AOS CUSTOS DO AR COMPRIMIDO .....	49
5.4.1 CUSTO DE GERAÇÃO DO AR COMPRIMIDO NO SISTEMA ATUAL .....	49
5.4.1 CUSTO DE GERAÇÃO DO AR COMPRIMIDO PARA O SISTEMA PROPOSTO .....	50
5.4.3 COMPARAÇÕES DOS CUSTOS DO AR COMPRIMIDO .....	50
5.4.2 RETORNO DO INVESTIMENTO .....	51
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>52</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>53</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

O ar comprimido é uma energia de ampla utilização na indústria e uma das aplicações desta energia se faz nos processos de limpeza e secagem de produtos, onde o sopro de ar diretamente direcionado ao produto realizará a remoção de partículas indesejáveis depositadas pelo processo ou a secagem após um processo de resfriamento por imersão em água.

Apesar de ser amplamente utilizado o ar comprimido ainda tem custos elevados para sua geração, pois o compressor geralmente utiliza de um motor elétrico que converte energia elétrica em mecânica para comprimir o ar.

Sendo assim as indústrias tem em seu consumo de energia elétrica parcela expressiva destinada à produção de ar comprimido para seu processo e em muitos casos este consumo se faz muito maior do que o necessário devido à operação ineficiente do sistema.

Esta ineficiência pode estar ligada ao mau uso do ar comprimido como utilidade, por perdas em vazamentos consequentes de má conservação ou idade da instalação ou por sistemas sub-dimensionados entre outros motivos.

A otimização do uso deste recurso além de promover uma melhoria na eficiência energética, reduz o consumo e consequentemente os custos de energia, fazendo deste o objetivo de todos que façam uso desta utilidade.

### **1.1 JUSTIFICATIVA**

A maior despesa associada a uma operação de sopro de ar para limpeza é o custo de operação para produzir o ar comprimido, pois boa parte da energia gasta para a compressão do ar é perdida na forma de calor e o trabalho útil que ele pode fornecer é pequeno em relação a essa energia gasta.

Nos dias atuais é grande a preocupação quanto à eficiência energética de processos, visando à sustentabilidade do negócio. E se tratando do ar comprimido uma energia cara, há também a preocupação da aplicação eficaz do mesmo, a melhora da eficiência energética de sistemas e equipamentos operantes no processo é uma forma de reduzir o consumo excessivo de equipamentos e consequentemente o custo do processo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

O sistema aplicado para o sopro atualmente é eficiente do ponto de vista da limpeza, ou seja, é eficiente na tiragem de micro esferas de vidro e para a secagem da água, mas se analisarmos do ponto de vista energético o mesmo demanda energia em excesso e gera grande desperdício de recursos.

O trabalho propõe sistemas alternativos que realizem a limpeza com a mesma eficiência e demandem menos energia na tiragem de micro esferas e na secagem de perfis de borracha de guarnição de porta, testar na prática durante a produção a aplicação dos sistemas propostos evidenciando o mais eficiente do ponto de vista energético e também determinar pontos de melhoria para aperfeiçoar o sistema de ar comprimido da fábrica onde o estudo foi realizado.

### 1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Os objetivos específicos do trabalho consistiram em melhorar a eficiência energética do processo de tiragem e secagem dos perfis de borracha e propor a mudança do sistema mostrando sua viabilidade econômica e os benefícios envolvidos.

- Quantificar a energia desperdiçada por vazamentos;
- Quantificar a energia demandada para o processo de tiragem e secagem dos perfis;
- Propor outro sistema para realização da tiragem e secagem que mantenha os padrões definidos pela empresa, mas com melhor eficiência energética;
- Levantar o consumo do sistema proposto, para comparar suas eficiências energéticas tendo em vista a possível substituição do sistema atual para o proposto, considerando o retorno financeiro feito pelo método de *pay back* simples.

## 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Este capítulo traz as uma revisão teórica sobre os assuntos abordados no trabalho.

### 2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE FÍSICA E TERMODINÂMICA

Serão descritos conceitos básicos objetivando uma melhor condução do estudo.

#### 2.1.1 TEMPERATURA

A temperatura é a grandeza termodinâmica que indica o efeito cinético do movimento das partículas interatômicas. A avaliação desta grandeza é realizada por instrumento de medição, denominado termômetro.

As unidades mais comumente utilizadas são K (Kelvin) no sistema internacional, °C (Celsius) no sistema técnico e °F (Fahrenheit) no sistema inglês.

#### 2.1.2 PRESSÃO

A grandeza física denominada pressão é o resultado do efeito causado pela ação, no plano perpendicular, de uma força sobre uma determinada área superficial onde está aplicada a força. No caso do ar comprimido, é o resultado da força que ele exerce sobre a superfície que esta confinado.

É definida pela equação:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde, P = Pressão [Pa]

F = Força [N]

A = Área superficial onde esta aplicada a força [m<sup>2</sup>]

A unidade de pressão no sistema internacional é o N/m<sup>2</sup> ou Pa (Pascal), no sistema técnico bar e no sistema inglês psi (libras por polegada ao quadrado).

A pressão atmosférica, P<sub>atm</sub>, é a pressão que envolve o planeta terra e ao nível do mar que é referência para as medições, o valor medido pelo barômetro é de 1,013 bar.

A pressão manométrica,  $P_{man}$ , equivale à pressão de um sistema medida por um instrumento denominado manômetro, esta medição não leva em conta a pressão atmosférica local.

A pressão absoluta,  $P_{abs}$ , é a pressão medida do sistema levando-se em conta a pressão atmosférica e pode ser expressa na forma:

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm} \quad (2)$$

### 2.1.3 VOLUME

Volume de ar livre [ $m^3$ ] é o volume do ar na temperatura de 20°C e na pressão manométrica de 0 bar, que equivale à pressão absoluta de 1 bar.

Volume normal [ $Nm^3$ ] é o volume do ar a pressão absoluta e atmosférica de 1,013 bar e temperatura de 0°C. É dito volume padrão de ar normal.

Volume de ar efetivo representa o volume de ar comprimido nas condições de compressão reais. Ou seja, na pressão e na temperatura em que realmente é produzido.

A unidade no sistema internacional e no sistema técnico é o  $m^3$  (metro cúbico) e no inglês  $ft^3$  (pé cúbico).

### 2.1.4 VAZÃO

Vazão ou descarga de ar comprimido é o volume de ar comprimido produzido ao longo do tempo ou a quantidade de ar produzida em um intervalo de tempo.

Se a referência é como ar livre, denomina-se vazão ou descarga de ar livre (DLL)

Se a referência é como ar efetivo, denomina-se vazão ou descarga efetiva (DLE)

Se a referência é nas condições de padrão normal, denomina-se vazão ou descarga padrão normal (DLP)

O valor da vazão efetiva comprimida (DLE) na descarga do compressor, sendo dada a vazão padrão normal (DLP) é obtida pela equação:

$$DLE = \frac{DLP}{R} \quad (3)$$

Em que,  $R$  = a pressão manométrica do ar comprimido +1, denominada taxa de compressão.

A unidade no sistema internacional e no sistema técnico é o m<sup>3</sup>/s (metro cúbico por segundo) e no inglês cfm (pé cúbico por minuto).

#### 2.1.4 GASES PERFEITOS

Um gás que obedeça a equação,

$$\frac{p.V}{T} = \text{const.} \quad (4)$$

é denominado gás perfeito ou gás ideal, esta equação foi proposta por Clapeyron. Com esta equação mais a experiência de Avogadro, determina-se que:

$$p.V = n.R.T \quad (5)$$

onde: p: pressão

V: volume

T: temperatura

n: numero de moles da substância

R: constante universal dos gases perfeitos

#### 2.1.4 GASES REAIS

Nogueira diz que “Em certas situações o comportamento dos gases reais, não deve ser aproximado usando a equação dos gases perfeitos, a precisão não é satisfatória. Isso ocorre em pressões mais elevadas ou para baixas temperaturas. A solução para esses casos é o emprego do fator de compressibilidade (Z), definido como sendo a razão entre o volume ocupado por um gás real e o volume ocupado por um gás perfeito de mesma natureza molecular, nas mesmas condições de pressão e temperatura”. (NOGUEIRA, 2006, p.453).

Então o fator de compressibilidade Z é igual a:

$$Z = \frac{v}{v_{ideal}} \quad (6)$$

E levando em conta a definição dos gases perfeitos a equação fica:

$$p.V = Z.R.T \quad (7)$$

“Um gás perfeito tem um fator de compressibilidade igual a unidade. O afastamento desse valor fornece uma medida do desvio do comportamento apresentado por um gás real quando comparado a um gás perfeito”. (NOGUEIRA, 2006, p.454)

## 2.2 AR

### 2.2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO AR

“Apesar de insípido, inodoro e incolor, percebemos o ar através dos ventos, aviões e pássaros que nele flutuam e se movimentam; sentimos também o seu impacto sobre o nosso corpo. Concluímos facilmente que o ar tem existência real e concreta, ocupando lugar no espaço”. (PARKER, 2006, p.5)

#### 2.2.1.1 COMPRESSIBILIDADE

“O ar, assim como todos os gases, tem a propriedade de ocupar todo o volume de qualquer recipiente, adquirindo seu formato, já que não tem forma própria. Assim, podemos encerrá-lo num recipiente com volume determinado e posteriormente provocar-lhe uma redução de volume usando uma de suas propriedades - a compressibilidade. Podemos concluir que o ar permite reduzir o seu volume quando sujeito à ação de uma força exterior”. (PARKER, 2006, p.5)

#### 2.2.1.2 ELASTICIDADE

“Propriedade que possibilita ao ar voltar ao seu volume inicial uma vez extinto o efeito (força) responsável pela redução do volume”. (PARKER, 2006, p.5)

#### 2.2.1.3 DIFUSIBILIDADE

“Propriedade do ar que lhe permite misturar-se homogeneamente com qualquer meio gasoso que não esteja saturado”. (PARKER, 2006, p.5)

