

# PROCEL INDÚSTRIA

EDIÇÃO S E R I A D A

# 4

## COMPRESSORES

### GUIA BÁSICO

2009



# COMPRESSORES

## GUIA BÁSICO

2009

© 2008. CNI – Confederação Nacional da Indústria

IEL – Núcleo Central

ELETOBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

#### **ELETOBRÁS**

##### **Centrais Elétricas Brasileiras S.A.**

Av. Presidente Vargas, 409, 13º andar, Centro

20071-003 Rio de Janeiro RJ

Caixa Postal 1639

Tel 21 2514-5151

www.eletobras.com

eletoabr@eletobras.com

#### **INSTITUTO EUVALDO LODI**

##### **IEL/Núcleo Central**

Setor Bancário Norte, Quadra 1, Bloco B

Edifício CNC

70041-902 Brasília DF

Tel 61 3317-9080

Fax 61 3317-9360

www.iel.org.br

#### **PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**

Av. Rio Branco, 53, 14º, 15º, 19º e 20º andares

Centro, 20090-004 Rio de Janeiro RJ

www.eletobras.com/procel

procel@eletobras.com

Ligação Gratuita 0800 560 506

#### **CNI**

##### **Confederação Nacional da Indústria**

Setor Bancário Norte, Quadra 1, Bloco C

Edifício Roberto Simonsen

70040-903 Brasília DF

Tel 61 3317- 9001

Fax 61 3317- 9994

www.cni.org.br

Serviço de Atendimento ao Cliente – SAC

Tels 61 3317-9989 / 61 3317-9992

sac@cni.org.br

#### **PROCEL INDÚSTRIA – Eficiência Energética Industrial**

Av. Rio Branco, 53, 15º andar, Centro

20090-004 Rio de Janeiro RJ

Fax 21 2514-5767

www.eletobras.com/procel

procel@eletobras.com

Ligação Gratuita 0800 560 506

C737

Compressores: guia básico / Eletrobrás [et al.]. Brasília : IEL/NC, 2009.

138 p. : il.

ISBN 978-85-87257-34-5

1. Acionamento eletrônico 2. Conversor de energia I. Eletrobrás II. CNI – Confederação Nacional da Indústria III. IEL – Núcleo Central IV. Título.

CDU: 621.51

## ELETROBRÁS / PROCEL

### Presidência

José Antônio Muniz Lopes

### Diretoria de Tecnologia

Ubirajara Rocha Meira

### Departamento de Projetos de Eficiência Energética

Fernando Pinto Dias Perrone

### Divisão de Eficiência Energética na Indústria e Comércio

Marco Aurélio Ribeiro Gonçalves Moreira

## CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI

### Presidente

Armando de Queiroz Monteiro Neto

## INSTITUTO EUVALDO LODI – IEL / NÚCLEO CENTRAL

### Presidente do Conselho Superior

Armando de Queiroz Monteiro Neto

### Diretor-Geral

Paulo Afonso Ferreira

### Superintendente

Carlos Roberto Rocha Cavalcante

## Equipe Técnica

---

### ELETROBRÁS / PROCEL

#### Equipe PROCEL INDÚSTRIA

Alvaro Braga Alves Pinto

Bráulio Romano Motta

Carlos Aparecido Ferreira

Carlos Henrique Moya

Humberto Luiz de Oliveira

Lucas Vivaqua Dias

Marília Ribeiro Spera

Roberto Piffer

Roberto Ricardo de Araujo Goes

#### Colaboradores

George Alves Soares

Vanda Alves dos Santos

### CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI

#### DIRETORIA EXECUTIVA – DIREX

#### Diretor

José Augusto Coelho Fernandes

#### Diretor de Operações

Rafael Esmeraldo Lucchessi Ramacciotti

#### Diretor de Relações Institucionais

Marco Antonio Reis Guarita

#### Unidade de Competitividade Industrial – COMPI

#### Gerente-Executivo

Maurício Otávio Mendonça Jorge

#### Gerente de Infra-Estrutura

Wagner Ferreira Cardoso

#### Coordenação Técnica

Rodrigo Sarmiento Garcia

### SUPERINTENDÊNCIA DE SERVIÇOS COMPARTILHADOS – SSC

#### Área Compartilhada de Informação e Documentação – ACIND

#### Normalização

Gabriela Leitão

### INSTITUTO EUVALDO LODI – IEL / NÚCLEO CENTRAL

#### Gerente-Executivo de Operações

Júlio Cezar de Andrade Miranda

#### Gerente de Desenvolvimento Empresarial – GDE

Diana de Mello Jungmann

#### Coordenação Técnica

Patrícia Barreto Jacobs

#### Gerente de Relações com o Mercado – GRM

Oto Morato Álvares

#### Responsável Técnico

Ana Amélia Ribeiro Barbosa

### SENAI / DN

#### Gerente-Executivo da Unidade de Educação Profissional

#### – UNIEP

Alberto Borges de Araújo

#### Apoio Técnico

Diana Freitas Silva Néri

#### Gerente-Executiva da Unidade de Relações com o Mercado

#### – UNIREM

Mônica Côrtes de Domênico

### SENAI / MG

#### Conteudistas

Luiz Sérgio Marques Rabelo

Rogério de Melo Maciel

#### Pedagoga

Xênia Ferreira da Silva

#### Coordenação do projeto pelo SENAI / MG

Cristiano Ribeiro Ferreira Jácome

---

#### Supervisão Pedagógica

Regina Averbug

#### Editoração Eletrônica

Link Design

#### Revisão Gramatical

Marluce Moreira Salgado



# SUMÁRIO

## Apresentação

### Capítulo 1 – Histórico do uso do ar comprimido 13

### Capítulo 2 – Uso do ar comprimido: vantagens e desvantagens 19

### Capítulo 3 – Pressão atmosférica: fundamentos 25

#### Pressão 26

Pressão atmosférica 28

Manômetros 30

Manômetro Tipo *Bourdon* 32

Pressostatos 35

Pressostato de baixa 36

Pressostato de alta 37

Pressostato de óleo 38

Leis dos gases perfeitos 39

Teoria cinética dos gases 39

Variáveis do estado de um gás 40

Transformações gasosas 41

Lei física dos gases 41

Lei de *Boyle-Mariotte* 41

Primeira Lei de *Gay-Lussac* 43

Lei de *Charles* ou Segunda Lei de *Gay-Lussac* 45

Gás perfeito ou gás ideal 46

### Capítulo 4 – Classificação, descrição e características de compressores 53

#### Tipos de compressores 54

Compressor de êmbolo com movimento linear 55

Compressor de êmbolo 55

Compressor de membrana (diafragma) 57

Compressores de êmbolo rotativo 58

Compressor rotativo multicelular 58

Compressor helicoidal de dois eixos (duplo parafuso) 59

Compressor <i>Root</i>	59
Turbocompressores	60
<b>Diagrama de volume e pressão fornecidos</b>	<b>61</b>
<b>Critérios para a escolha de compressores</b>	<b>62</b>
Volume de ar fornecido	63
Pressão	63
Acionamento	64
Regulagem	64
Regulagem de marcha vazia	64
Regulagem por descarga	64
Regulagem por fechamento	65
Regulagem por garras	66
Regulagem de carga parcial	66
Regulagem por rotação	66
Regulagem por estrangulamento	66
Regulagem intermitente	67
Refrigeração	67
Localização de montagem	68

## **Capítulo 5 – Lubrificação 73**

Tipos de óleos utilizados nos compressores	75
--	----

## **Capítulo 6 – Vazamentos 79**

Medição de vazamentos de ar comprimido	83
Medição por diferencial de pressão no reservatório	83

## **Capítulo 7 – Captação de ar para compressão 89**

Percentual de perdas por temperaturas elevadas na captação do ar	92
Tabela auxiliar	92
Custo devido à temperatura elevada na captação de ar	93
Preparação de ar comprimido	93
Resfriadores ou trocadores de calor	93
Secadores	94
Projeto, instalação e manutenção de ar comprimido	96
Tubulações	96
<b>Redes de distribuição de ar</b>	<b>97</b>
Rede de distribuição em circuito aberto	97
Rede de distribuição em circuito fechado	98

Rede combinada	98
<b>Armazenamento do ar comprimido</b>	<b>100</b>
Dreno de água	102
Registro para descarga de ar	102
Tampa de inspeção	102
Registro geral	102
Manômetro	102
Termômetro	103
Válvula de segurança	103
Válvula de retenção	103
Pressostato	104
Válvula piloto	104
Válvula de descarga	105
Reservatório de ar comprimido	105

## **Capítulo 8 – Cuidados na instalação de compressores 111**

### **Manutenção de compressores 114**

Procedimentos de manutenção 114

### **Defeitos em compressores e possíveis causas 115**

Temperatura elevada 115

Barulho excessivo 115

Irregularidades no regime de trabalho 116

Consumo excessivo de óleo lubrificante 116

Presença de óleo no ar comprimido 117

Desgaste excessivo das correias 117

Temperatura elevada do ar comprimido 117

Irregularidade no comando elétrico 118

### **Vista explodida de um compressor 118**

## **Referências 123**

### **Anexos 125**

Anexo A – Tipos de óleos lubrificantes 125

Anexo B – Tabelas de conversão de unidades 126

Anexo C – Perda percentual devido a temperaturas elevadas 129

Anexo D – Perda percentual devido à pressão elevada 131

Anexo E – Perdas devido a vazamentos 134

Anexo F – *Check list* diagnóstico de defeitos, causas e soluções em unidade central de ar comprimido 136



# APRESENTAÇÃO

---

**O** obter a eficiência energética significa utilizar processos e equipamentos que sejam mais eficientes, reduzindo o desperdício no consumo de energia elétrica, tanto na produção de bens como na prestação de serviços, sem que isso prejudique a sua qualidade.

É necessário conservar e estimular o uso eficiente da energia elétrica em todos os setores socioeconômicos do Brasil, sendo de grande importância para o País a adoção efetiva de medidas de economia de energia e o consequente impacto destas ações. Neste cenário destaca-se a indústria, não só pelo elevado potencial de conservação de energia do seu parque, como também pela sua capacidade produtiva como fornecedora de produtos e serviços para o setor elétrico.

No âmbito das ações que visam criar programas de capacitação voltados para a obtenção de eficiência energética no setor industrial, inclui-se o *Curso de Formação de Agentes Industriais de Nível Médio em Otimização de Sistemas Motrizes*. Este curso tem como objetivo capacitar agentes industriais, tornando-os capazes de identificar, propor e implementar oportunidades de redução de perdas nas instalações industriais de sistemas motrizes.

O curso faz parte do conjunto de ações que vêm sendo desenvolvidas pelo governo federal para:

- Fomentar ações de eficiência energética em sistemas motrizes industriais;
- Facilitar a capacitação dos agentes industriais de nível médio dos diversos subsetores da indústria, para desenvolverem atividades de eficiência energética;
- Apresentar as oportunidades de ganhos de eficiência energética por meio de economia de energia em sistemas motrizes industriais;
- Facilitar a implantação de tecnologias eficientes sob o ponto de vista energético, além da conscientização e da difusão de melhores hábitos para a conservação de energia.

Como apoio pedagógico para este curso foram elaborados os seguintes guias técnicos:

- 1 – Correias Transportadoras
- 2 – Acoplamento Motor Carga
- 3 – Metodologia de Realização de Diagnóstico Energético
- 4 – Compressores
- 5 – Ventiladores e Exaustores
- 6 – Motor Elétrico
- 7 – Energia Elétrica: Conceito, Qualidade e Tarifação
- 8 – Acionamento Eletrônico
- 9 – Bombas
- 10 – Análise Econômica de Investimento
- 11 – Instrumentação e Controle

Este material didático – Compressores – faz parte do conjunto de guias técnicos do *Curso de Formação de Agentes Industriais de Nível Médio em Otimização de Sistemas Motrizes*. Ele é um complemento para o estudo, reforçando o que foi desenvolvido em sala de aula. É também uma fonte de consulta, onde você, participante do curso, pode rever e relembrar os temas abordados no curso.

Todos os capítulos têm a mesma estrutura. Conheça, a seguir, como são desenvolvidos os capítulos deste guia.

- **Iniciando nossa conversa** – texto de apresentação do assunto abordado no capítulo.
- **Objetivos** – informa os objetivos de aprendizagem a serem atingidos a partir do que foi desenvolvido em sala de aula e com o estudo realizado por meio do guia.
- **Um desafio para você** – apresenta um desafio: uma situação a ser resolvida por você.

- **Continuando nossa conversa** – onde o tema do capítulo é desenvolvido, trazendo informações para o seu estudo.
- **Voltando ao desafio** – depois de ler, analisar e refletir sobre os assuntos abordados no capítulo, você retornará ao desafio proposto, buscando a sua solução à luz do que foi estudado.
- **Resumindo** – texto que sintetiza os principais assuntos desenvolvidos no capítulo.
- **Aprenda mais** – sugestões para pesquisa e leitura, relacionadas com o tema do capítulo, visando ampliar o que você aprendeu.

Esperamos que este material didático contribua para torná-lo um cidadão cada vez mais consciente e comprometido em alcançar a eficiência energética, colaborando, assim, para que o país alcance as metas nesse setor e os conseqüentes benefícios para a sociedade brasileira e o seu meio ambiente.