#### 2.2.1.4 EXPANSIBILIDADE

“Propriedade do ar que lhe possibilita ocupar totalmente o volume de qualquer recipiente, adquirindo o seu formato”. (PARKER, 2006, p.5)

## 2.3 AR COMPRIMIDO

“Ar comprimido é ar atmosférico pressurizado, o qual é condutor de energia térmica e fluxo de energia. Ar comprimido pode ser armazenado e transportado por tubulações, assim como pode executar trabalhos através da conversão de energia em motores e cilindros. A capacidade de armazenamento de suas energias é o produto do volume por unidade de tempo e pressão. O desempenho do ar comprimido como condutor de energia é aumentado quando houver maior disponibilidade desta energia por unidade de tempo e quando houver aumento da pressão”. (BOSCH, 2008, p.4)

Santos define um sistema de ar comprimido completo compreendendo 3 componentes principais. “A instalação do compressor (1) que fornece ar comprimido

para uma rede principal (2), de onde saem derivações (3) que conduzem aos pontos de consumo”. (SANTOS, 2007)

Segundo Nogueira, as vantagens do emprego do ar comprimido “[...] é que o mesmo pode ser armazenado e conduzido ao local de utilização sem necessitar de isolamento térmico, como é o caso do vapor. Não oferece riscos de incêndio ou de explosão e seu emprego se faz de forma flexível, compacta e potente”. Nogueira também aponta como principal desvantagem o “[...] maior consumo de energia que a energia elétrica na produção de um determinado trabalho útil”. (NOGUEIRA, 2006, p. 442)

## 2.4 COMPRESSORES

“O equipamento que realiza a compressão do ar ambiente é denominado compressor de ar, que transforma um tipo de energia normalmente elétrica em energia pneumática”. (METALPLAN, 2008, p.9).

Nogueira diz que os compressores são equipamentos que pertencem à classe das máquinas geradoras de fluxo com escoamento compressível, pois operam com mudanças significativas na massa específica do fluido de trabalho e que são utilizados para proporcionar a elevação da pressão de um gás ou escoamento gasoso. (NOGUEIRA, 2006, p. 443)

Silva diz que “os compressores são utilizados para obtenção de ar comprimido, com para inúmeras aplicações, tais como pintura, ferramentas pneumáticas, limpeza de peças, extração de água, etc.”. (SILVA, 1980, p.54).

### 2.4.1 CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO OS PRINCÍPIOS DE TRABALHO

Segundo Nogueira “[...] dois são os princípios construtivos no qual se fundamentam todos os compressores de uso industrial: volumétrico e dinâmico”. (NOGUEIRA, 2006, p.444)

#### 2.4.1.1 DESLOCAMENTO VOLUMÉTRICO

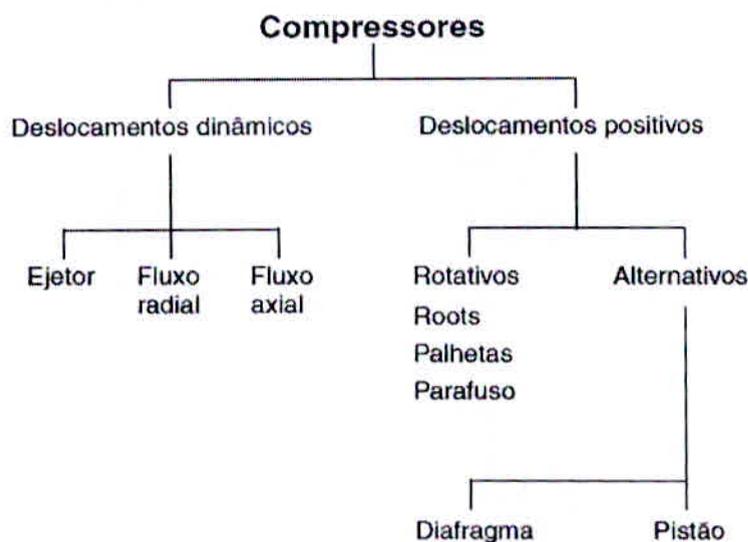
“Nos compressores volumétricos ou de deslocamento positivo, a compressão do ar é feita através da diminuição de um volume que é ocupado pelo gás. Essa operação é feita de forma intermitente em que podem ser identificadas diversas etapas formando um ciclo que repete continuamente. Primeiramente um certo volume de gás admitido no interior de uma câmara de compressão, que então é fechada. Após isso esse volume sofre redução e por consequência verifica-se um aumento da pressão. Finalmente a câmara é aberta e o gás liberado para consumo. É um processo em que a etapa de compressão é efetuada em um sistema fechado, ou seja, sem variação da massa contida dentro da câmara”. (NOGUEIRA, 2006, p.444)

### 2.4.1.2 DESLOCAMENTO DINÂMICO

“Os compressores dinâmicos, também denominados de turbocompressores, possuem dois elementos principais: o rotor e o difusor. O primeiro deles é um órgão rotativo munido de pás que transferem para o gás a energia recebida de uma fonte de potência externa. Essa transferência de energia se dá em parte na forma de velocidade e em outra parte na forma de pressão e temperatura. Posteriormente, o escoamento estabelecido pelo rotor é recebido por um conjunto de pás fixas, denominado difusor, cuja função é promover a transformação da energia cinética do gás em aumento da entalpia, com consequente ganho de pressão. Os compressores dinâmicos efetuam o processo de compressão de maneira contínua, e, portanto, correspondem ao que se denomina de um volume de controle na Termodinâmica”. (NOGUEIRA, 2006, p.444)

### 2.4.1.3 TIPOS DE COMPRESSORES

A figura abaixo ilustra a classificação dos compressores de acordo com seu princípio construtivo.



*Figura 1 - Diagrama tipos de compressores. Fonte: Parker, 2006*

A tabela a seguir apresentada por Nogueira (2006) mostra a faixa de aplicação dos compressores para atender os parâmetros de vazão pressão e razão de compressão.

Compressor	Vazão Aspirada (m <sup>3</sup> /min)	P <sub>2</sub> max (kPa)	P <sub>2</sub> /P <sub>1</sub> max
Alternativos	Até 250	250000 ou mais	4,0 (por cilindro)
Palhetas	2 a 80	900	4,0 (por carcaça)
Parafusos	10 a 700	4500	4,0 (por carcaça)
Centrífugos	50 a 2800	70000	10,0 (por carcaça de múltiplos estágios)
Axiais	1500 a 25000	1000	6,0 (por carcaça de múltiplos estágios)

*Tabela 1 - Faixa de aplicação dos compressores. Fonte: Nogueira, 2006*

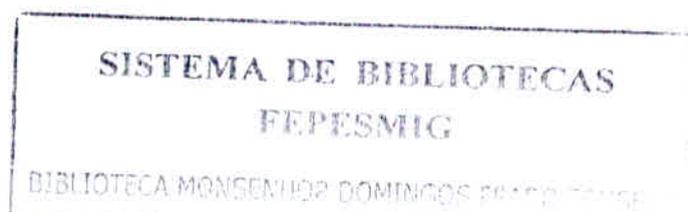
Para este estudo interessa dois tipos básicos de compressores o de parafuso e centrífugo radial que são descritos a seguir.

#### 2.4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO COMPRESSOR DE PARAFUSO

“Esse tipo de compressor possui dois rotores em forma de parafusos que giram em sentido contrário, mantendo entre si uma condição de engrenamento. A conexão do compressor com o sistema se faz através das aberturas de sucção e descarga, diametralmente opostas. O ar penetra pela abertura de sucção e ocupa os intervalos entre os filetes dos rotores. A partir do momento em que há o engrenamento de um determinado filete, o ar nele contido fica fechado entre o rotor e as paredes da carcaça. A rotação faz então com que o ponto de engrenamento vá se deslocando para a frente, reduzindo o espaço disponível para o ar e provocando a sua compressão. Finalmente, é alcançada a abertura de descarga, e o ar é liberado. A relação de compressão interna do compressor de parafuso depende da geometria da máquina e da natureza do ar, podendo ser diferente da relação entre as pressões do sistema”. (BOSCH, 2008, p.9)

#### 2.4.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO COMPRESSOR RADIAL

“Através da rotação do eixo do motor elétrico, a turbina é movimentada. O ar que estiver entre as aletas da turbina será acelerado no sentido radial e empurrado para dentro do canal lateral onde será comprimido e forçado para dentro das aletas. O ar será transportado dentro da espiral, formada pela turbina e pelo canal lateral onde será comprimido e forçado para dentro das aletas. Onde será novamente acelerado radialmente e circunferencialmente. Sucessivamente, o ar será transportado para dentro da espiral formada pela turbina e pelo canal lateral, até encontrar o ponto em que se localiza a conexão de saída através da qual será descarregado. A operação será realizada sem nenhum contato entre a turbina e a carcaça que contem canal lateral, dispensando assim a necessidade de lubrificação, o que assegura a produção de ar totalmente isenta de óleo”. (IBRAM, 2008, p.2)



## 2.5 EQUIPAMENTOS

Serão descritos os equipamentos que são usados na aplicação do ar comprimido, em casos mais específicos, como amplificadores de ar, bicos e tubos especiais.

### 2.5.1 AMPLIFICADORES DE AR

Estes equipamentos são alimentados com ar comprimido e com um pequeno consumo conseguem aumentar consideravelmente sua vazão de saída. Na figura 2 vemos o esquema de funcionamento deste equipamento.

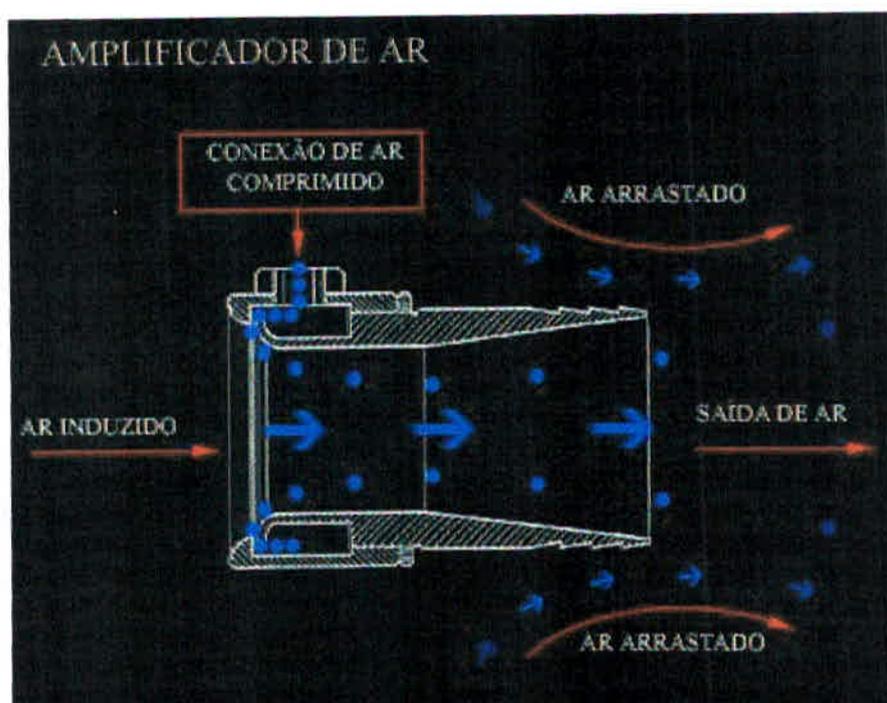


Figura 2 - Esquema de funcionamento amplificador de ar traduzido. Fonte: BACKAIR, 2009

#### 2.5.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO AMPLIFICADOR DE AR

“Funcionam pelo princípio da amplificação de fluxo de ar. O ar comprimido alcança velocidades sônicas (aprox. 300m/seg) ao passar através de uma ranhura de aproximadamente 0,10mm de largura. A velocidade do ar que sai pela ranhura anular do amplificador arrasta o ar próximo, fazendo com que uma pequena massa de ar a alta velocidade, produza uma grande massa de ar a velocidade menor. Com este princípio consegue-se que grandes volumes de ar sejam movimentados com baixíssimo consumo de ar comprimido. Através de este fenômeno físico, temos em um extremo do amplificador, pressão positiva, e no outra extrema pressão negativa. Dependendo da necessidade, o sistema poderá ser utilizado como exaustor ou soprador”. (CHP, 2005, p.15)

## 2.6 PERDAS DE AR COMPRIMIDO

“Todos os sistemas de ar comprimido estão sujeitos a vazamentos e que são comuns perdas de até 40% de todo o ar comprimido produzido”. (METALPLAN, 2008, p.9)

Para Hahn “depois da energia elétrica, o ar comprimido é a forma de energia mais consumida e onerosa na indústria de transformação. Entretanto, nem sempre os sistemas que o utilizam recebem os cuidados devidos, passando a serem fontes de constantes desperdícios. (HAHN, 2004 apud KARMOUCHE, 2009, p.20)

“Fluxos descontrolados de ar, como por exemplo, na limpeza de superfícies empoeiradas ou de roupas, contribuem enormemente para que ocorram perdas. Principalmente nas indústrias que utilizam o ar comprimido em larga escala, este gasto pode tornar-se espantoso”. (SANTOS, 2007, p.45)

Rocha e Monteiro afirmam que “os vazamentos de ar comprimido são frequentes e de origens diversas. Representam de 10% a 40% da demanda máxima de ar comprimido de um sistema”. (ROCHA E MONTEIRO, 2005, p.62)

A tabela 2 apresenta a correlação entre as perdas de vazão e potência por diâmetro do vazamento a pressão de 6 bar, a tabela 3 o consumo de ar comprimido de mangueiras ou tubos em função da pressão e do diâmetro, as tabelas 4 e 5 mostram que os vazamentos são proporcionais ao diâmetro do furo e aumentam conforme a elevação de pressão.

Diâmetro do orifício de vazamento	Vazamento (m <sup>3</sup> /min) sob pressão de 6 bar	Potência (kW) requerida para compressor
1 mm	0,06	0,3
3 mm	0,6	3,1
5 mm	1,62	8,3
10 mm	6,3	33
15 mm	25,2	132

**Tabela 2** – Perdas de vazão e potência por diâmetro a pressão de 6 bar. **Fonte:** Rocha e Monteiro, 2005

Pressão (bar)	Diâmetro do orifício					
	0,4mm	0,8mm	1,6mm	3,2mm	6,4mm	9,6mm
Vazamento (m <sup>3</sup> /min)						
4,82	0,008	0,033	0,132	0,527	2,107	4,752
5,52	0,009	0,036	0,148	0,588	2,353	5,302
6,2	0,010	0,041	0,162	0,658	2,605	5,851
6,9	0,011	0,044	0,179	0,714	2,857	6,429
8,62	0,014	0,055	0,217	0,868	3,461	7,802

**Tabela 3** - Perdas de ar devido a vazamentos em função do diâmetro e da pressão. **Fonte:** USDOE, 2004

Pressão do ar comprimido			Consumo de ar comprimido de mangueira ou tubo aberto (sem uso de bico de ar)		
PSI	BAR	VAZÃO	1/8"(3,17mm)	1/4"(6,35mm)	3/8"(9,5mm)
20	1,4	PCM	27	48	90
		LPM	764	1358	2547
40	2,8	PCM	40	75	145
		LPM	1132	2123	4104
60	4,2	PCM	55	105	190
		LPM	1557	2972	5377
80	5,6	PCM	70	140	240
		LPM	1981	3962	6792
100	7,0	PCM	85	165	300
		LPM	2406	4670	8490

**Tabela 4 - Consumo de ar comprimido de mangueiras ou tubos abertos. Fonte: CHP, 2006**

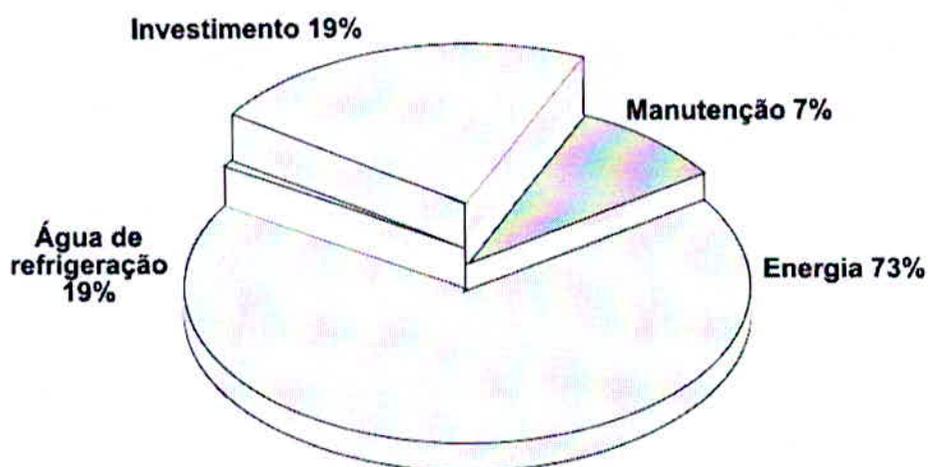
Pressão (Bar)	Diâmetro do orifício							
	0,5 mm	1,0 mm	1,5 mm	2,0 mm	2,5 mm	3,0 mm	3,5 mm	4,0 mm
	Vazamento (m <sup>3</sup> /min)							
4,5	0,748	2,992	6,731	11,96	18,69	26,95	36,64	47,86
5,0	0,816	3,263	7,343	13,05	20,39	29,37	39,97	52,516
5,5	0,884	3,535	7,955	14,14	22,09	31,81	43,30	56,56
6,0	0,952	3,807	8,567	15,23	23,79	34,26	46,64	60,91
6,5	1,020	4,079	9,179	16,31	25,49	36,71	49,97	65,26
7,0	1,088	4,351	9,790	17,40	27,19	39,16	53,30	69,62
7,5	1,156	4,623	10,40	18,49	28,89	41,60	56,63	73,97
8,0	1,224	4,896	11,01	19,58	30,59	44,05	59,96	78,39
8,5	1,292	5,167	11,62	20,66	32,29	46,60	63,29	82,67
9,0	1,360	5,439	12,23	21,75	33,99	48,95	66,62	87,02
9,5	1,428	5,711	12,85	22,84	35,69	51,40	69,96	91,37
10,0	1,496	5,983	13,46	23,93	37,39	53,84	73,29	95,72

**Tabela 5 - Vazamento em função da pressão e do diâmetro do orifício. Fonte: Hann, 2004.**

## 2.7 CUSTOS DO AR COMPRIMIDO

Rocha e Monteiro afirmam que “numa perspectiva de vida útil de 10 anos para um sistema de ar comprimido as maiores despesas na geração de ar comprimido recaem sobre a energia elétrica” (ROCHA E MONTEIRO, 2005, p.77)

A figura 3 mostra os percentuais dos custos envolvidos num sistema de ar comprimido.



**Figura 3** - Custos de uma instalação de ar comprimido. **Fonte:** Rocha e Monteiro, 2005

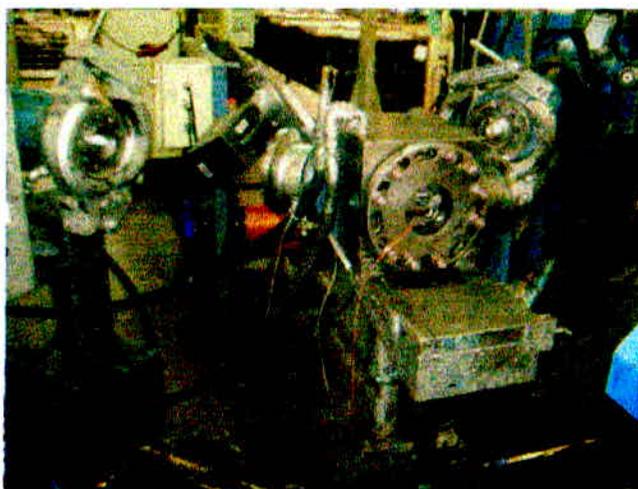
Para Rocha e Monteiro “O custo do ar comprimido é difícil de ser determinado, pois é influenciado por vários fatores além da eletricidade consumida: manutenção, área ocupada (aluguel, impostos, etc), amortização do capital, dentre outros. Para estimativas conservadoras de economia, alguns destes fatores podem ser desprezados. Apesar de tratar-se de uma aproximação, esta pode ser usada para estimar o potencial de economia de medidas de conservação”. (ROCHA E MONTEIRO, 2005, p.78)

### 3 MATERIAL

Os experimentos foram realizados na empresa Cooper Standard Automotive do Brasil, em sua unidade situada em Varginha – MG, onde são produzidos entre outros produtos, perfis de borracha utilizados na indústria automobilística como guarnição de porta.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO

No processo de extrusão de perfis de borracha aplicados na indústria automobilística como guarnição de porta, o material é processado por uma ou mais máquinas de extrusão, esta máquina extrusora de borracha é composta basicamente por uma esteira de corte aquecida, parafuso ou transportador de rosca dupla e um dado através do qual a borracha, plastificada e pressurizada é espremida, a pressão empurra a borracha através da matriz, localizada no final da extrusora.