# Capítulo 1

---

## HISTÓRICO DO USO DO AR COMPRIMIDO

### Iniciando nossa conversa

Os modernos processos industriais de fabricação trazem a necessidade de produção do ar comprimido, tornando a aplicação de compressores imprescindível para o funcionamento destas máquinas. Para a utilização de forma racional dessa matéria-prima, o ar comprimido, é necessário ter conhecimentos mínimos dos princípios básicos da física e de suas propriedades quando aplicados à pneumática.

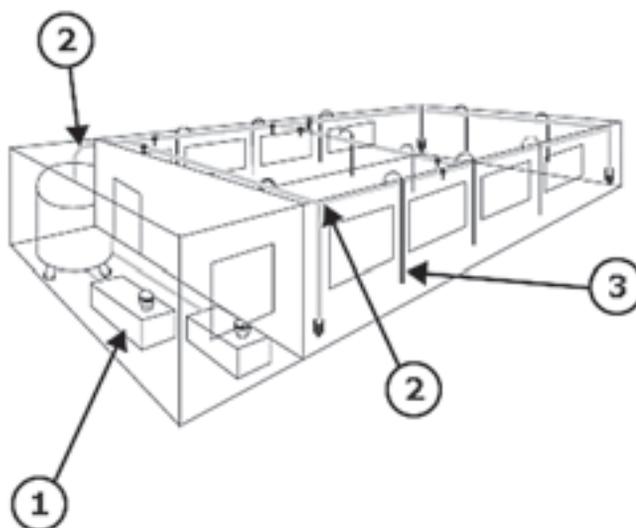
### Objetivo

O estudo dos temas abordados neste capítulo tem por objetivo:

- Estudar a origem do emprego do ar comprimido.

### Um desafio para você

A Figura 1 representa uma unidade de geração de ar comprimido com suas linhas de distribuição. Identifique e explique as etapas de produção do ar comprimido.

**Figura 1 – Unidade de geração, distribuição e consumo de ar comprimido**

### Continuando nossa conversa

A necessidade de uma fonte de ar extra para determinados serviços é antiga. Pode-se imaginar um homem das cavernas abanando a sua fogueira para mantê-la acesa ou aumentar a potência do fogo. No século 4.500 a.C. já era conhecido o fole manual, utilizado na fundição de metais.

Por volta de 1.500 a.C. ocorreu um primeiro incremento tecnológico, por meio de introdução do fole acionado por pedais. Posteriormente, com o desenvolvimento de tecnologia para a usinagem mais precisa do interior de tubos em ferro fundido, para fabricação de canhões, foram criadas as condições para o desenvolvimento de compressores com um único pistão.

A história registra a primeira utilização de um compressor a pistão em 1776 em uma fábrica da Inglaterra. Este compressor foi concebido para fornecer a estupefante pressão, para a época, de 1 bar. As válvulas e vedações eram de madeira e couro e não permitiam pressões mais elevadas do que esta.

Em meados de 1850 os compressores recíprocos tiveram uma grande aplicação na construção de túneis, apresentando entre 16 e 50rpm.

No ano de 1878 foi registrada a primeira patente para compressores por parafuso, porém não tiveram aplicação prática devido à dificuldade de sua produção.

Em Paris, no ano de 1888, experimentou-se uma distribuição centralizada de ar comprimido, consistindo de 14 compressores com 1.500kW de potência total instalada. A aplicação desse ar era diversificada, sendo utilizada até para o acionamento de elevadores. Provavelmente devido às altas perdas energéticas e elevado custo de instalação e manutenção, o projeto não foi levado adiante.

Após 1900, o desenvolvimento dos compressores acelerou-se, permitindo a construção de compressores com capacidade de até 1.500m<sup>3</sup> de armazenamento e 350 bar de pressão.

Por volta de 1950 surgem os primeiros compressores por parafusos produzidos em escala industrial, porém estes ainda tinham uma eficiência inferior aos compressores recíprocos, por causa dos parafusos com perfil simétrico. Nos anos 60 surgiram os primeiros compressores a parafuso com perfil assimétrico, apresentando eficiência similar aos compressores recíprocos.

Atualmente o ar comprimido é utilizado para diversos fins: ferramentas pneumáticas, acionamentos, controles de equipamentos, transporte de materiais, etc. Depois da energia elétrica, o ar comprimido é a forma de energia mais consumida na indústria de transformação. É também a forma de energia mais onerosa e, paradoxalmente, negligenciada, e muitas vezes é utilizado para limpeza de máquinas e limpeza de uniforme de operários.

De uma maneira geral, o tema ar comprimido pode ser dividido em três partes:

- Geração – captação, compressão, tratamento e armazenamento.
- Distribuição – transporte do ar comprimido até os pontos de consumo.
- Consumo – transformação da energia contida no ar comprimido em trabalho por meio de equipamentos e ferramentas.

Neste capítulo o enfoque principal será dado à geração, incluindo alguns conceitos básicos. A distribuição será abordada no tópico de vazamentos.

Boa parte do desperdício de ar comprimido deve-se à má utilização do mesmo.

Recente pesquisa na Europa mostrou que existe um potencial de redução de perdas com ar comprimido entre 30% e 50% nos países da Comunidade Européia. Esquece-se que, embora a matéria-prima do ar comprimido seja gratuita,

captada da atmosfera, o processo de compressão envolve motores elétricos, secadores, perdas na linha, etc. Mudanças comportamentais podem ser obtidas por meio de seminários, treinamento, semanas de conservação de energia e formas de incentivo, entre outros.



## Fique ligado!

Alguns comportamentos típicos que causam desperdício de ar comprimido bem como alguns cuidados são apresentados a seguir:

- Limpeza do uniforme e do corpo no final da jornada de trabalho. Este hábito, além de dispendioso, é perigoso, já que limalhas e outros resíduos podem ser impelidos pela pele causando infecções.
- Limpeza de objetos e bancadas de trabalho com ar comprimido. Onde é essencial, como, por exemplo, na limpeza de moldes, utilizar-se de ar comprimido à pressão de 2 a 3 bar e nunca do ar da linha principal.
- Já foi verificado que operários furavam mangueiras no verão para utilizarem como ventilação.
- O uso de uma mangueira de ar comprimido, colocada em um balde d'água para resfriar bebidas ainda não se tornou uma prática comum e deve ser combatida a qualquer custo.
- Os processos devem ser adequados para que o custo de geração de ar comprimido seja reduzido.
- Todo calor gerado deve ser retirado o mais rápido possível do ambiente onde se encontra o compressor, mantendo-o mais arejado possível.
- Os vazamentos de ar comprimido devem ser eliminados assim que detectados, tanto na rede de distribuição como nos equipamentos, reduzindo as perdas a um mínimo aceitável.
- O ar captado para compressão deve ser o mais frio possível, devendo ser captado externamente por dutos, quando necessário.
- Se economicamente viável, instalar uma rede secundária de ar comprimido com pressão mais elevada ou reduzida para os poucos equipamentos com necessidades diferenciadas.

## Voltando ao desafio

Voltando ao desafio do capítulo, podemos afirmar que:

As etapas da produção do ar comprimido são:

1. Geração – captação, compressão, tratamento e armazenamento.
2. Distribuição – transporte do ar comprimido até os pontos de consumo.
3. Consumo – transformação da energia contida no ar comprimido em trabalho por meio de equipamentos e ferramentas.

## Resumindo

Neste capítulo você aprendeu:

- A origem do emprego do ar comprimido;
- O surgimento dos primeiros compressores para produção de ar;
- As etapas da produção do ar comprimido e sua aplicação na indústria de transformação.

## Aprenda mais

Para estudar mais sobre o assunto, leia *Manual de ar comprimido e gases*. ROLLINS, John P. **Manual de ar comprimido e gases**. São Paulo: Prentice Hall, 2004 e visite o site [www.atlascopco.com](http://www.atlascopco.com).



## Capítulo 2

---

# USO DO AR COMPRIMIDO: VANTAGENS E DESVANTAGENS

### Iniciando nossa conversa

O ar comprimido é, provavelmente, uma das mais antigas formas de transmissão de energia que o homem conhece, empregada e aproveitada para ampliar sua capacidade física. O reconhecimento da existência física do ar, bem como a sua utilização mais ou menos consciente para o trabalho, são comprovados há centenas de anos.

### Objetivo

O estudo dos temas abordados neste capítulo tem por objetivos:

- descrever o surgimento do emprego do ar comprimido;
- reconhecer as principais vantagens e desvantagens do emprego do ar comprimido.

### Um desafio para você

Em uma indústria cimenteira, após desmontar e realizar inspeção de rotina em uma linha de ar comprimido, o mecânico de manutenção percebeu a presença de impurezas em determinados pontos desta linha. Baseado nesta informação e analisando as vantagens e desvantagens do ar comprimido, descreva a etapa que causou o problema.

## Continuando nossa conversa

O primeiro homem que, com certeza, sabemos ter-se interessado pela pneumática, isto é, o emprego do ar comprimido como meio auxiliar de trabalho, foi o grego *Ktesibios*. Há mais de dois mil anos, ele construiu uma catapulta a ar comprimido. Um dos primeiros livros sobre o emprego do ar comprimido como transmissão de energia, data do 1º século d.C. e descreve equipamentos que foram acionados com ar aquecido.



### Fique ligado!

Dos antigos gregos provém *pneuma* que significa fôlego, vento e, filosoficamente, alma. Derivando da palavra *pneuma*, surgiu, entre outros, o conceito de pneumática: a matéria dos movimentos e fenômenos dos gases.

Embora, a base da pneumática seja um dos mais velhos conhecimentos da humanidade, foi preciso aguardar o século 19 para que o estudo de seu comportamento e de suas características se tornasse sistemático. Porém, pode-se dizer que somente após o ano 1950 é que ela foi realmente introduzida na produção industrial. Antes, porém, já existiam alguns campos de aplicação e aproveitamento da pneumática, como, por exemplo, a indústria mineira, a construção civil e a indústria ferroviária (freios a ar comprimido).

A introdução, de forma mais generalizada, da pneumática na indústria, começou com a necessidade, cada vez maior, de automatização e racionalização dos processos de trabalho. Apesar da rejeição inicial, quase sempre proveniente da falta de conhecimento, por fim foi aceita e o número de campos de aplicação tornou-se cada vez maior.

Hoje, o ar comprimido tornou-se indispensável, e nos mais diferentes ramos industriais instalam-se aparelhos pneumáticos.

É admirável como a pneumática tem conseguido expandir-se e se impor em tão pouco tempo. Isto ocorre porque nenhum outro elemento auxiliar pode ser empregado tão simples e rentavelmente para solucionar muitos problemas de automatização.

Quais, portanto, são as características que fizeram o ar comprimido tão conhecido?

**Quadro 1**

Ar comprimido	- Características positivas/Vantagens
<b>Quantidade</b>	O ar comprimido encontra-se em quantidades limitadas, praticamente em todos os lugares.
<b>Transporte</b>	O ar comprimido é facilmente transportável por tubulações, mesmo para distâncias consideravelmente grandes, não há necessidade de se preocupar com o retorno de ar.
<b>Armazenável</b>	Não é necessário que o compressor esteja em funcionamento contínuo. O ar pode ser sempre armazenado em um reservatório e, posteriormente, tirado de lá. Além disso, é possível o transporte em reservatórios (botijão).
<b>Temperaturas</b>	O trabalho com ar comprimido é insensível às oscilações de temperatura. Isto garante, também em situações térmicas extremas, um funcionamento seguro.
<b>Segurança</b>	Não existe perigo de explosão ou de incêndio, portanto não são necessárias custosas proteções.
<b>Limpeza</b>	O ar comprimido é limpo. O ar, que eventualmente escapa das tubulações ou outros elementos inadequadamente vedados, não polui o meio ambiente. Esta limpeza é uma exigência, por exemplo, nas indústrias alimentícias, madeireiras, têxteis e curtumes.
<b>Construção</b>	Os elementos de trabalho são de construção simples e, portanto, de custo vantajoso.
<b>Velocidade</b>	O ar comprimido é um meio de trabalho muito veloz, e permite alcançar altas velocidades de trabalho (a velocidade de trabalho dos cilindros pneumáticos oscila entre 1-2 metros por segundos).
<b>Regulagem</b>	As velocidades e forças dos elementos a ar comprimido são recarregáveis sem escala.
<b>Seguro contra sobrecarga</b>	Elementos e ferramentas a ar comprimido são recarregáveis até a parada final e, portanto, seguros contra sobrecarga.

Para poder limitar corretamente os campos de emprego da pneumática, é necessário, também, conhecer as características negativas da mesma, que são apresentadas a seguir.

## Quadro 2

Ar comprimido - Características negativas/Desvantagens	
<b>Preparação</b>	O ar comprimido requer uma boa preparação. Impurezas e umidade devem ser evitadas, pois provocam desgaste nos elementos pneumáticos. As centrais de produção de ar comprimido modernas têm sistemas de filtragem e secagem eficientes.
<b>Compressibilidade</b>	Não é possível manter uniformes e constantes as velocidades dos pistões, mediante o ar comprimido.
<b>Forças</b>	O ar comprimido é econômico somente até uma certa força. O limite é fixado em 20.000 – 30.000 Newtons (2000 – 3000 Kgf em aplicação direta dos cilindros) à pressão normal de trabalho de 7 bar (pressão absoluta), dependendo também do curso e da velocidade dos elementos de trabalho.
<b>Escape de ar</b>	O escape de ar é ruidoso, mas com o desenvolvimento de silenciadores, este problema está atualmente solucionado.
<b>Custos</b>	O ar comprimido é uma fonte de energia muito cara. Porém, o alto custo de energia será, em grande parte, compensado pelos elementos de preço vantajoso e pela grande rentabilidade do ciclo de trabalho.