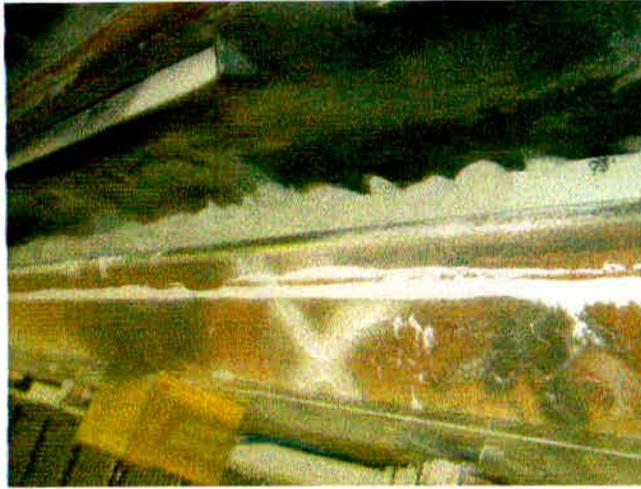
*Foto 4 – Foto das extrusoras. Fonte: O autor*

Após ser expelido, o material de borracha é aquecido para vulcanização passando por um forno de microondas até que atinja a temperatura necessária e então passa por um segundo forno que fará a vulcanização.

Segundo a ABTB (2008, p.40) “Basicamente os processos de vulcanização são divididos em dois grupos. O primeiro deles consiste do método de moldagem, que envolve a operação de dar forma ao artefato, seguido de sua reticulação. O segundo grupo inclui uma série de técnicas utilizadas para vulcanizar um artefato previamente formado. Durante a vulcanização é fornecido calor externo para a borracha a uma taxa controlada de transmissão deste calor”.

O processo utilizado para a produção na empresa onde o estudo foi realizado é o de vulcanização por leito fluidizado.

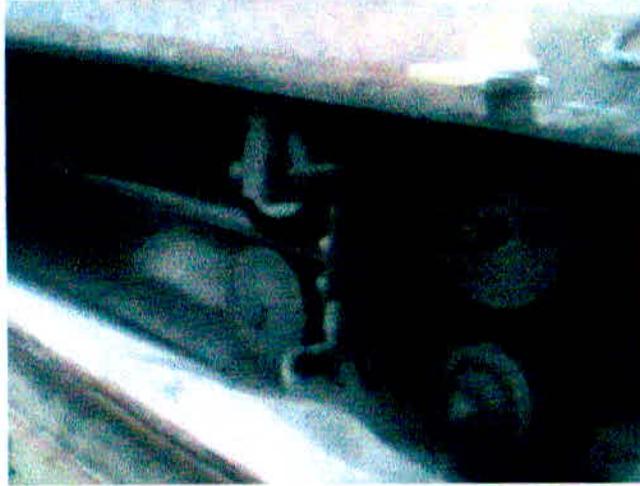
“O princípio deste processo é baseado na flotação de um meio inerte, areia ou micro esferas de vidro (ballotini) para a transmissão de calor. Leito fluidizado é um processo de vulcanização desenhado para receber o produto diretamente da extrusora. Aquecido eletricamente, este sistema transfere calor por contato do meio com o artefato, gerando pequenas distorções na superfície, mas perfeitamente aceitáveis para o uso. É utilizada temperatura de operação de até 240°C”. (ABTB, 2008, p.41)



*Foto 5 – Foto forno de vulcanização. Fonte: O autor*

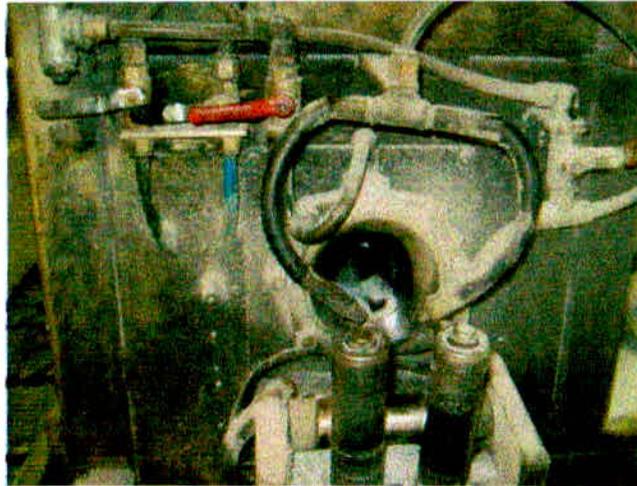
O perfil ao ter contato com as micro esferas de vidro no processo de vulcanização acaba ficando com partículas da mesma depositada, estas devem ser retiradas para que não prejudiquem na continuação do processo produtivo e consequentemente a qualidade do produto.

O processo de tiragem destas micro esferas de vidro, inicialmente é feito através de escovas com cerdas de crina de cavalo num sistema denominado escovadeira (foto 6) no qual a escova em movimento giratório passa sobre o perfil, porem este equipamento não é capaz de retirar todas as partículas depositadas, devido a geometria complexa da peça extrudada, sendo necessário um segundo sistema para a tiragem.



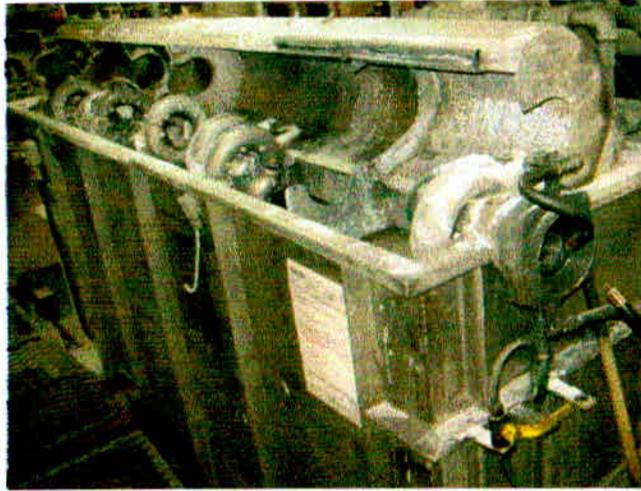
*Foto 6 – Foto da escovadeira. Fonte: O autor*

Atualmente para complementar a tiragem de micro esferas, após a etapa de escova utiliza-se sopro de ar comprimido, proveniente da rede de ar comprimido da fábrica aplicado diretamente ao perfil através de tubos (foto 7) que direcionam o fluxo de ar.



*Foto 7 – Foto dos bicos de tiragem micro esfera de vidro pós escovadeira. Fonte: O autor*

Após esta limpeza o perfil passa por um tanque de lavagem, onde bombas jogam água sobre o perfil a fim de lavá-lo e através do contato com a água reduzir sua temperatura, sendo assim, após esta etapa necessita-se de uma secagem. Esta secagem atualmente é feita pelo mesmo processo de sopro que faz a tiragem de micro esferas de vidro.



*Foto 8 – Foto tanque de resfriamento e bicos para secagem. Fonte: O autor*

A partir desta secagem o perfil segue aos demais processos de produção como impressão, furação, aplicação de adesivo, corte e prensagem que podem ser prejudicados pela presença de micro esferas de vidro ou água.

Portanto necessidade da limpeza esta ligada a atender requisitos de qualidade estabelecidos e também garantir as melhores condições de operação durante os demais processos da produção.

### **3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE LIMPEZA ATUAL**

Atualmente o ar comprimido utilizado no sopro é fornecido pela rede de ar comprimido da fábrica composta por quatro compressores (tabela 6), da rede é tirada uma ramificação para alimentação dos bicos no ponto de aplicação, ou seja, ponto onde é feito o sopro para tiragem e secagem, este ar é direcionado ao perfil através de tubos (tabela 7).

Não se sabe, quantos compressores são necessários para fornecer ar comprimido para todos os pontos de tiragem e secagem, e também verifica-se que não se sabe a melhor forma de aplicação deste ar, pois cada tanque de resfriamento tem um tipo de bico que esta trabalhando com esta limpeza e não há nenhum tipo de procedimento para a realização deste trabalho.

<b>Compressor</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Fabricante</b>	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco
<b>Modelo</b>	GA 160 100AP 440V	GA 160 100AP 440V	GA 160 100AP 440V	GA 160 100AP 440V
<b>Pressão final máxima</b>	7,4 bar	7,4 bar	7,4 bar	7,4 bar
<b>Descarga livre efetiva</b>	1677 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	1677 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	1609 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	1609 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
<b>Potencia do motor</b>	250 cv	200 cv	250 cv	250 cv
<b>Rotação máxima</b>	1780 rpm	1780 rpm	1790 rpm	1790 rpm
<b>Ano de fabricação</b>	2007	2006	1995	1995

*Tabela 6 - Compressores da rede de ar comprimido. Fonte: O autor*

<b>Tipo tubo</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Diâmetro do Tubo</b>	<b>Bico</b>
Fixoflex	250 mm	6,35 mm	Largo 22x1 mm
Aço	250 mm	6 mm	4 mm
Mangueira	250 mm	10 mm	9,6 mm

*Tabela 7 - Tipos de tubos utilizados atualmente para tiragem e secagem. Fonte: O autor.*

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO PARA TESTE

Para os testes foram disponibilizados um compressor centrifugo radial, equipamento amplificador de ar comprimido, tubos de diversas dimensões, bicos para sopro, válvula reguladora de pressão, além dos equipamentos utilizados atualmente.

Compressor radial

Turbina Ibram

Motor de indução gaiola

Modelo: CR-8

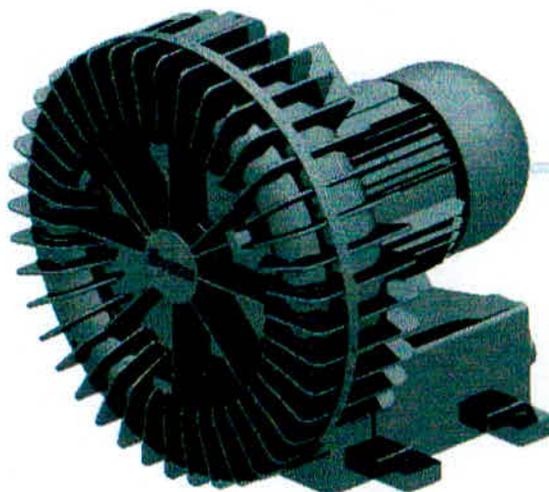
Potência: 7,5 cv

Pressão: 4000 mm H<sub>2</sub>O

Rotação: 3490 rpm

Vazão: 6 m<sup>3</sup>/min

Rendimento: 85,2%



*Figura 9 - Compressor radial. Fonte: Ibram*

Amplificador de ar

Modelo: BRJ50A

Consumo de ar a 4 bar: 962 SLPM

Diâmetro de garganta: 50 mm

Fluxo de saída: 20,666 SLPM



*Foto 10 – Foto amplificador de ar. Fonte: O autor*

Tubos e Bicos

Tubo fixoflex diâmetro: 6,35 mm, 9,05 mm, 12,70 mm

Bico largo 22x1 mm

Bico redondo diâmetro 6,35 mm



*Foto 11 – Foto bico para teste. Fonte: O autor*

Equipamentos para medições

Válvula reguladora de pressão com Manômetro de mola tubular Festo

Modelo: LR-D-MIDI

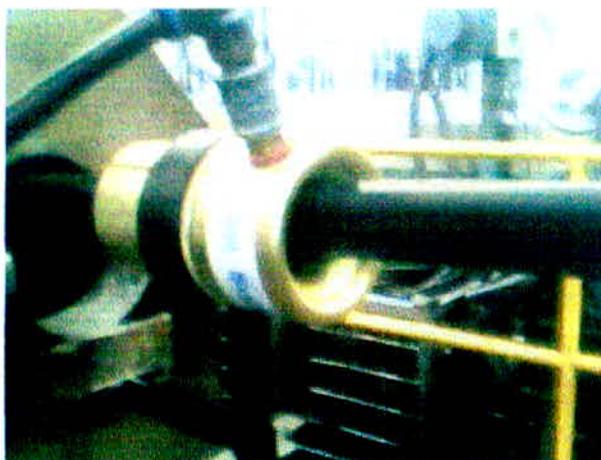
Pressão máx: 16 bar



*Foto 12 – Foto válvula reguladora de pressão com manômetro. Fonte: O autor*

A partir destes equipamentos disponibilizados foram propostas combinações referenciadas e descritas neste trabalho como sistema A e B.

- Sistema A, rede ar comprimido e equipamento amplificador de ar, dispensando o uso de tubos e bicos para direcionamento do fluxo direto ao perfil.



*Foto 13 – Foto amplificador de ar alimentado pela rede de ar comprimido. Fonte: O autor*

- Sistema B, compressor radial com a distribuição do fluxo de ar através de tubos e bicos aplicados diretamente ao perfil.



*Foto 14 – Foto compressor radial com bicos. Fonte: O autor*

## 4 MÉTODO

As tabelas de perda por vazamento apresentadas por Rocha e Monteiro, USDOE, Hann e CHP consideram a vazão de ar a uma determinada pressão para cada diâmetro de orifício do vazamento.

Este estudo considera que cada tubo com fluxo de ar livre utilizado para a limpeza neste processo, funciona como um vazamento, sendo assim considera também as tabelas apresentadas como próprias para a análise de consumo de ar dos tubos utilizados na tiragem e secagem dos perfis para as mesmas condições de pressão e dimensão.

### 4.1 CONSUMO DE AR COMPRIMIDO NO PROCESSO

Para quantificar a demanda de ar referente à operação de limpeza e secagem, exigida da rede de ar comprimido da fábrica primeiro se faz necessário quantificar as perdas por vazamento existentes na rede.

Nogueira sugere o método do tempo em carga para quantificar as perdas por vazamento na rede de ar comprimido.

Este método pode ser aplicado sem que o volume da tubulação seja conhecido, no entanto, a vazão do compressor tem que ser conhecida. Consiste em:

- Desligar todos os consumidores de ar comprimido;
- Ligar o compressor a ser utilizado para o teste e esperar que o mesmo coloque o reservatório de ar comprimido em sua pressão de trabalho normal;
- Com os consumidores desligados, mas com todas as saídas abertas, medir os tempos em carga do compressor durante pelo menos 5 ciclos da compressão (carga/alívio)
- Medir o tempo total necessário para completar os ciclos de compressão do teste

A vazão de ar comprimido que é perdida pelos vazamentos pode ser avaliada pela equação seguinte:

$$V_p = V_c \cdot \frac{\sum_{i=1}^n t_{ci}}{t_i} \quad (4)$$

Onde:  $V_p$  = Vazão perdida pelos vazamentos [m<sup>3</sup>/s]

$V_c$  = Vazão do compressor [m<sup>3</sup>/s]

$\sum t_{ci}$  = Tempo em carga, durante a medição [ s ]

$t_t$  = Tempo total de medição [ s ]  
 n = Número de ciclos de carga/alívio na medição [ / ]

#### 4.2 TESTE DE EFICIÊNCIA NA LIMPEZA

O departamento de qualidade da empresa tem o controle da ocorrência de micro esferas de vidro no perfil através de inspeção visual em 100% das peças produzidas.

Sendo assim a análise da eficiência de tiragem de micro esferas e também da secagem do perfil foi feita por inspeção visual em 100% das peças que foram produzidas durante o teste.

Para verificar a variação das condições de tiragem e secagem a pressão de trabalho foi variada através de válvula reguladora de pressão acompanhada de manômetro a fim de evidenciar a melhor condição operacional de pressão para uma eficiente tiragem e secagem.

#### 4.3 MÉTODO DE ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Rocha e Monteiro dizem que “A eficiência energética de um sistema, de maneira geral, indica o quanto um equipamento real aproxima-se de um comportamento ideal, no qual não existem perdas. Teoricamente a eficiência energética na geração de ar comprimido  $\eta$  deveria ser determinada pela quantidade de energia útil contida no ar comprimido e pela quantidade de energia gasta para sua produção. (ROCHA E MONTEIRO, 2005, p. 25)

Sendo assim devemos ter um conhecimento do sistema de ar comprimido específico da empresa e para caracterizar este sistema sugere alguns passos:

“[...] indicar a localização dos componentes do sistema de ar comprimido e as condições operacionais nominais ou de projeto (pressões, vazões, temperaturas, etc) [...] Criar um perfil dos “parâmetros operacionais” (demanda de ar comprimido, produção de ar comprimido, consumo de energia elétrica e pressão). [...] Levantar dados reais (medições). A partir da instrumentação existente ou de medições instantâneas, verificar valores reais dos parâmetros operacionais. Levantar o regime de funcionamento, picos de carga, consumo e capacidades totais e por período. Simultaneamente, deve-se contabilizar a produção e o consumo que ocorreu no período de medição. Meça seus índices de referência (consumo kW, perfil de pressão, perfil de demanda e carga de pico) e calcule a energia consumida e o seu respectivo custo.” (ROCHA E MONTEIRO, 2005 p.15)

Considerando estes passos propostos serão realizados os seguintes procedimentos para a análise de eficiência energética dos sistemas:

- Levantamento das condições nominais e operacionais de funcionamento dos sistemas;
- Levantamento de parâmetros operacionais do sistema, demanda de ar comprimido para a tiragem e secagem, a produção total de ar comprimido, consumo de energia elétrica e pressão necessária;

- Medições instantâneas de consumo em kW e de pressão durante o regime de funcionamento.

#### 4.4 LEVANTAMENTOS DE CUSTOS E VIABILIDADE DE TROCA

Uma vez testados os equipamentos será feito um levantamento dos custos de geração do ar comprimido no sistema atual e para o sistema proposto para comparação. E também será feita uma análise através do método de *pay back* simples para verificar a viabilidade de se trocar o sistema atual pelo proposto.

##### 4.4.1 CALCULOS DE CUSTO DO AR COMPRIMIDO

Para a análise se faz necessária sabermos o quanto custa à geração do ar comprimido, para tanto foram feitas medições no regime de trabalho do sistema atual.

No sistema atual temos dois regimes de trabalho do compressor, um durante a operação em carga e outro durante a operação em alívio ou em vazio, o que muda o consumo energético do compressor.

A potência nominal dos motores é conhecida, mas para calcularmos o custo precisamos da potência média, sendo assim serão necessárias medições de corrente do compressor para chegarmos a uma potência de funcionamento tanto em carga como em alívio.