### Fique ligado!

Em consequência da automatização, a energia humana foi substituída por outras formas energéticas. Trabalhos antigamente feitos pelo homem agora estão sendo realizados mediante o emprego do ar comprimido. Exemplos: deslocamento de volumes pesados, acionamento de alavancas, contagem de peças, etc.

O ar comprimido, embora muito vantajoso, é, porém, um elemento energético relativamente caro. A produção e armazenagem, bem como a distribuição do ar comprimido às máquinas e dispositivos, requerem um alto custo. Esta realidade cria, em geral, a opinião de que o emprego de equipamentos a ar comprimido é relacionado com custos elevadíssimos. Esta opinião é errônea, pois para um cálculo de rentabilidade real, não devem ser considerados somente os custos da energia empregados, mas sim os custos gerais acumulados.

Considerando isto mais realisticamente, verificar-se-á que, na maioria dos casos, os custos da energia empregada são muito insignificantes para poderem desempenhar um papel determinante em relação aos salários, custos de investimento e de manutenção.

### **Voltando ao desafio**

A presença de impurezas em linhas de ar comprimido se dá por deficiência de filtragem e secagem do ar captado (preparação do ar comprimido).

Para correção deste problema surgido, será necessária a troca do elemento filtrante (acessório responsável pela eliminação das impurezas do ar captado).

### **Resumindo**

Neste capítulo você aprendeu sobre:

- o surgimento do ar comprimido e a sua importância na indústria de transformação;
- o significado da palavra pneumática;
- as principais características do ar comprimido.

### **Aprenda mais**

Para estudar mais sobre o assunto, leia *Manual de ar comprimido e gases*. ROLLINS, John P. **Manual de ar comprimido e gases**. São Paulo: Prentice Hall, 2004 e visite o site [www.atlascopco.com](http://www.atlascopco.com).



## Capítulo 3

---

# PRESSÃO ATMOSFÉRICA: FUNDAMENTOS

### Iniciando nossa conversa

Por desconhecimento dos fundamentos de pressão atmosférica, dos instrumentos de medição de pressão e das leis que regem esses princípios, muitas plantas industriais são projetadas muito além ou muito aquém das necessidades reais de projeto, contrariando a eficiência energética. Portanto, é necessário estudar estes assuntos para obter maior eficiência no uso da energia elétrica.

### Um desafio para você

Após o compressor desligar pela regulagem do pressostato de alta, o operador percebeu que a pressão de regulagem estava acima da pressão lida no manômetro instalado junto ao tanque do compressor. Identifique quais as ações que deverão ser tomadas para solucionar este desafio.

### Objetivo

O estudo dos temas abordados neste capítulo tem por objetivo:

- identificar os tipos de manômetros, pressostatos, assim como as escalas utilizadas em sistemas industriais.

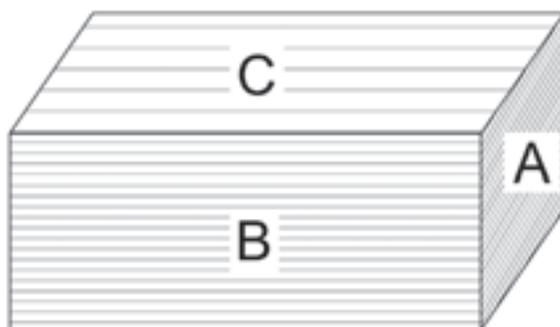
## Continuando nossa conversa

### Pressão

Para você compreender o conceito de pressão, leia atentamente o texto a seguir.

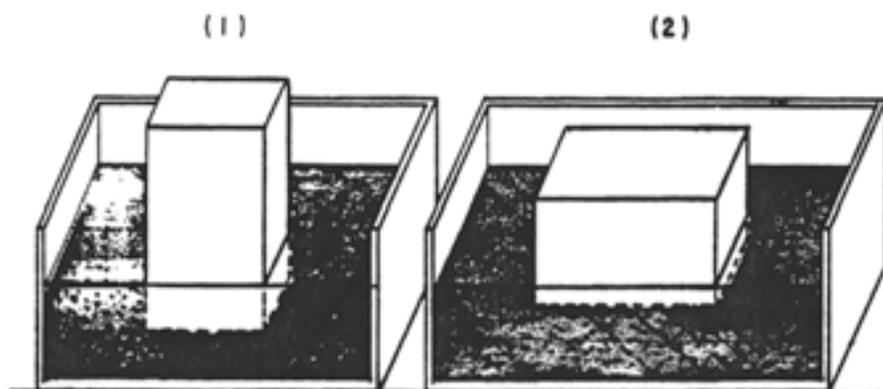
Tomemos dois paralelepípedos de aço de idênticas dimensões e de mesmo peso e os chamemos de blocos.

Figura 2 – Blocos



Agora, apoiemos o Bloco 1 pela face A sobre uma superfície de areia úmida e façamos a mesma coisa com o Bloco 2, porém, apoiando-o pela face C.

Figura 3 – Dois blocos apoiados sobre faces diferentes



Observando-se a impressão causada pelos blocos na areia, notaremos que o Bloco 1 penetrou mais na areia do que o Bloco 2.

Contudo, eles não são idênticos e de mesmo peso?

Sim! Só que o peso do Bloco 1 distribuiu-se por uma superfície menor (A) ao passo que o peso do Bloco 2 distribuiu-se por uma superfície maior (C). Desta forma, chega-se ao conceito de pressão.

*Pressão é a razão entre a força exercida (peso é força) por um corpo sobre uma superfície e a área de contato desse corpo com a superfície.*



### Fique ligado!

Pressão é a força por unidade de área.

$$P = \frac{F}{A}$$

Pela experiência dos paralelepípedos, você pode perceber que a pressão é inversamente proporcional à área, isto é, diminuindo-se a área a pressão aumenta e vice-versa. É óbvio que a pressão é diretamente proporcional à força, pois se esta aumenta, a pressão também aumenta.

Façamos agora, um exercício numérico para mostrar como se calcula a pressão.

- Aplica-se uma força de 8N perpendicularmente a uma superfície de área A igual a 0,004 m<sup>2</sup>. Calcule a pressão exercida por F sobre A.

Solução:

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{8 \text{ N}}{0,004 \text{ m}^2}$$

$$P = 2000 \text{ N/m}^2 \text{ ou } 2000 \text{ Pa (pascal)}$$

$$1 \text{ pascal} = 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Dando continuidade à nossa leitura, vamos agora estudar sobre pressão atmosférica.

## Pressão atmosférica

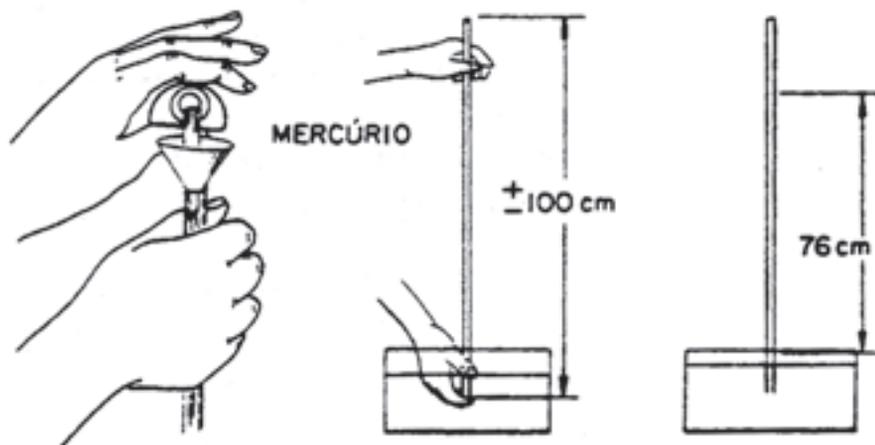
É fato conhecido que a Terra está envolta por uma camada gasosa denominada atmosfera. A atmosfera exerce sobre qualquer ponto da superfície terrestre uma pressão conhecida pelo nome de *pressão atmosférica*.

Figura 4 – Efeitos da pressão atmosférica



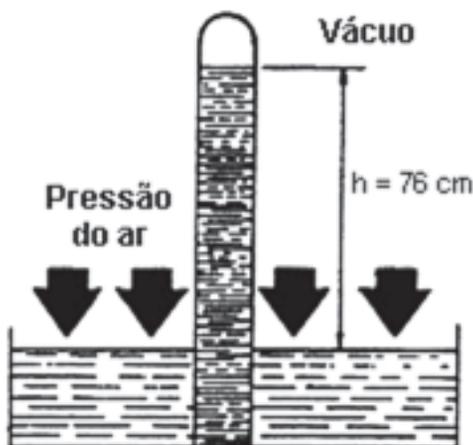
O primeiro a medi-la foi o físico italiano *Evangelista Torricelli* e sua experiência foi efetuada ao nível do mar. *Torricelli* usou um vidro com cerca de 1m de comprimento, fechado em um dos extremos. Encheu o tubo de mercúrio e tapou a extremidade aberta com o dedo.

Figura 5 – Experimento de *Torricelli*



Em seguida, inverteu o tubo e mergulhou-o em um recipiente contendo mercúrio. Só então retirou o dedo. *Torricelli* verificou que o mercúrio contido no tubo desceu até atingir uma altura de 76 cm acima do nível de mercúrio contido no vaso aberto.

**Figura 6 – Ação da pressão atmosférica sobre o líquido**



Por que todo o mercúrio do tubo não desceu para o recipiente?

Simplesmente porque a pressão atmosférica, agindo sobre a superfície livre do mercúrio contido no recipiente, equilibrou a pressão exercida pela coluna de mercúrio contida no tubo. Torricelli concluiu que a pressão atmosférica equivale à pressão exercida por uma coluna de mercúrio (Hg) de 76cm de altura (ao nível do mar) e para esse valor deu o nome de *atmosfera* (atm).

**1atm = 76cm de mercúrio = 760mm de mercúrio**

O aparelho inventado por *Torricelli* recebeu o nome de barômetro.

Depois que *Torricelli* inventou o barômetro, foram realizadas muitas experiências para medir a pressão atmosférica em diferentes altitudes e chegou-se à conclusão de que a pressão atmosférica varia com a altitude. De fato, a cada 100 m de variação na altitude, a pressão atmosférica varia de 1cm de mercúrio. Quando subimos, a pressão diminui; quando descemos, a pressão aumenta. Se, em vez de medirmos a pressão atmosférica em centímetros de mercúrio o fizemos em milímetros de mercúrio, teremos a unidade chamada Torricelli (Torr).

$$1 \text{ mm de mercúrio} = 1 \text{ Torr}$$
$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mm de mercúrio} = 760 \text{ Torr}$$

Pascal repetiu a experiência de *Torricelli* usando água em lugar do mercúrio e verificou que a pressão atmosférica equilibra uma coluna de água de 10,33m de altura.

$$1 \text{ atm} = 10,33 \text{ m de água}$$



### Fique ligado!

A pressão atmosférica de 76cm de mercúrio corresponde à pressão ao nível do mar e a 0°C de temperatura.

Agora que você já estudou o tema pressão, vamos ler sobre os instrumentos que são usados para medi-la.

## Manômetros

São instrumentos utilizados em refrigeração e servem para medir pressões manométricas.

Figura 7 – Manômetro



Existem vários tipos de manômetros. Podemos citar os apresentados nas ilustrações seguintes:

- de tubo de *Bourdon*;
- de diafragma;
- de fole.

Figura 8 – Manômetro de tubo de *Bourdon*



Figura 9 – Manômetro de diafragma

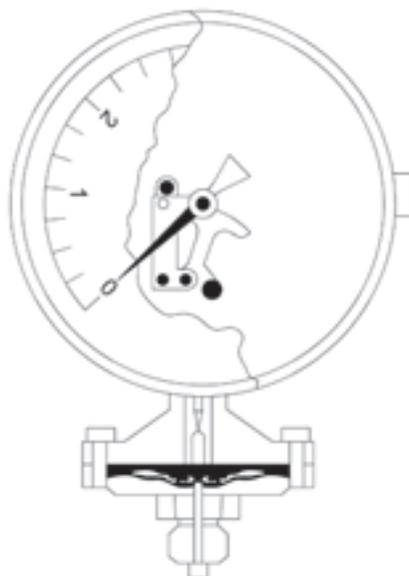
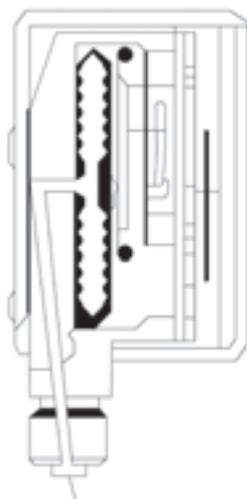


Figura 10 – Manômetro de fole



A seguir, vamos analisar o funcionamento do manômetro de tubo de *Bourdon*.

### **Manômetro Tipo *Bourdon***

O manômetro tipo *Bourdon* é bastante utilizado em refrigeração e funciona baseado no seguinte princípio: um tubo de cobre, com propriedade elástica e em forma circular, também denominado tubo de *Bourdon*. O fluido que entra no tubo de *Bourdon*, por um orifício na haste de conexão, com a elevação da pressão, faz com que o tubo altere seu formato e se expanda, arrastando consigo, por

meio de uma mola, uma engrenagem rotativa, cujo movimento é transferido a um ponteiro.