A fórmula para cálculo do consumo do motor em carga é a seguinte:

$$c_{ac} = \left[ \sum_{i=1}^c (P_{cci} \cdot t_{cci}) \right] \cdot C_{kWh} \quad (5)$$

onde: $C_{ac}$ = custo anual de geração, compressor com carga	[R\$/ano]
$P_{cc}$ = potência do compressor em carga	[kW]
$t_{cc}$ = tempo de funcionamento em carga	[h/ano]
$C_{kWh}$ = custo específico da energia elétrica	[R\$/kWh]
$c$ = número de compressores do sistema	[ / ]

Para o cálculo do consumo do motor em alívio ou vazio é a seguinte:

$$c_{av} = \left[ \sum_{i=1}^c (P_{cvi} \cdot t_{cvi}) \right] \cdot C_{kWh} \quad (6)$$

Onde: $C_{av}$ = custo anual de geração, compressor em vazio	[R\$/ano]
$P_{ca}$ = potência do compressor em vazio	[kW]
$t_{ca}$ = tempo de funcionamento em vazio	[h/ano]
$C_{kWh}$ = custo específico da energia elétrica	[R\$/kWh]
$c$ = número de compressores do sistema	[ / ]

A soma dos valores de custo em carga e em alívio é o custo total anual de geração de ar comprimido na fábrica. Então:

$$C_{aa} = C_{cc} + C_{av} \quad (7)$$

Sabendo-se o custo anual de ar comprimido calcula-se o custo específico do ar comprimido através da fórmula:

$$C_{ar} = \frac{C_{aa}}{60 \sum_{i=1}^c (V_{cci} \cdot t_{cci})} \quad (8)$$

Onde: $C_{ar}$ = custo específico do ar comprimido	[R\$/m <sup>3</sup> ]
$C_{aa}$ = custo anual de geração do ar comprimido	[R\$/ano]
$V_{cc}$ = vazão do compressor	[m <sup>3</sup> /min]
$t_{cc}$ = tempo de funcionamento do compressor, em carga	[h/ano]
$c$ = número de compressores no sistema	[ / ]

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os sistemas e suas variantes de operação foram analisados quanto a sua eficiência na limpeza e pelo seu consumo energético na realização do trabalho. Foi considerado como ideal o sistema que realizou a limpeza dentro dos padrões aceitáveis da empresa com a menor quantidade de energia demandada para o trabalho.

### **5.1 QUANTO AO CONSUMO DE AR COMPRIMIDO**

Para quantificar a demanda de ar comprimido para a operação de tiragem e secagem no processo de limpeza, foi necessária a aplicação do método de medição do tempo de carga e alívio do compressor (p.36). Porém para obtenção de dados mais confiáveis primeiro foi necessário quantificar as perdas por vazamento existentes na rede de ar comprimido.

Os testes foram realizados numa parada de fábrica, ou seja, num dia em que não havia nenhum ponto de consumo de ar comprimido, foi aplicado o método de tempo em carga com todos os pontos de utilização de ar comprimido com válvulas fechadas, sendo assim somente teria consumo de ar comprimido nos pontos onde haveria perdas por vazamento.

Durante os testes o compressor estava programado para operação em alívio quando a pressão atingir 7,4 bar e operação em carga quando a pressão atingir 6,4 bar. Estes valores foram definidos a fim de facilitar o teste, pois a pressão de 7,4 bar o compressor atinge a vazão nominal.

O primeiro teste iniciou-se com apenas compressor um da rede de ar comprimido da fábrica operando, porém foi verificado que com apenas um compressor não era possível realizar o ciclo de carga e alívio e o compressor operava sempre em carga com uma pressão máxima de 5,2 bar. Então foi adicionado o compressor 2 na rede e o processo se estabilizou conseguindo fazer o ciclo de carga e alívio.

Após acertos, iniciou-se o teste quando o compressor entrou em alívio, neste momento foi acionado o primeiro cronômetro que ficou acionado até o fim do teste, outro cronômetro foi usado para medir os tempos de carga do compressor, ou seja, quando o compressor entrava em carga o cronômetro era acionado e só era pausado quando o compressor entrava em alívio, as medições foram feitas durante cinco ciclos de carga e alívio, onde no fim da quinta medição o primeiro cronômetro foi parado.

A tabela 7 mostra os tempos em carga das cinco medições feitas e o tempo total dos ciclos de carga e alívio durante o teste.

Ciclo	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>t</sub>
Tempo (s)	45	49	50	45	48	237
Tempo total teste	379					

**Tabela 8** - Medição dos tempos de carga do compressor durante os teste para quantificar vazamentos. **Fonte:** o autor

Assim obteve-se que a vazão total perdida pelos vazamentos é de 2.097,36 m<sup>3</sup>/h, ou seja, 31,91% do total da capacidade de produção da rede de ar comprimido da fábrica, que é um valor bem alto para perdas.

Sabendo-se a quantidade de ar comprimido desperdiçada por vazamentos, o método de medição do tempo em carga e alívio do compressor pode ser repetido agora com todos os pontos de aplicação de ar comprimido para tiragem e secagem em pleno funcionamento.

Para este teste, todos os pontos de utilização do ar comprimido para a tiragem e secagem de perfis foram aberto, com os compressores 1 e 2 em funcionamento não ocorria o ciclo de carga e alívio, e o compressor operava apenas em carga com uma pressão máxima de 5,6 bar, o compressor 3 foi adicionado a rede e o ciclo de carga e alívio ocorreu.

Seguindo os mesmos procedimentos de medição do tempo feitos na medição para vazamentos o teste foi feito com cinco medições do tempo de carga.

A tabela 8 apresenta os tempos das cinco medições do tempo de carga do compressor assim como o tempo total para o teste de consumo dos bicos.

Ciclo	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>t</sub>
Tempo (s)	227	215	200	202	194	1038
Tempo total teste	1139					

**Tabela 9** - Medição dos tempos de carga do compressor durante os teste de consumo de ar comprimido dos bicos. **Fonte:** o autor

Assim obteve-se o valor da demanda total de ar comprimido de 4.522,91 m<sup>3</sup>/h, subtraindo deste valor a quantidade referente a vazamentos tem-se que 2.425,55 m<sup>3</sup>/h é a demanda de ar comprimido referente ao consumo dos bicos para tiragem e secagem, ou seja, 72,32% do total gerado pelos dois compressores, ou mesmo 36,90% tudo que é produzido de ar comprimido na fábrica está ligado a operação de tiragem e secagem dos perfis.

## 5.2 QUANTO A EFICIÊNCIA NA TIRAGEM E SECAGEM

Neste tópico está descrito o desempenho dos sistemas testados e uma comparação quanto aos parâmetros de operação dos mesmos.

### 5.2.1 EFICIÊNCIA DE LIMPEZA DO SISTEMA ATUAL

Para a tiragem de micro esferas de vidro o sistema se mostrou bastante eficiente. Uma observação feita durante os testes foi quanto a real necessidade desta etapa do processo.

Cabem aqui algumas sugestões para testes futuros, como a eliminação deste sopro para tiragem de micro esferas, deixando que na etapa seguinte do processo (resfriamento a água) a água possa fazer esta tiragem complementar.

Para a secagem do perfil o sistema também é bastante eficiente, pois retira toda a água do perfil deixando-o sem resíduos em toda sua geometria, mas para isso precisa de um bom posicionamento dos bicos sobre o perfil, com uma má distribuição do sopro sobre o perfil a secagem não ocorre.

Sendo assim a análise de eficiência na tiragem e secagem dos perfis para o sistema atual se mostrou eficiente, porém sem padrão, uma das propostas do trabalho é tentar padronizar estas operações de tiragem e secagem a fim de evitar perdas.

Durante os testes foram feitas medidas de pressão de trabalho, ou seja, a pressão em que a tiragem ou a secagem estavam sendo feitas.

A pressão de trabalho encontrada embora bastante comum para vários locais, não havia nenhum tipo de padronização na operação e regulagem de trabalho, todas estavam trabalhando com a válvula aberta no máximo, ou seja, a pressão de trabalho só era limitada pela produção dos compressores, sendo assim em horários de menor consumo pelas demais áreas da fábrica esta pressão aumentava chegando até a 6 bar de pressão.

A tabela 10 mostra os resultados encontrados nestas medições para o local de aplicação o processo realizado, a quantidade de bicos e o diâmetro do bico.

Local	Ponto	Função	Quantidade de bicos	Diâmetro do bico	Pressão (bar)	
1	1	Secagem	4	6,35	3	
			1	9,5	2,8	
	2	Secagem	3	6,35	3	
			2	9,5	2,8	
2	3	Tiragem	6	6,35	1,5	
	4	Secagem	3	6,35	3	
	5	Secagem	2	9,5	2,8	
			2	6,35	3	
	6	Tiragem	4	6,35	1,5	
	7	Secagem	4	6,35	3	
	3	8	Secagem	4	6,35	3
		9	Tiragem	6	6,35	1,5
	4	10	Secagem	4	6,35	3
		11	Secagem	4	6,35	3
5	12	Tiragem	3	6,35	1,5	
	13	Secagem	4	6,35	3	
6	14	Secagem	4	6,35	3	
	15	Tiragem	5	6,35	1,5	
7	16	Secagem	8	6,35	3	
	17	Tiragem	2	6,35	1,5	
	18	Secagem	4	6,35	3	
8	19	Secagem	5	6,35	3	
	20	Secagem	3	6,35	3	
	21	Tiragem	6	6,35	1,5	
9	22	Secagem	5	9,5	2,8	
			4	12,7	2	
10	23	Secagem	2	6,35	3	
	24	Secagem	6	6,35	3	
	25	Secagem	4	6,35	3	
11	26	Secagem	3	6,35	3	
			2	9,5	2,8	
12	27	Tiragem	4	6,35	3,5	
	28	Secagem	1	9,5	2,8	
	29	Secagem	3	6,35	3	
13	30	Secagem	2	9,5	2,8	
	31	Tiragem	4	9,5	3,5	
14	32	Secagem	2	9,5	2,8	
	33	Secagem	3	6,35	3	
15	34	Secagem	2	6,35	3	

*Tabela 10 - Medição de pressão de trabalh. Fonte: o autor*

Testes variando a pressão de trabalho e inspecionando a tiragem e secagem do perfil visualmente, demonstraram que pressões superiores a 2 bar para este sistema eram suficientes para que tanto a tiragem como a secagem do perfil fosse satisfatória.

Então regular as pressões de trabalho para esta faixa é uma alternativa para diminuir a demanda de ar e conseqüentemente os gastos com energia elétrica.