A pressão aplicada pode, então, ser lida sobre uma escala convenientemente graduada.

Figura 11 – Manômetro de *Bourdon* (em corte)



A pressão registrada por este instrumento é conhecida como *pressão manométrica*. Para se encontrar a pressão absoluta ou pressão verdadeira, é necessário adicionar a pressão atmosférica (determinada por meio de um barômetro) à pressão manométrica. Por exemplo, uma pressão manométrica de 10 libras-força por polegada quadrada é igual a uma pressão absoluta de 14,7 libras-força por polegada quadrada, mais 10 libras-força por polegada quadrada, ou seja, 24,7 libras-força por polegada quadrada de pressão absoluta.

Nos manômetros que indicam pressão abaixo da pressão atmosférica, estas são expressas em polegadas de vácuo, significando polegadas da coluna de mercúrio de um barômetro, abaixo da leitura-padrão ao nível do mar, que é 29,92 polegadas. Usualmente, contudo, são empregados os termos polegadas de vácuo. Esses manômetros que indicam pressão abaixo da pressão atmosférica são denominados *manovacuômetros*, popularmente conhecidos como *manômetros de baixa*.

Figura 12 – Manovacuumetro



### Fique ligado!

No caso de pressão acima da pressão atmosférica a leitura é libras-força por polegada quadrada ou, abreviadamente p.s.i. Na prática, contudo, é usada a expressão libras de pressão ou libras por polegada quadrada, significando a mesma coisa.

Os manômetros que indicam pressões acima da atmosfera são popularmente chamados de *manômetros de alta pressão*.

Observe, na Tabela 1, uma comparação das pressões.

Tabela 1 – Tabela de comparação das pressões

Pressão absoluta	Pressão manométrica	Atmosferas de pressão	Polegadas de mercúrio	Centímetros de mercúrio
0	30"vácuo	0	0	0
4,9	20"vácuo	0,33	9,95	25,4
9,8	10"vácuo	0,67	19,95	50,7
14,7*	0 libras/pol <sup>2</sup>	1	29,92**	76
25	10,3 libras/pol <sup>2</sup>	1,7	50,7	129,3
30	15,3 libras/pol <sup>2</sup>	2	60,9	155
45	30,3 libras/pol <sup>2</sup>	3,1	91,3	233
60	45 libras/pol <sup>2</sup>	4,1	122	310
75	60 libras/pol <sup>2</sup>	5,1	152	388
100	85 libras/pol <sup>2</sup>	6,7	203	517
300	285 libras/pol <sup>2</sup>	20	609	1550
600	585 libras/pol <sup>2</sup>	40,1	1218	3100
1200	1185 libras/pol <sup>2</sup>	81,7	2440	6200
1500	1485 libras/pol <sup>2</sup>	102	3045	7750

\*Comumente usada como 15 libras-força por polegada quadrada.

\*\*Comumente usada como 30 polegadas da coluna de mercúrio.



### Fique ligado!

O manômetro descalibrado faz com que o compressor trabalhe por mais tempo, consumindo mais energia.

A seguir, vamos estudar outro instrumento muito importante para área de medição de pressão – os pressostatos.

## Pressostatos

O pressostato, também chamado *instrumento de controle de pressão*, é fabricado para ser utilizado nas pressões do sistema, desligando e ligando o mesmo, quando as pressões exercidas pelos fluidos refrigerantes e lubrificantes atingirem valores predeterminados.

São três os tipos de pressostatos conhecidos:

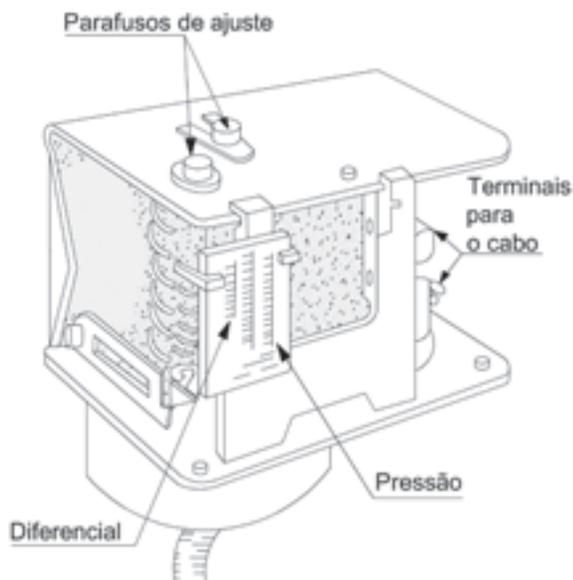
- de alta e de baixa pressão conjugados;
- de alta e baixa pressão isolados; e
- pressostatos de óleo.

O funcionamento do pressostato muito se assemelha ao do termostato (instrumento de monitoramento de temperatura) de bulbo remoto. A principal diferença está na pressão que atua sobre o fole ou diafragma, isto é, no termostato essa pressão é exercida pelo fluido contido no bulbo em consequência da temperatura. Já no pressostato a ação da pressão provém da compressão: no de baixa pressão, atua na linha de sucção, e no de alta, atua na linha de compressão.

### Pressostato de baixa

O pressostato de baixa pressão funciona como controle de temperatura e como elemento de segurança do sistema, pois sua atuação é em função das variações de pressão da sucção, permitindo, assim, a parada e a marcha da unidade. Sua regulagem é feita de modo que corresponda ao diferencial de temperatura desejado entre ligar e desligar.

Figura 13 – Pressostato em corte





## Atenção!

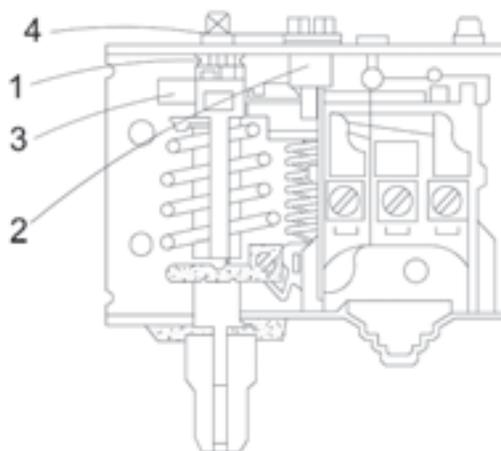
O pressostato de baixa deverá ser instalado na válvula de serviço da baixa pressão ou, ainda, no tampão do cárter.

### Pressostato de alta

O pressostato de alta é usado somente como controle de segurança de alta pressão, desligando o sistema quando a pressão do gás atingir um valor predeterminado, acima do qual a pressão é considerada perigosa para o sistema.

É equipado com um interruptor unipolar (1), que interrompe o circuito entre os terminais 1 e 2, quando há um aumento da pressão no seu fole, isto é, quando aumenta a pressão de condensação. A ligação (3) deve ser ininterrupta, com o lado da alta pressão do compressor, de modo que este pare, se acaso a válvula de descarga estiver fechada, ou se houver alguma obstrução na linha de alta pressão. Girando o parafuso de regulagem (4) no sentido horário, ajusta-se o controle para interromper o circuito entre os terminais 1 e 2 a uma pressão mais elevada; e girando o parafuso (5) no sentido horário, ajusta-se o controle para o rearme (estabelecendo o circuito entre 1 e 2) a um diferencial mais baixo (pressão de interrupção = pressão de arranque + o diferencial).

Figura 14 – Ajuste do pressostato



- 1– Parafuso de regulagem de ligar
- 2 – Parafuso de regulagem do diferencial de desligar
- 3 – Braço principal
- 4 – Trava dos parafusos



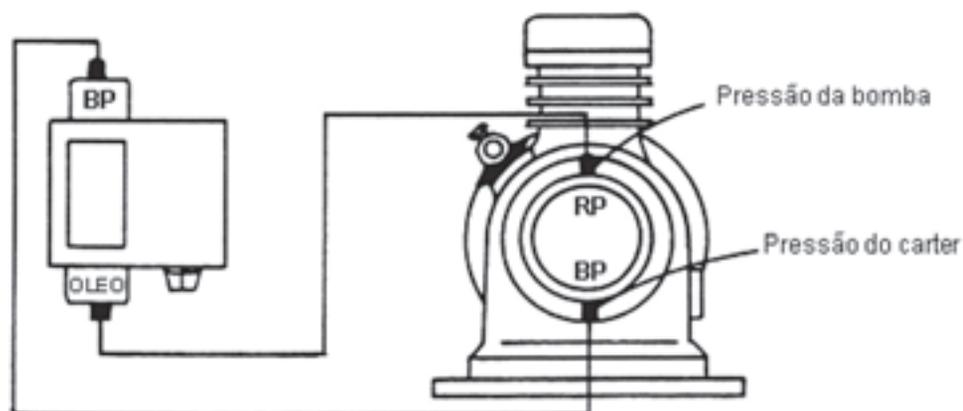
### Fique ligado!

O pressostato de alta pressão deverá ser instalado na válvula de serviço da alta pressão.

### Pressostato de óleo

O pressostato de óleo serve para interromper o circuito, caso haja deficiência na lubrificação do compressor. Ele controla a diferença de pressão entre o cárter e a saída da bomba de lubrificação.

Figura 15 – Monitoramento da pressão





### Fique ligado!

Para saber a pressão da bomba de óleo, subtrai-se a pressão do cárter pela pressão da saída da bomba.

## Funcionamento

Para que o pressostato de óleo não desligue o compressor durante a partida, um mecanismo de retardamento impede a sua ação durante 2 minutos.

O desligamento do sistema pela ação do pressostato de óleo indica que há mau funcionamento do sistema de lubrificação. Normalmente este tipo de pressostato vem equipado com dispositivo de rearme manual.



### Fique ligado!

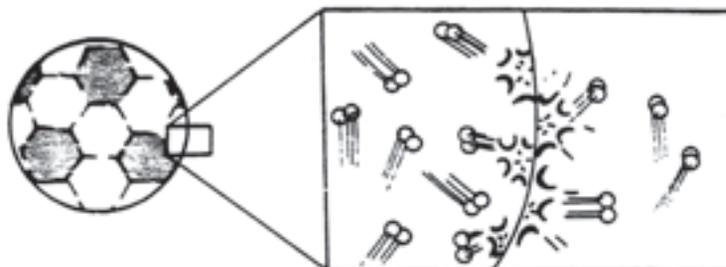
O pressostato desregulado faz com que o motor elétrico, que aciona o compressor, fique intermitente (liga/desliga), e isto aumenta a frequência de comutação do motor, elevando o consumo de energia.

Agora que você já estudou sobre pressão e os instrumentos usados em sua medição, vamos prosseguir abordando um tema muito importante para quem atua na área e lida com esses equipamentos, a teoria dos gases.

## Leis dos gases perfeitos

### Teoria cinética dos gases

A teoria cinética dos gases diz, em linhas gerais, que todo gás é formado por partículas minúsculas (moléculas, átomos ou íons), animados por movimentos perpétuos e desordenados.

**Figura 16 – Comportamento das moléculas**

Na realidade, cada partícula muda bruscamente de direção ao se chocar com outra partícula ou com as paredes do próprio recipiente que contém o gás.

Duas idéias são particularmente importantes na cinética dos gases:

- todo aumento de temperatura acarreta aumento de velocidade das partículas do gás;
- todo aumento do número de choques das partículas contra as paredes do recipiente acarreta aumento de pressão do gás.

### **Variáveis do estado de um gás**

As grandezas que podemos observar diretamente em um gás são: a pressão (P), a temperatura (T) e o volume (V). Essas grandezas são chamadas de variáveis de estado de um gás.



#### **Fique ligado!**

Quando uma dessas grandezas (pressão, temperatura ou volume) varia, dizemos que o gás sofreu uma transformação.

## Transformações gasosas

As transformações gasosas mais importantes são apresentadas no Quadro 3.

**Quadro 3**

Tipo de transformação gasosa	Etimologia	Condição de ocorrência
Isotérmicas	(iso = igual; termos = calor)	Ocorrem quando a temperatura se mantém constante, variando apenas o volume e a pressão do gás.
Isobáricas	(iso = igual; baros = pressão)	Ocorrem quando a pressão se mantém constante, variando o volume e a temperatura.
Isocóricas	(iso = igual; coros = espaço)	Ocorrem quando o volume se mantém constante, variando apenas a pressão e a temperatura.

No estudo dos gases, a temperatura é expressa em graus *Kelvin* (K).

## Lei física dos gases

São leis experimentais que se referem às transformações gasosas vistas anteriormente. Vejamos as leis: de *Boyle-Mariotte*, de *Gay-Lussac* e a de *Charles* ou Segunda lei de *Gay-Lussac*.