## 5.2.1 EFICIÊNCIA DE LIMPEZA DOS SISTEMAS PROPOSTOS

### 5.2.1.1 EFICIÊNCIA DO SISTEMA PROPOSTO A

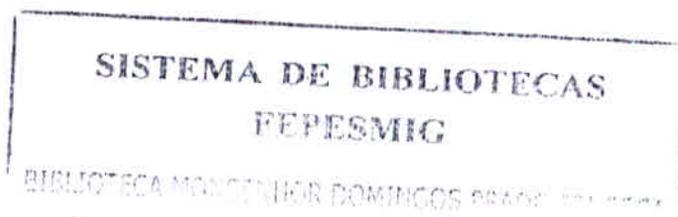
Para o sistema A, rede de ar comprimido alimentado o amplificador de ar comprimido, o fornecedor padroniza alguns parâmetros de forma a garantir o ótimo desempenho do equipamento.

Os parâmetros a seguidos foram: pressão de trabalho regulada a 4 bar, a seção externa deve estar solta da interna em torno de 20 a 30 graus. Segundo o fornecedor uma grande folga entre as seções ou se a pressão for superior a 4 bar pode resultar numa operação ineficiente e muito ruidosa. Para atender estes parâmetros foi colocada uma válvula reguladora de pressão colocada a montante do equipamento e uma escala simples de 360° foi criada de forma a orientar a folga das seções, além de desenvolver um suporte para fixação do mesmo nos pontos de aplicação.



*Foto 15 – Foto teste amplificador de ar. Fonte: O autor*

Com os parâmetros ajustados o teste foi iniciado primeiramente na tiragem de micro esferas de vidro, para as condições propostas o equipamento se mostrou capaz de fazer a tiragem das micro esferas porém, estas micro esferas acabavam ficando depositadas no equipamento (figura 14) e com o tempo este acúmulo prejudicava o funcionamento do mesmo pois obstruía as passagens de saída do ar para a limpeza.





*Foto 16 – Foto micro esferas de vidro depositadas no amplificador de ar. Fonte: O autor*

Sendo assim, para a aplicação de tiragem de micro esferas de vidro o equipamento amplificador de ar comprimido foi reprovado.

No segundo teste, agora na secagem do perfil, o equipamento também se mostrou ineficiente, pois não conseguiu fazer a secagem do perfil e ocorria o arraste da água (figura 15) que acabava molhando não só o local como o equipamento e o maquinário de processo.



*Foto 17 – Foto teste amplificador de ar passagem de agua no perfil. Fonte: Foto do autor*

Como o equipamento amplificador de ar não foi capaz de fazer a tiragem das micro esferas de vidro durante o longo tempo que o processo exige e também não foi capaz de realizar a secagem do pós resfriamento a água, o sistema A composto pela equipamento amplificador de ar comprimido alimentado pela rede de ar comprimido da fábrica foi reprovado durante os testes.

### 5.2.1.2 EFICIÊNCIA DO SISTEMA PROPOSTO B

Para a aplicação do sistema B, compressor radial alimentando bicos para aplicação direta do fluxo de ar sobre o perfil, foi necessário algumas adaptações para que o compressor pudesse ser testado de forma prática.

Um tubo foi acoplado à saída do fluxo de ar do compressor e neste tubo foram abertos cinco furos com rosca de 1/2 polegada para o encaixe de quatro bicos flexíveis e um manômetro.



*Foto 18 – Foto compressor radial com adaptações para teste pratico. Fonte: O autor*

O primeiro teste foi realizado com bicos flexíveis de 1/4 de polegada, porem ao ligar o compressor notou-se que a pressão de trabalho estava na pressão máxima, 4000 mmH<sub>2</sub>O, e também um grande aquecimento do compressor, ao desobstruir as passagens de ar notou-se que a turbina já não esquentava, portanto ficou evidente que os bicos de 1/4 de polegada estavam restringindo demais a vazão fazendo com que o compressor ficasse super aquecido.

O segundo teste foi realizado com bicos de 3/8 de polegada e o aquecimento se repetiu e novamente desobstruindo as passagens de ar notou-se que não havia mais o aquecimento, portanto os bicos de 3/8 de polegada também restringiam a vazão do equipamento.

Um terceiro teste foi feito, agora com bicos de 1/2 polegada, dessa vez não houve aquecimento excessivo do compressor e o teste pode ser levado adiante.

O teste de tiragem de micro esferas foi realizado, e o equipamento através da inspeção visual se mostrou eficiente na tiragem das micro esferas de vidro.

Para a secagem do perfil o equipamento também se mostrou eficiente, com a mesma observação do sistema atual, os bicos que direcionam o fluxo de ar, devem ser bem posicionados para que a secagem ocorra, sendo a melhor opção encontrada um bico posicionado abaixo do perfil, um acima do perfil e um em cada lateral.

### **5.2.3 COMPARAÇÕES DE EFICIÊNCIA NA LIMPEZA**

Tanto o sistema atual quanto o sistema proposto B são eficientes do ponto de vista da limpeza, ou seja, são capazes de fazer a tiragem de micro esferas de vidro e secagem do perfil quando avaliados pelo processo de inspeção visual.

O sistema proposto A foi reprovado pois se mostrou ineficiente na realização do trabalho de tiragem durante longos períodos e não conseguiu gerar pressão e vazão suficientes para realizar a secagem do perfil.

## **5.3 QUANTO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Para esta análise serão considerados apenas os sistemas eficientes tanto na tiragem como na secagem dos perfis, ou seja, sistema atual e o sistema proposto B.

### **5.3.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA ATUAL**

O sistema atual opera com quatro compressores do tipo parafuso em sua rede (tabela 5), denominados neste trabalho, compressor 1, compressor 2, compressor 3 e compressor 4.

Porém estas potências são as nominais, e não condizem com as potências de trabalho, para efeito de cálculo, foram feitas medições de corrente destes motores operando em carga e em alívio para chegarmos a potências médias de trabalho, conforme a tabela 10.

Equipamento	Potência média (kW)	
	Carga	Alívio
Compressor 1	114,4	61,6
Compressor 2	114,4	55,4
Compressor 3	118,8	58,5
Compressor 4	118,8	55,4
Potência total	466,4	230,9

**Tabela 11** - Potência média Compressor. **Fonte:** o autor

Mas os compressores não são a única fonte consumidora de energia na rede de ar comprimido, os equipamentos secadores de ar também consomem energia para realizar a secagem do ar.

Portanto o mesmo levantamento foi feito para os secadores.

Equipamento	Secador 1	Secador 2	Secador 3	Secador 4
Potência (kW)	4,476	8,579	7,6	6,3
Potência total (kW)	26,955			

**Tabela 12** - Potência média dos secadores. **Fonte:** o autor

Conforme visto no capítulo 5.1 a demanda necessária de ar comprimido é de 2425,55 m<sup>3</sup>/h ou 40,42 m<sup>3</sup>/min, demanda esta que pode ser atendida por dois compressores, assim considerando os compressores 1 e 2 para a geração deste volume de ar a 7,4 bar, uma potência aplicada de 467,75 cv e potência efetiva de 241,85 kW, considerando os compressores e seus respectivos secadores, mas vale ressaltar que nem todo o volume gerado pelos dois compressores é consumido pelos bicos, porem na atual configuração do sistema é necessário os dois funcionando.

O volume médio de ar gerado pelos quatro compressores no ano é de 41.020.386,30 m<sup>3</sup>, com um consumo total de 3.407.372,21 kW, portanto um consumo específico de 0,0831 kW/m<sup>3</sup>.

No capítulo 5.2.1 vimos que apesar de o sistema operar com várias pressões, a pressão mínima necessária para uma tiragem e secagem eficiente é de 2 bar.

### 5.3.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA PROPOSTO B

Para a aplicação do sistema proposto B, seriam necessários 34 compressores radiais, um para cada ponto de aplicação de tiragem ou secagem. Cada compressor opera com um motor de 7,5 cv totalizando 255cv de potência aplicada e funcionando com potência média de 3,25kW totalizando 110,5 kW de potência efetiva. Portanto um consumo específico de  $0,0090\text{m}^3/\text{kW}$ .

Estes compressores operam com vazão de  $6\text{ m}^3/\text{min}$ , ou seja num total de 34 compressores,  $204\text{ m}^3/\text{min}$  e sua pressão de trabalho é de  $4000\text{ mmH}_2\text{O}$  ou 0,36 bar.

### 5.3.3 COMPARAÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Com o consumo específico e a vazão demandada pelos bicos foi calculado o consumo energético operando durante 6244 horas em carga, onde obteve-se 1.257.482,18 kW de consumo anual do sistema atual e para o sistema proposto B um total de 830.076 kW portanto evidenciou-se um consumo de 33,99% de energia para a realização do mesmo trabalho com a mesma eficiência na tiragem e secagem de micro esferas.

O sistema atual trabalha com pressões medias de 3 bar que variam conforme a demanda de ar do restante da fábrica, o sistema proposto opera com uma pressão máxima de 0,36 bar mas compensa isso com uma vazão aproximadamente seis vezes maior. Esta vazão bem superior no sistema B também explica o consumo específico bem menor.

A potência aplicada para a geração de trabalho no sistema B é 45,48% menor que a potência aplicada no sistema atual e a potência efetiva 54,31%, esta grande diferença de potência é refletida no custo de geração do ar comprimido, conforme cálculos do próximo capítulo.

## 5.4 QUANTO AOS CUSTOS DO AR COMPRIMIDO

Neste capítulo compararemos os custos de geração do ar comprimido dos sistemas.