### Lei de *Boyle-Mariotte*

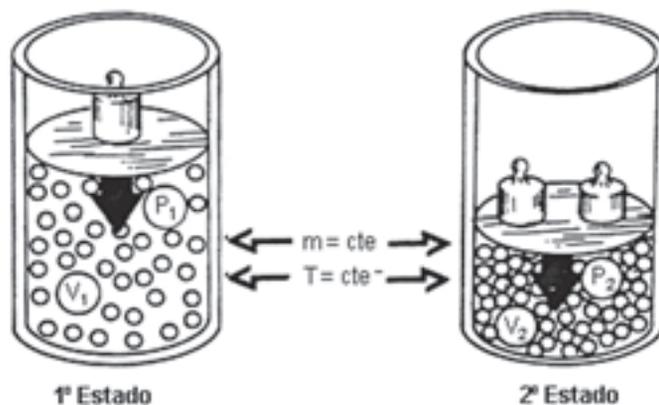
A lei de *Boyle-Mariotte* só é válida para transformações isotérmicas e diz:

*O volume e a pressão de uma determinada massa gasosa, mantida em temperatura constante, são inversamente proporcionais.*

### Verificação experimental da Lei de *Boyle-Mariotte*

Num cilindro, provido de um êmbolo móvel e sem vazamento, colocamos uma massa fixa de um gás determinado e mantemos a temperatura constante. Notaremos que, dobrando, triplicando, quadruplicando o peso (e a pressão, conseqüentemente) sobre o êmbolo, o volume de gás irá sendo reduzido à metade, um terço, um quarto, e assim por diante.

Figura 17 – Redução de volume em função do peso

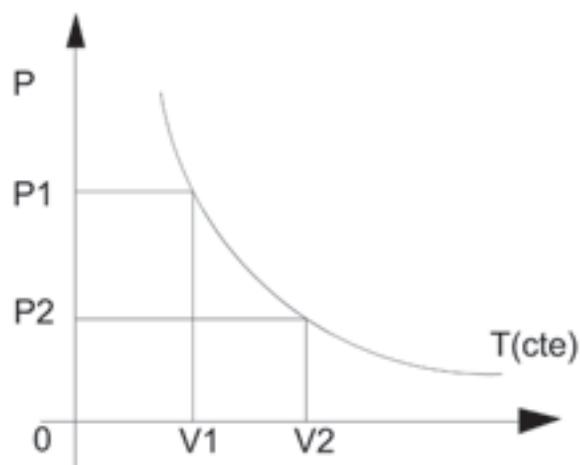


Como, numa transformação isotérmica, o volume e a pressão de um gás são inversamente proporcionais, o produto entre seus valores é constante.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{constante}$$

Pela mesma razão, o gráfico da pressão em função do volume é representado por uma curva (hipérbole eqüilátera) denominada isotérmica do gás.

Gráfico 1 – Curva isotérmica do gás



### Primeira Lei de *Gay-Lussac*

A 1ª lei de *Gay-Lussac* só é válida para transformações isobáricas e diz:

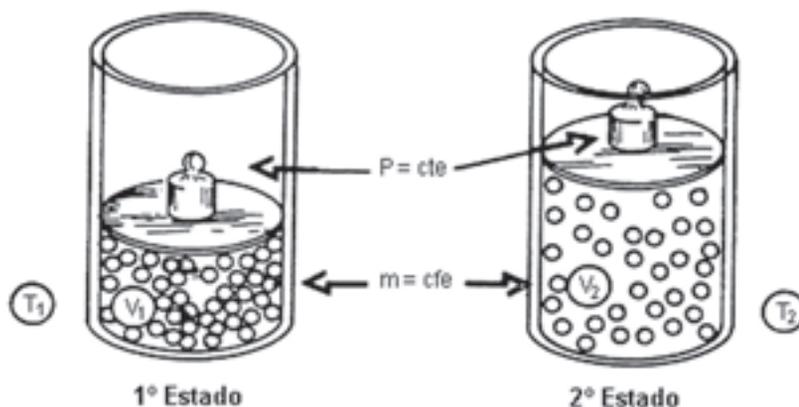
*Para uma determinada massa gasosa, mantida a pressão constante, o volume é diretamente proporcional à temperatura absoluta.*

### Verificação experimental da 1ª Lei de *Gay-Lussac*

No mesmo cilindro da experiência anterior, colocamos uma massa fixa de um gás determinado e mantemos a pressão constante (sempre o mesmo peso).

Notaremos que dobrando, triplicando, quadruplicando a temperatura, o volume do gás irá dobrar, triplicar, quadruplicar, etc.

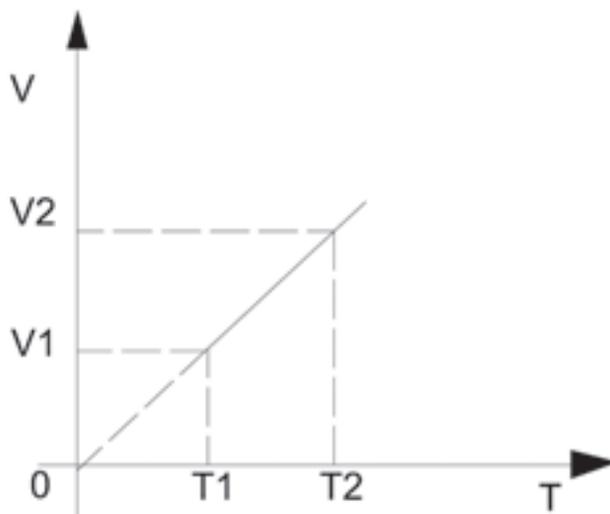
Figura 18 – Aumento de volume em função da temperatura



Logo:

Em uma apresentação gráfica, temos:

### Gráfico 2 – Relação entre volume e temperatura



Observando o gráfico da 1ª lei de *Gay-Lussac*, você poderia concluir que o volume do gás seria nulo a zero *Kelvin*, isto é, o gás iria sumir!

Na verdade isto não ocorre, pois muito antes do zero *Kelvin* todos os gases se liquefazem e posteriormente se solidificam.



#### Fique ligado!

A zero *Kelvin* não existem gases. A primeira lei de *Gay-Lussac*, em última análise, traduz a constatação de que os gases se dilatam pela ação do calor.

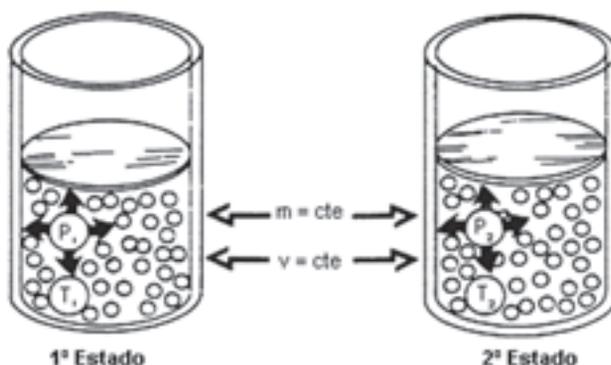
## Lei de Charles ou Segunda Lei de Gay-Lussac

A lei de Charles é válida somente para transformações isotérmica ou isocóricas e diz:

*Para uma determinada massa gasosa, mantida o volume constante, a pressão é diretamente proporcional à temperatura absoluta.*

### Verificação experimental

**Figura 19 – Mantendo o volume, pressão e temperatura variam proporcionalmente**



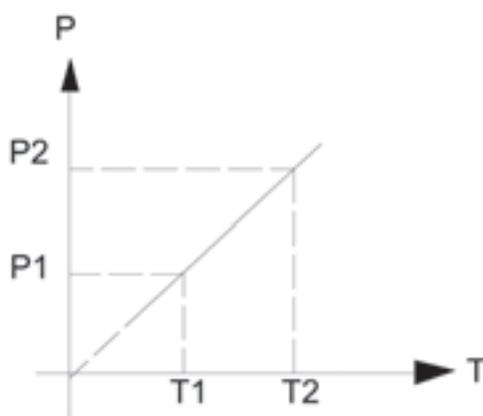
Usando o mesmo cilindro das experiências anteriores, colocamos no seu interior uma massa fixa de um gás determinado e parafusamos o êmbolo. Com isso, o volume do gás permanecerá constante.

Notaremos que dobrando, triplicando, quadruplicando a temperatura, a pressão do gás irá dobrar, triplicar, quadruplicar, etc.

Assim sendo, diremos que a pressão e a temperatura absoluta do gás são diretamente proporcionais e escreveremos:

Representando graficamente, temos:

**Gráfico 3 – Relação entre pressão e temperatura**



### **Gás perfeito ou gás ideal**

Chama-se *gás perfeito* ou *ideal* aquele que obedece rigorosamente às três leis já enunciadas, em quaisquer condições de pressão e temperatura.

Contudo, na prática, os gases reais não chegam a obedecer rigorosamente a essas leis. Podemos dizer que os gases reais se afastam, cada vez mais, da obediência às leis, à medida que:

- a pressão aumenta;
- a temperatura diminui;
- o gás considerado seja de liquefação cada vez mais difícil.

Decorre daí que os gases “mais perfeitos” são os de liquefação difícil (como, por exemplo, o hidrogênio, o hélio, o oxigênio, o nitrogênio, etc.) quando se encontram em temperaturas altas e pressões bem baixas.



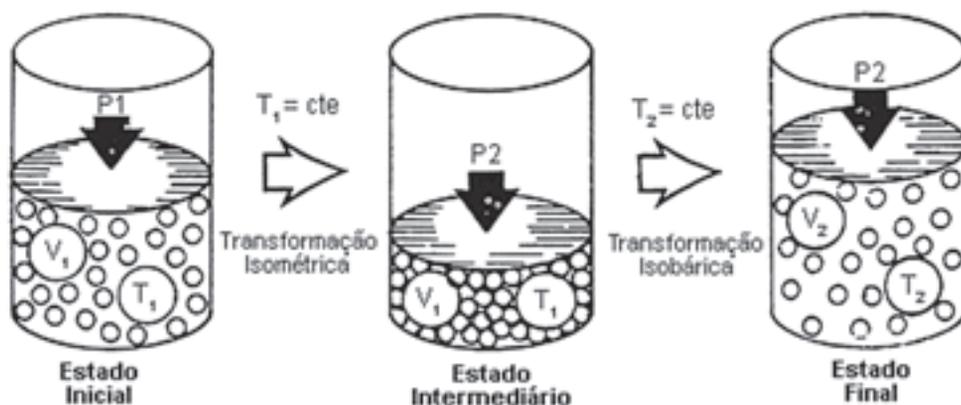
## Atenção!

Apesar disso, vamos utilizar as leis e as fórmulas estudadas, pois os “erros” por elas causados durante o estudo do comportamento dos gases reais são toleráveis.

### Equação geral dos gases ideais

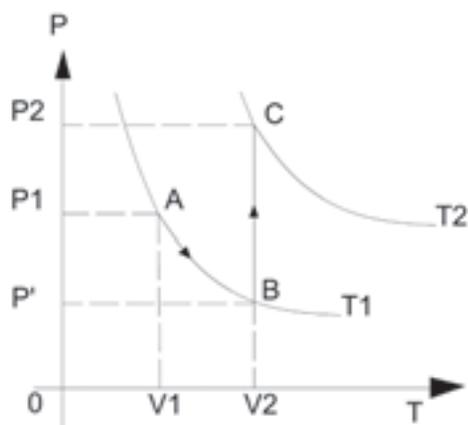
É uma fórmula matemática que reúne as três leis já conhecidas, permitindo prever o que acontece com as variações simultâneas de volume, pressão e temperatura dos gases. Para deduzir a equação dos gases ideais, vamos imaginar uma massa fixa de um gás que sofre as seguintes transformações:

Figura 20 – Transformações isotérmica e isobárica



Essas transformações podem ser representadas por um gráfico:

**Gráfico 4 – Relação entre pressão, volume e temperatura**



O ponto A representa o estado inicial do gás; B representa o estado intermediário e C, o estado final.

De A para B a transformação é isotérmica (temperatura constante); portanto, usamos a lei de *Boyle-Mariotte*:

$$P_1 V_1 = P' V_2 \quad (1)$$

De B para C a transformação é isocórica (volume constante); no caso, utilizamos a lei de *Charles*:

$$\frac{P'}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad P' = \frac{P_2 T_1}{T_2} \quad (2')$$

Substituindo (2) em (1) obteremos o seguinte resultado:

$$P_1 V_1 = \frac{P_2 T_1}{T_2} \cdot V_2$$

$$P_1 V_1 T_2 = P_2 T_1 V_2$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Apresentamos, a seguir, quatro aplicações já resolvidas no sentido de exemplificar a utilização dessas leis. Acompanhe com atenção o desenvolvimento das soluções.:

### Aplicações

1ª situação: Um gás mantido a pressão constante ocupa o volume de 30 L à temperatura de 300 K. Qual será o seu volume quando a temperatura for de 240 K?

Solução

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Como a pressão é constante, podemos eliminá-la da equação anterior para obter:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1^{\text{a}} \text{ Lei de Gay-Lussac})$$

Resolvendo, obtemos:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \frac{30\text{L}}{300\text{ K}} = \frac{V_2}{240\text{ K}} \quad V_2 = \frac{30\text{L} \times 240\text{ K}}{300\text{ K}}$$

$$V_2 = 24\text{L}$$

Observe agora outra situação.

2ª situação: Um gás, inicialmente contido num recipiente de 12 litros e sob pressão de 2atm, é transferida para outro recipiente, de 5 litros, que está à mesma temperatura. Calcule a nova pressão.

Solução

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Como a temperatura é constante, podemos eliminá-la da equação anterior para obter:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (\text{Leia de Boyle-Mariotte})$$

Resolvendo:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$2 \text{ atm} \times 12 \text{ l} = P_2 \times 5$$

$$P_2 = \frac{2 \text{ atm} \times 12 \text{ l}}{5 \text{ l}}$$

$$P_2 = 4,8 \text{ atm}$$

Prosseguindo, acompanhe como foi solucionada a terceira situação.

3ª situação: Certa massa de um gás mantida a volume constante está submetida à temperatura de 290K, enquanto sua pressão vale 1 atm. Qual será a sua temperatura quando a pressão passar a ser 1,6atm?

Solução

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Como o volume é constante podemos eliminá-lo da equação anterior para obter:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (\text{Lei de Charles})$$

Resolvendo

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad \frac{1 \text{ atm}}{290 \text{ K}} = \frac{1,6 \text{ atm}}{T_2} \quad T_2 = \frac{1,6 \text{ atm} \times 290 \text{ K}}{1 \text{ atm}}$$

$$T_2 = 464 \text{ K}$$

4ª situação: Um gás ocupa um volume de 4 dm<sup>3</sup> a 0°C e 3 atm. Qual será a sua pressão a 273°C, se o volume for de 6 dm<sup>3</sup>?

Solução

Temos que transformar as temperaturas em *kelvin*.

$$T_1 \left\{ \begin{array}{l} K = C + 273 \\ K = 0 + 273 \\ K = 273 \text{ K} \end{array} \right\} \quad T_2 \left\{ \begin{array}{l} K = C + 273 \\ K = 273 + 273 \\ K = 546 \text{ K} \end{array} \right\}$$

Aplicamos a equação geral dos gases e resolvemos o problema:

$$\frac{3 \text{ atm} \times 4 \text{ dm}^3}{273 \text{ K}} = \frac{P_2 \times 6 \text{ dm}^3}{546 \text{ K}}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$P_2 = \frac{3 \text{ atm} \times 4 \text{ dm}^3 \times 546 \text{ K}}{6 \text{ dm}^3 \times 273 \text{ K}}$$

$$P_2 = 4 \text{ atm}$$

### Voltando ao desafio

O operador deverá comunicar o ocorrido ao pessoal da manutenção que avaliará se houve obstrução da válvula de descarga ou da linha de descarga. Caso esteja tudo bem, deverá mandar o manômetro para a calibração ou trocá-lo se necessário.

### Resumindo

Neste capítulo você aprendeu sobre:

- pressão atmosférica, pressão manométrica e os instrumentos utilizados para a medição das mesmas;
- transformações gasosas, processos isotérmicos, isovolumétrico e isobárico.

### Aprenda mais

Para estudar mais sobre o assunto, leia *Manual de ar comprimido e gases* ROLLINS, John P. **Manual de ar comprimido e gases**. São Paulo: Prentice Hall, 2004 e visite o site [www.atlascopco.com](http://www.atlascopco.com).



## Capítulo 4

---

# CLASSIFICAÇÃO, DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DE COMPRESSORES

### Iniciando nossa conversa

Apesar da pneumática ser bastante antiga, somente na segunda metade do século 19 é que o ar comprimido adquiriu importância industrial. Antes, porém, já existiam alguns campos de aplicação e aproveitamento da pneumática, como, por exemplo, a indústria de mineração, a construção civil e a indústria ferroviária. Hoje, o ar comprimido tornou-se indispensável, e nos mais diferentes seguimentos industriais instalam-se equipamentos pneumáticos.

### Objetivos

Ao estudar este capítulo temos por objetivos:

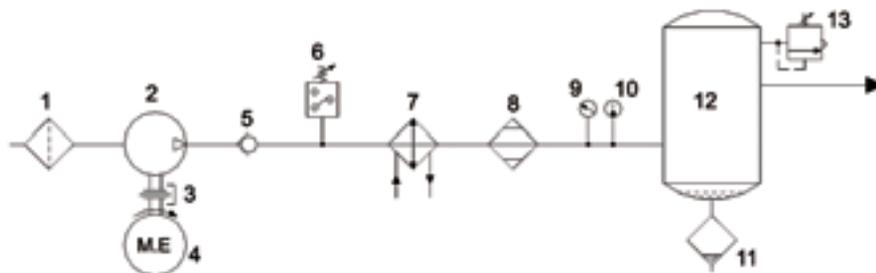
- descrever os tipos de construção de compressores de ar;
- classificar os tipos de compressores de ar conforme suas características;
- descrever os critérios utilizados para escolha de compressores.

### Um desafio para você

Um estagiário técnico em mecânica industrial recebeu uma ordem de serviço composta de um circuito pneumático para que fosse identificado cada componente numerado, sua função e seu estado de conservação.

Você poderá ajudá-lo nesta identificação? Observe o circuito pneumático apresentado a seguir e preencha o quadro.

Figura 21 – Geração do ar comprimido



Componentes	Função
01	
02	
03	
04	
05	
06	
07	
08	
09	
10	
11	
12	
13	

## Continuando nossa conversa

### Tipos de compressores

Conforme as necessidades fabris em relação à pressão de trabalho e ao volume, serão empregados compressores de diversos tipos de construção.

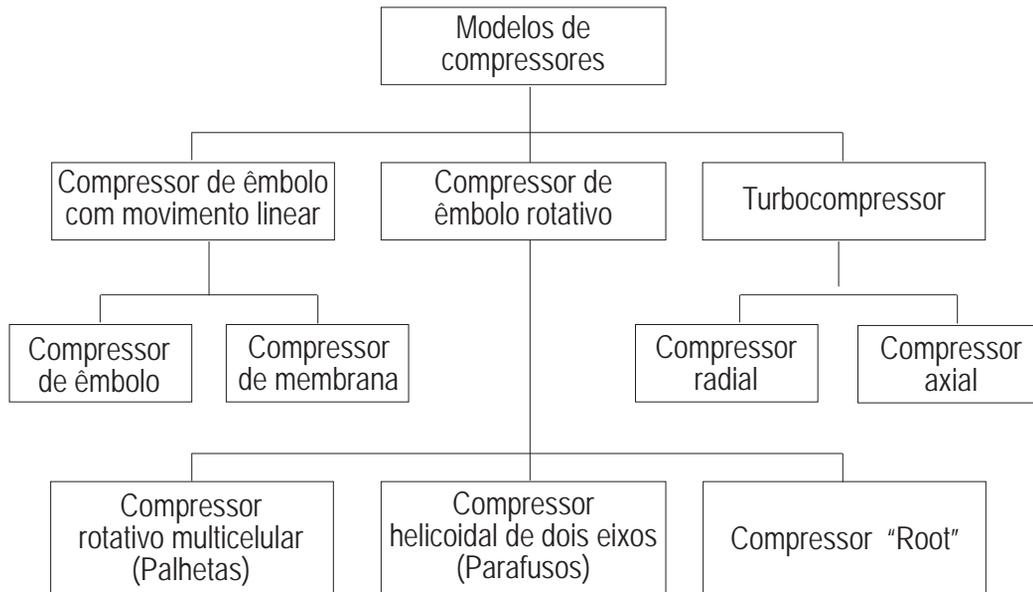
Vamos analisar dois tipos de compressores: o de êmbolo ou pistão e o de turbina.

#### Quadro 4

Tipo de compressor	Princípio	Funcionamento
Compressor de êmbolo ou pistão.	Princípio de redução do volume	Aspiração do ar atmosférico e posterior redução do volume na câmara de compressão, descarregando este ar para o tanque.
Compressor de turbina	Princípio de fluxo	Sucção do ar de um lado e compressão no outro, por aceleração de massa.

No esquema a seguir, apresentamos modelos de compressores.

**Figura 22 – Tipos construtivos de compressores**



### **Compressor de êmbolo com movimento linear**

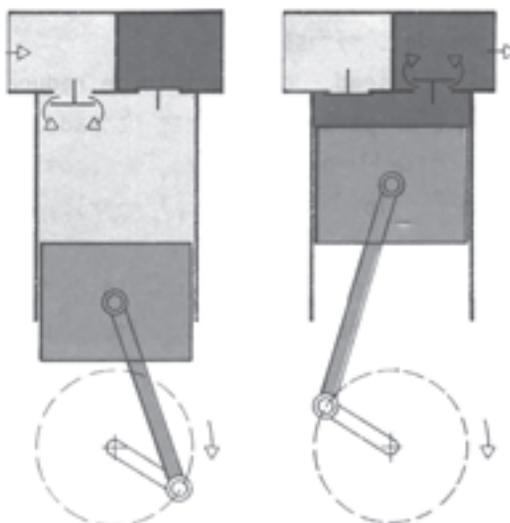
Existem vários tipos de compressores. A seguir analisaremos alguns.

#### **Compressor de êmbolo**

Atualmente, o compressor de êmbolo com movimento linear é o mais usado.

Ele é apropriado não só para compressão a pressões baixas e médias, mas também para altas pressões. O campo de pressão varia de um bar até milhares de bar.

Figura 23 – Compressor de êmbolo



Para a compressão a pressões mais elevadas são necessários compressores de vários estágios. O ar aspirado será comprimido pelo primeiro êmbolo (pistão), refrigerado intermediariamente e novamente comprimido pelo próximo êmbolo. Na compressão a altas pressões faz-se necessária uma refrigeração intermediária, pois essa operação gera alto aquecimento. Os compressores de êmbolo e outros são fabricados em execuções a água ou a ar.

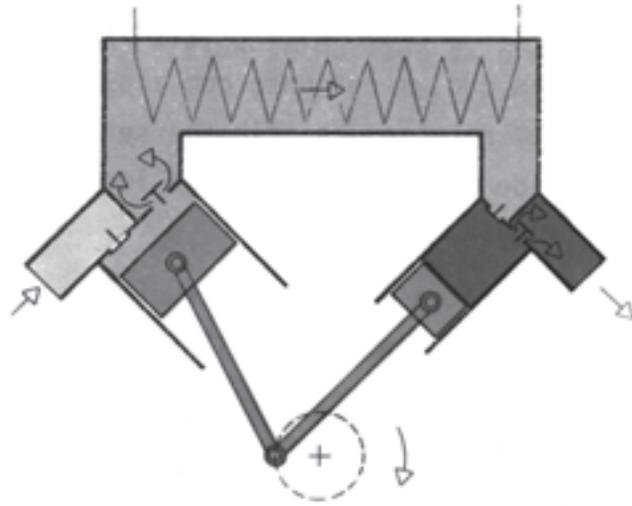
Os compressores de êmbolo com movimento linear apresentam grandes vantagens sobre as demais:

- até 4 bar: um estágio
- até 15 bar: dois estágios
- acima de 15 bar: três ou mais estágios

Também é possível operá-lo de outra maneira, mas nem sempre é a mais econômica:

- até 12 bar: um estágio
- até 30 bar: dois estágios
- até 220 bar: três estágios.

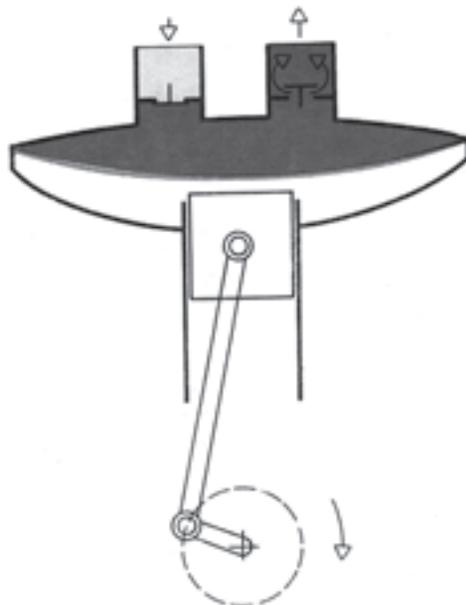
Figura 24 – Compressor de êmbolo de dois estágios



### Compressor de membrana (diafragma)

Este tipo pertence ao grupo dos compressores de êmbolo com movimento linear. Mediante uma membrana, o êmbolo fica separado da câmara de sucção e compressão, quer dizer, o ar não terá contato com as partes deslizantes. O ar, portanto, ficará sempre livre de resíduos de óleo.

Figura 25 – Compressor de membrana





## Fique ligado!

O compressor de membrana é o preferido e mais empregado na indústria alimentícia, farmacêutica e química.

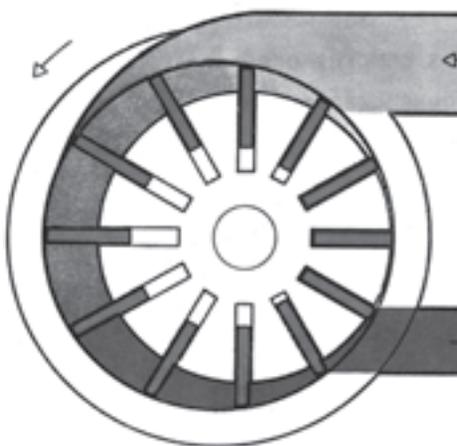
## Compressores de êmbolo rotativo

Neste tipo de compressor se estreitam (diminuem) os compartimentos, comprimindo, então, o ar nos mesmos.

## Compressor rotativo multicelular

Em um compartimento cilíndrico, com aberturas de entrada e saída, gira um rotor alojado excentricamente. O rotor tem nos rasgos palhetas que, em conjunto com a parede, formam pequenos compartimentos (células). Quando em rotação, as palhetas serão, pela força centrífuga, apertadas contra a parede. Devido à excentricidade de localização do rotor, há uma diminuição e um aumento das células.