### 5.4.1 CUSTO DE GERAÇÃO DO AR COMPRIMIDO NO SISTEMA ATUAL

Para esta análise serão considerados os dados para um ano de operação, seguindo:

- Tempo de funcionamento em um ano: 7.512 horas
- Tempo médio em carga: 6.244 horas

- Potência média dos compressores em carga: 116,6 kW
- Potência média dos compressores em alívio: 57,73 kW
- Potência média dos secadores: 6,74 kW
- Custo energia elétrica: 0,3094 kW/h

Aplicando a equação 5, do capítulo 4.4.1, temos o custo anual de geração do ar comprimido para o compressor funcionando em carga de R\$ 900.976,01

Aplicando a equação 6, do capítulo 4.4.1, temos o custo anual de geração do ar comprimido para o compressor funcionando em alívio de R\$ 101.194,18

Pela equação 7, do capítulo 4.4.1, temos que o custo anual total de geração do ar comprimido é de R\$ 1.002.170,19

Portanto pela equação 8, do capítulo 4.4.1, o custo específico do ar comprimido é de 0,0244 R\$/m<sup>3</sup>.

A vazão demandada pelos bicos é de 2425,55 m<sup>3</sup>/h, então seu consumo anual de ar comprimido para limpeza é 15.138.470,82 m<sup>3</sup>/ano e seu custo anual de R\$ 319.925,09.

#### **5.4.1 CUSTO DE GERAÇÃO DO AR COMPRIMIDO PARA O SISTEMA PROPOSTO**

Para esta análise serão considerados os seguintes dados:

- Tempo de funcionamento em um ano: 7512 horas
- Potência média dos compressores radiais: 3,25 kW
- Custo específico da energia: 0,3094 R\$/kWh
- Total de turbinas: 34

Portanto, o custo total de geração do ar pelo sistema proposto B é de R\$ 256.825,51 gerando em um ano o total de 91.946.880 m<sup>3</sup> de ar comprimido então seu custo específico é de 0,0028 R\$/m<sup>3</sup>.

#### **5.4.3 COMPARAÇÕES DOS CUSTOS DO AR COMPRIMIDO**

O sistema proposto B, consome aproximadamente 33,99% menos em energia que o sistema atual, ou seja, traria uma economia anual de R\$ 113.022,88.

Da mesma forma que o consumo específico de energia o custo específico do ar para o sistema B é muito menor, pois a vazão gerada pelo sistema proposto é muito superior porem com menor pressão.

#### 5.4.2 RETORNO DO INVESTIMENTO

Para esta análise foram considerados:

- Custo de aquisição de 34 compressores radiais: R\$ 122.158,60
- Economia anual de: 113.022,88

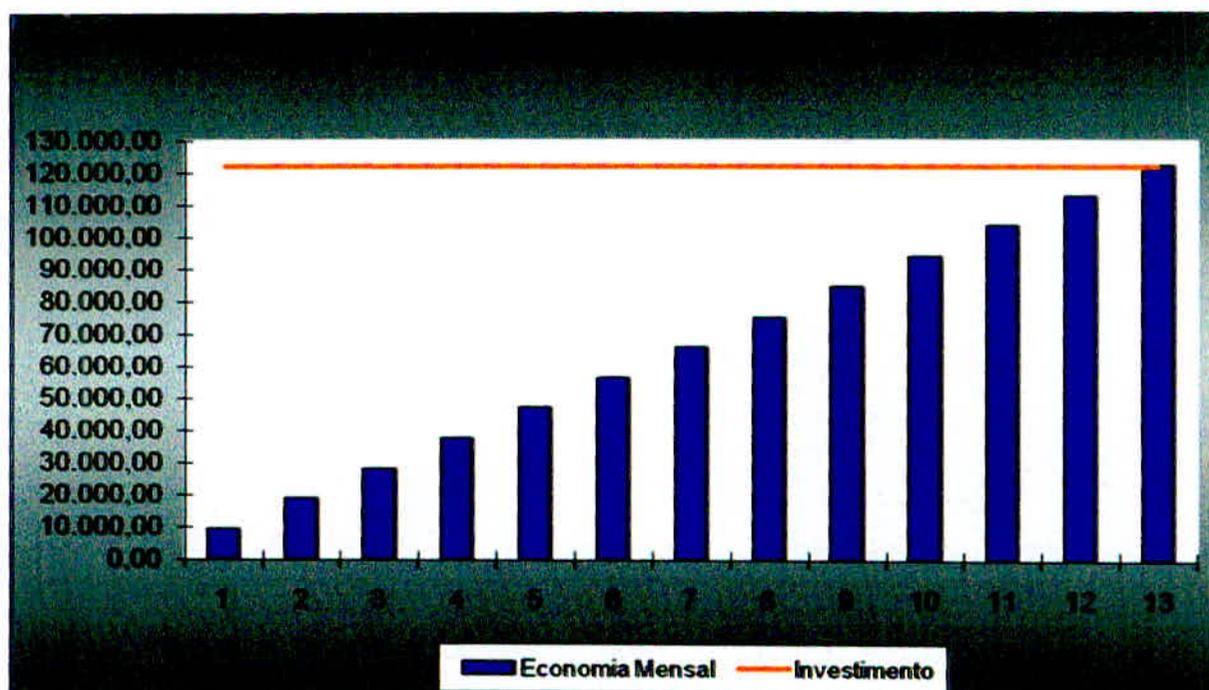


Gráfico 1 - Retorno de investimento pelo método de payback simples. Fonte: O autor.

Conforme o gráfico demonstra, o retorno financeiro do investimento da compra dos novos compressores feito pelo método *pay back* simples, seria de 13 meses.

## 6 CONCLUSÃO

O propósito deste trabalho foi estudar um processo que utiliza ar comprimido como agente na tiragem de micro esferas de vidro e na secagem de água de perfis de borracha utilizados como guarnição de porta na indústria automobilística.

No término deste trabalho conclui-se que o sistema atual do ponto de vista de eficiência na tiragem e secagem dos perfis atende aos requisitos de qualidade da empresa mas do ponto de vista energético demanda energia em excesso.

O sistema proposto A, não foi capaz de realizar a tiragem de micro esferas de vidro, pois as mesmas acabavam depositas no equipamento e prejudicavam seu funcionamento, para a aplicação de secagem o sistema também não foi capaz de retirar a água do perfil o que o reprovou durante os testes de eficiência de limpeza.

O sistema proposto B, se mostrou capaz de realizar a tiragem e secagem dos perfis dentro dos padrões de inspeção visual da empresa e do ponto de vista energético se mostrou mais econômico e vantajoso que o sistema atual, pois com uma potência total aplicada 45,48% menor que o sistema atual realizou o trabalho. Os custos de geração de ar comprimido também são 33,99% menores em relação ao sistema atual. A viabilidade de troca do sistema analisada pelo método de *pay back* simples revelou um retorno de investimento em 13 meses na forma de economia com a energia elétrica.

Pode ser citada ainda como vantagem do sistema proposto B em relação ao sistema atual a grande flexibilidade que oferece do ponto de vista de manutenção, visto que hoje se houver algum problema com os compressores da rede de ar comprimido da fábrica, todo o processo que necessita do ar pode ser comprometido, enquanto que o sistema B por ter compressores específicos para cada aplicação teria complicações somente nos pontos com problema no compressor.

Desta forma o autor conclui que o sistema proposto é uma opção mais vantajosa que o sistema atual, de fácil aplicação e que trará retorno rápido a empresa, tornando a mais competitiva e comprometida com o consumo energético racional do seu sistema de ar comprimido.

## 7 REFERÊNCIAS

ABTB. **Processos de vulcanização**. Artigos Associação Brasileira de Tecnologia da Borracha. Disponível em: <[http://www.borrachaatual.com.br/abtb/66/abtb\\_ed66.pdf](http://www.borrachaatual.com.br/abtb/66/abtb_ed66.pdf)>. Acesso em: 03/05/2010.

ATLAS COPCO. **Compressores elétricos**. Technical Data GA 160 Electric Compressor. Disponível em:<<http://www.atlascopco.com/specialtyrental/compressedair/electric/ga160/>>. Acesso em: 15/04/2010.

BOSCH. **Tecnologia de ar comprimido**. Manual ar comprimido. Disponível em: <[http://www.bosch.com.br/br/ferramentas\\_pneumaticas/produtos/downloads/ManualPneumatica\\_ARComprimido.pdf](http://www.bosch.com.br/br/ferramentas_pneumaticas/produtos/downloads/ManualPneumatica_ARComprimido.pdf)>. Acesso em: 30/05/2010.

CHP. **Amplificadores de ar**. Central Hidráulica e Pneumática. Disponível em: <<http://www.chp.com.br/novo/site/fabricantes.aspx?idFabricante=5&idDetalheProduto=25&numDetalhe=02>>. Acesso 08/06/2010.

IBRAM. **Compressor radial**. Linha de produtos Compressores radiais CR. Disponível em: <[http://www.ibram.ind.br/compressor\\_radial\\_cr.php](http://www.ibram.ind.br/compressor_radial_cr.php)>. Acesso 15/04/2010

KARMOUCHE, Andrea Romero. **Análise de eficiência energética em compressores a pistão em sistema de ar comprimido**. Disponível em: <[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=161597](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=161597)>. Acesso em: 08/09/2010

METALPLAN. **Ar comprimido**. Manual ar comprimido. 3ª ed. 2008. Disponível em: <[http://www.metalplan.com.br/pdf/br2/manual\\_de\\_ar\\_comprimido.pdf](http://www.metalplan.com.br/pdf/br2/manual_de_ar_comprimido.pdf)>. Acesso em: 30/05/2010.

NOGUEIRA, Fabio José Horta. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. Itajubá. 3ª ed. 2001.

PARKER. **Dimensionamento de redes de ar comprimido**. Disponível em:  
<<http://www.parkerstoretaubate.com.br/catalogos/Treinamento/M1004%20BR%20Ap.pdf>>.

Acesso em: 03/05/2010.

ROCHA, Carlos Roberto; MONTEIRO, Marcos Aurélio Guimarães. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido: Manual prático**. Rio de Janeiro, Eletrobrás, 2005.

SANTOS, Valdir Aparecido dos. **Manual prático da manutenção industrial**. 2ª ed. São Paulo. 2007. Editora Ícone.

SILVA, Remy Benedito. **Compressores, bombas de vácuo e ar comprimido**. 2ª ed. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1980.

USDOE. **Energy Tips – Compressed Air**. Minimize compressed air leaks. Disponível:  
<[http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/compressed\\_air3.pdf](http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/compressed_air3.pdf)>