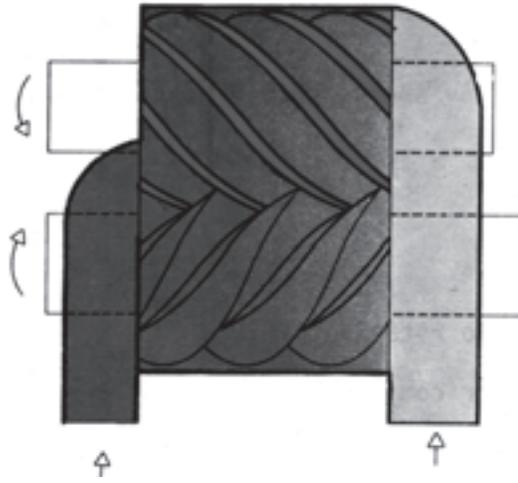
Figura 26 – Compressor de palhetas



### Compressor helicoidal de dois eixos (duplo parafuso)

Neste tipo de compressor existem dois parafusos helicoidais, os quais, por terem perfis côncavo e convexo, comprimem o ar que se movimenta axialmente.

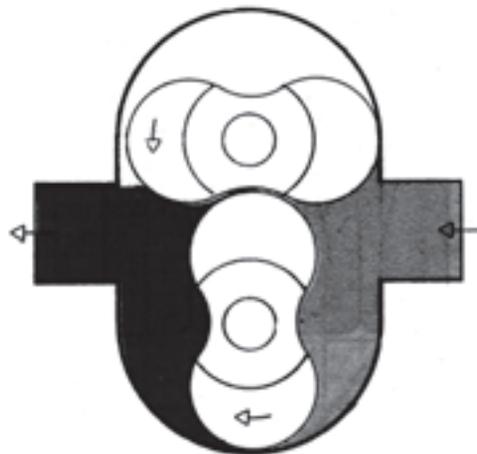
Figura 27 – Compressor de duplo parafuso



### Compressor *Root*

Nestes compressores o ar é transportado de um lado para o outro, sem alteração de volume. A compressão efetua-se no lado da descarga, ou seja, lado de alta pressão pelos cantos dos êmbolos.

Figura 28 – Compressor *Root*



## Turbocompressores

Estes compressores trabalham segundo o princípio de fluxo e são adequados para o fornecimento de grandes vazões. Os turbocompressores são construídos em duas versões: axial e radial. Em ambas as versões, o ar é colocado em movimento por uma ou mais turbinas, e a energia de movimento gerada é então transformada em energia de pressão.

Figura 29 – Turbocompressor axial

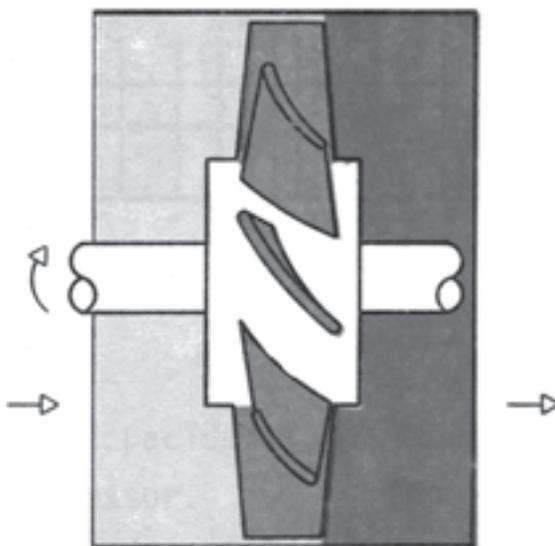
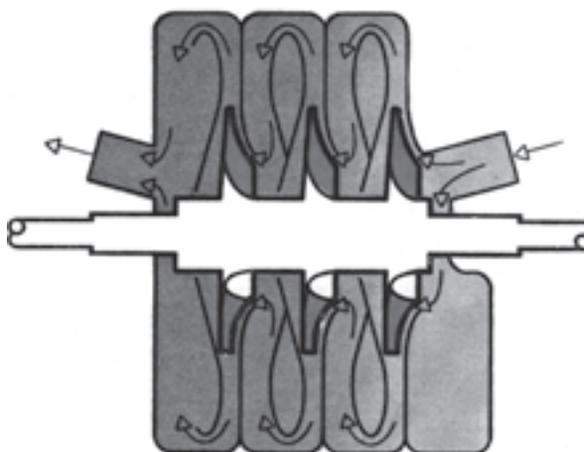


Figura 30 – Turbocompressor radial

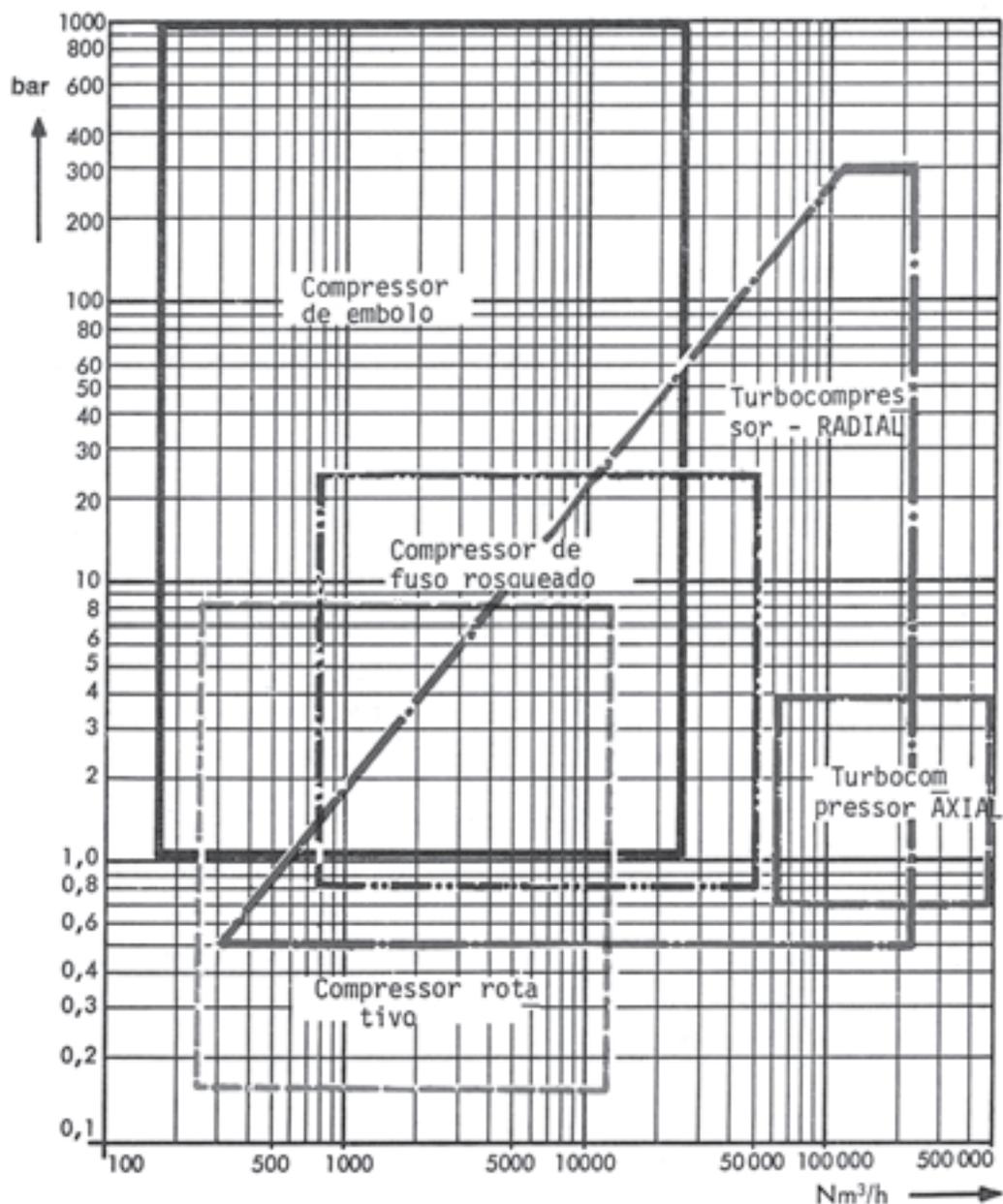


A compressão, neste tipo de compressor, processa-se pela aceleração do ar aspirado de câmara para câmara, em direção à saída. O ar é impelido axialmente para as paredes da câmara e, posteriormente, em direção ao eixo, e daí, no sentido radial, para outra câmara sucessivamente.

### **Diagrama de volume e pressão fornecidos**

No diagrama a seguir estão indicadas as capacidades, em quantidade aspirada e pressão alcançada, para cada modelo de compressor.

Figura 31 – Diagrama de seleção de compressores



### Crítérios para a escolha de compressores

Existem alguns critérios que podem nos auxiliar na escolha do compressor que melhor atenda à necessidade do trabalho a ser executado. São eles: volume de ar fornecido, pressão, acionamento, regulação, refrigeração e localização de montagem.

## Volume de ar fornecido

O volume de ar fornecido é a quantidade de ar que está sendo fornecido pelo compressor. Existem duas diferentes indicações de volume fornecido: volume fornecido teórico e efetivo.



### Fique ligado!

O produto do “volume cilíndrico x rotação” é o volume fornecido teórico.

O volume fornecido efetivo depende da construção do compressor. Um papel importante é desempenhado pela eficiência volumétrica.

Apenas o volume efetivo fornecido pelo compressor é que interessa, pois é com este que são acionados e comandados os aparelhos pneumáticos, mas, mesmo assim, muitos fabricantes de compressores baseiam os dados técnicos no valor teórico.



### Atenção!

Indicações, segundo as normas DIN, são valores efetivos (por exemplo: DIN 1945, DIN 1962). O volume fornecido é indicado em  $\text{m}^3/\text{min}$  ou  $\text{m}^3/\text{hora}$ .

## Pressão

Pressão de regime é a pressão fornecida pelo compressor, bem como a pressão do reservatório e a pressão na rede distribuidora até o consumidor. A pressão de trabalho é geralmente de 6 bar e os elementos de trabalho estão construídos para esta faixa, que é considerada quase como *pressão normalizada* ou *pressão econômica*.

Para mantermos uma pressão constante de trabalho precisamos controlar:

- a velocidade;
- as forças;
- os movimentos temporizados dos elementos de trabalho e de comando.

## **Acionamento**

O acionamento dos compressores, conforme as necessidades fabris, será por motor elétrico ou motor a explosão. Em instalações industriais, aciona-se na maioria dos casos, com motor elétrico. Tratando-se de uma estação móvel, emprega-se para o acionamento geralmente um motor a explosão (gasolina, óleo diesel).

## **Regulagem**

Para combinar o volume de fornecimento com o consumo de ar, é necessária uma regulagem dos compressores. Dois valores limites preestabelecidos (pressão máxima/mínima) influenciam o volume fornecido.

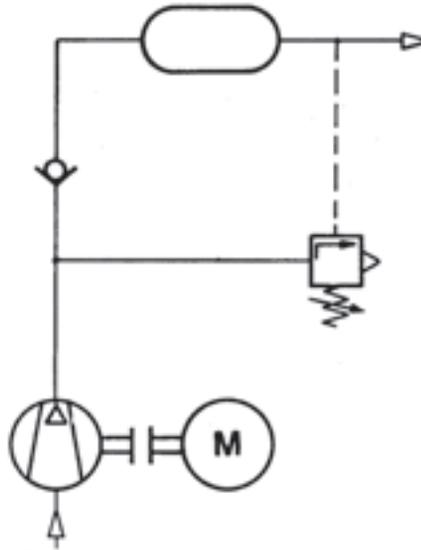
### **Regulagem de marcha vazia**

Regulagem de marcha vazia é a regulagem feita em compressor evitando que o mesmo trabalhe produzindo ar além da necessidade de projeto.

### **Regulagem por descarga**

Quando for alcançada a pressão pré-regulada, o ar escapará livre da saída do compressor por uma válvula. Uma válvula de retenção evita que o reservatório se esvazie ou retorne para o compressor.

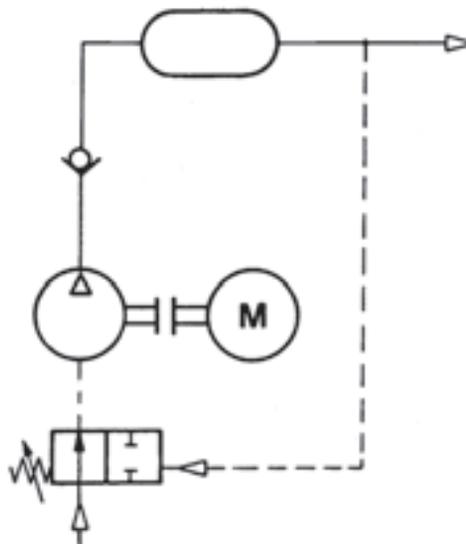
Figura 32 – Esquema de um compressor com regulagem por descarga



### Regulagem por fechamento

Nesse tipo de regulagem o lado da sucção é fechado. O compressor não pode mais aspirar e funciona só em vazio (estado sem pressão). Esta regulagem é encontrada especialmente em compressores de êmbolo rotativo e também em compressores de êmbolo de movimento linear.

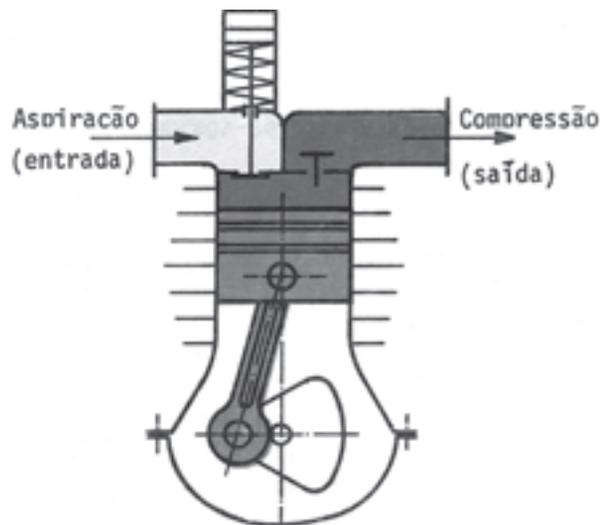
Figura 33 – Esquema de um compressor com regulagem por fechamento.



### Regulagem por garras

Esta é empregada em compressores de êmbolo. Mediante garras, mantém-se aberta a válvula de sucção, evitando, assim, que o compressor continue comprimindo. A regulagem é muito simples.

Figura 34 – Esquema de um compressor com regulagem por descarga.



### Regulagem de carga parcial

Neste tipo de regulagem é monitorado o consumo de ar e regula-se a produção de ar comprimido de acordo com o consumo instantâneo.

### Regulagem por rotação

Sobre um dispositivo, ajusta-se o regulador de rotação do motor a explosão. A regulagem da rotação pode ser feita manualmente ou automaticamente, dependendo da pressão de trabalho. Quando for usado acionamento elétrico, regula-se a rotação em escala, mediante motores de pólos comutáveis. Este sistema, porém, não é muito usado.

### Regulagem por estrangulamento

A regulagem se faz mediante simples estrangulamento no funil de sucção, e os compressores podem assim ser regulados para determinadas cargas parciais. A regulagem por estrangulamento é encontrada em compressores de êmbolo rotativo e em turbocompressores.

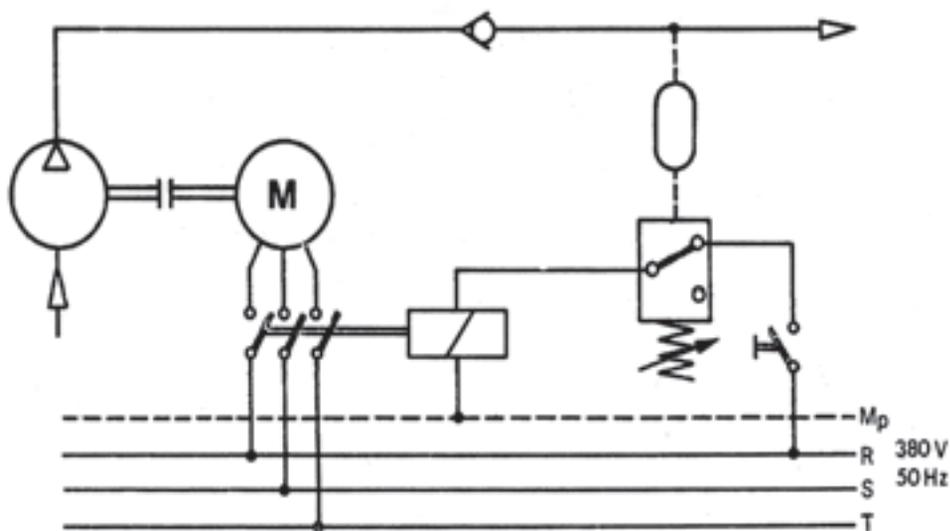
## Regulagem intermitente

Com esta regulagem o compressor funciona em dois campos (carga máxima e parada total).

Ao alcançar a pressão máxima, o motor acionador do compressor é desligado, e quando a pressão chega ao mínimo, o motor liga novamente e o compressor trabalha outra vez.

A frequência de comutações (liga/desliga) pode ser regulada em um pressostato e, para que os períodos de comando possam ser limitados a uma medida aceitável, é necessário um grande reservatório de ar comprimido.

Figura 35 – Esquema de um compressor com regulagem intermitente



## Refrigeração

A compressão do ar e o atrito criam calor no compressor, o qual precisa ser dissipado. Conforme o grau de temperatura no compressor é necessário escolher a refrigeração mais adequada. Em compressores pequenos serão suficientes pa-lhetas de aeração, para que o calor seja dissipado. Compressores maiores estão equipados com um ventilador para dissipar o calor.

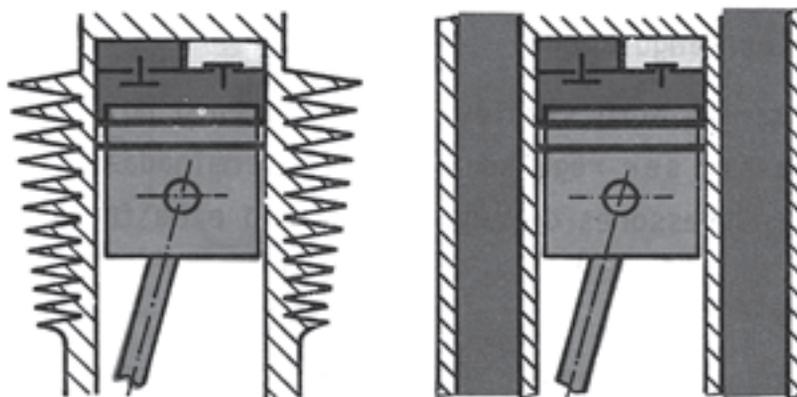
Para uma estação de compressores com uma potência de acionamento de mais de 30kW (40HP), uma refrigeração a ar é insuficiente. Os compressores devem, então, ser equipados com uma refrigeração a água circulante ou água corrente contínua.



### Fique ligado!

Freqüentemente não é levada em consideração uma instalação de refrigeração completa, com torre de refrigeração, devido ao seu alto custo, porém, uma refrigeração adequada prolonga em muito a vida útil do compressor e produz um ar melhor refrigerado, o que, em certas circunstâncias, torna desnecessária uma refrigeração posterior, ou a mesma pode ser feita com menor empenho.

**Figura 36 – Refrigeração por aletas e forçada por água circulante**



### Localização de montagem

A estação de compressores deve ser montada dentro de um ambiente fechado, com proteção acústica para fora. O ambiente deve ter boa aeração. O ar sugado deve ser fresco, seco e livre de poeira.

## Voltando ao desafio

Vamos agora voltar ao desafio apresentado no início do capítulo 4, fazendo a identificação dos componentes numerados do circuito. Foi pedida também a função dos componentes apresentados no circuito.

### Quadro 5

Componentes	Função
1 – Filtro de ar comprimido	Reter as partículas de ar comprimido que ficam em suspensão na atmosfera.
2 – Compressor de ar comprimido	Produzir ar comprimido para ser utilizado em um processo industrial.
3 – Acoplamento	Fazer a ligação entre motor elétrico e compressor.
4 – Motor elétrico	Acionar o compressor.
5 –Válvula de retenção	Permitir a passagem de fluxo somente em um sentido.
6 – Pressostato	Monitorar a pressão do reservatório ligando e desligando o motor elétrico.
7 – Resfriador posterior	Resfriar o ar após a compressão.
8 – Secador de ar comprimido	Retirar a umidade contida no ar comprimido.
9 – Manômetro	Medir a pressão.
10 – Termômetro	Medir a temperatura do ar.
11 – Separador de condensado com dreno automático	Separar o condensado contido no ar comprimido.
12 – Reservatório de ar comprimido	Armazenar o ar comprimido eliminando as oscilações de pressão na rede distribuidora e separar o condensado do ar.
13 – Válvula de alívio (segurança)	Em caso de falha no pressostato, ela é acionada limitando a pressão no reservatório e liberando o ar para a atmosfera.



### Fique ligado!

Os componentes dos compressores de ar devem ser sempre verificados quanto a seu estado de conservação, drenagem, regulagem e limpeza, pois isto garante um funcionamento seguro e eficiente.

## Resumindo

Neste capítulo você estudou sobre:

- os tipos de compressores utilizados na indústria;
- os critérios para seleção de compressores;
- os tipos de acionamentos, regulagens, refrigeração e localização de montagem.

## Aprenda mais

Para aprofundar seu estudo sobre o assunto, leia:

*Compressores, instalação, funcionamento e manutenção.* Illo da Silva Moreira e visite o site [www.ingersoll-rand.com.br](http://www.ingersoll-rand.com.br)





## Capítulo 5

---

# LUBRIFICAÇÃO

### Iniciando nossa conversa

A atenção e a importância que são dadas aos lubrificantes atualmente fazem com que, cada vez mais, as empresas passem a olhar esse segmento da manutenção como uma forma de reduzir custos, aumentar produtividade e melhorar o desempenho dos equipamentos.

Tudo começou no antigo Egito, com a necessidade de transportar colossos e blocos para a construção de esfinges e pirâmides. Como a lubrificação era desconhecida, os escravos egípcios usavam galhos de árvores para arrastar e puxar os trenós com aproximadamente 60 toneladas de blocos. A função dos galhos de árvore (roletes) era reduzir o atrito de deslizamento entre o trenó e o solo, transformando-os em atrito de rolamento.

Assim como as máquinas, os lubrificantes sofreram alterações tecnológicas para atender às necessidades dos processos industriais.

Hoje existem empresas no mercado que fabricam vários tipos de lubrificantes, de origem mineral, sintético e especiais. Além de ter uma grande utilização, o lubrificante tem formas de aplicações corretas. Para isso existem equipamentos para lubrificação, disponíveis no Brasil desde 1950, que são de uso fundamental e também minimizam o risco da contaminação dos lubrificantes.

Atualmente a lubrificação é fator decisivo no poder de competitividade, sendo uma fonte de ganhos, proporcionando melhorias no desempenho dos equipamentos e, principalmente, na redução nos custos de manutenção.

## Objetivos

Ao estudar este capítulo, temos como objetivos:

- determinar os tipos de óleos lubrificantes, quanto à sua origem e compatibilidade com outros materiais e viscosidade.
- aplicar as tabelas de óleos lubrificantes de acordo com os fabricantes de compressores.

## Um desafio para você

Durante o processo de drenagem verificou-se excesso de óleo lubrificante no condensado. O operador apontou em relatório (O.S.) o ocorrido, e enviou para que o pessoal de manutenção realizasse a devida manutenção corretiva.

Liste as possíveis causas e soluções para o problema.

## Continuando nossa conversa

A lubrificação do compressor tem por finalidade reduzir o atrito entre as peças móveis em contato, diminuindo o desgaste e esfriando o compressor. Em compressores de pistão, as partes a serem lubrificadas são: conjunto biela-manivela e seus respectivos mancais, bronzinas, pinos e camisas dos cilindros.

Há dois tipos de lubrificação: por salpico e forçada. Na lubrificação por salpico, o virabrequim, ao girar, faz com que a biela mergulhe no óleo lubrificante armazenado no cárter do compressor, salpicando óleo nas peças móveis. Na lubrificação forçada, uma bomba é acionada pelo eixo do compressor e pressuriza óleo lubrificante nas partes móveis do mesmo.

Em qualquer tipo de lubrificação deve-se usar, no cárter do compressor, óleo específico para compressores, ou seja, óleo mineral não-detergente com inibidores de oxidação ferrugem e com viscosidade SAE 30.



### Fique ligado!

Em compressores com lubrificação forçada usam-se pressostatos de óleo como dispositivos de segurança. Assim, caso haja queda de pressão de lubrificação, o pressostato desliga o compressor.



### Atenção!

Em compressores com lubrificação por salpico, deve-se verificar o nível de óleo diariamente, o que é feito por meio de visores apropriados.

## Tipos de óleos utilizados nos compressores

Os óleos mais freqüentemente encontrados nos compressores atuais são os óleos minerais, sendo especificados pelos fabricantes dos compressores. No entanto, em algumas aplicações já são utilizados óleos sintéticos.

Os óleos sintéticos têm custo mais elevado, porém apresentam maior durabilidade.



### Fique ligado!

Poucas são as referências encontradas nos fabricantes de compressores sobre a redução de consumo pela utilização de óleos sintéticos. Somente uma referência marginal foi obtida indicando uma economia média de 2% quando da utilização de óleos sintéticos.

Caso seja feita a troca do óleo mineral por óleo sintético, alguns cuidados devem ser tomados:

- a troca de óleo mineral por sintético é possível nas 100 primeiras horas de operação do compressor;
- poderá ser necessário trocar as gaxetas e outros elementos de vedação do compressor;
- verificar a compatibilidade do óleo sintético com os materiais com os quais irá entrar em contato no interior do compressor;
- realizar a troca somente com o aval do fabricante do compressor.

A utilização de óleos sintéticos oferece outros benefícios como:

- vida útil do óleo superior à do óleo mineral, reduzindo a necessidade de troca de óleo e da consequente parada do equipamento;
- redução da quantidade de óleo descartada;
- diminuição de depósitos de carbono e vernizes;
- redução de consumo de energia elétrica.



### Fique ligado!

Utilize sempre óleo lubrificante recomendado pelo fabricante do compressor, observando os períodos de troca e o nível de óleo do cárter.

## Voltando ao desafio

O excesso de óleo lubrificante percebido durante o processo de drenagem, tende a aumentar o nível de desgaste dos componentes metálicos durante o funcionamento, podendo provocar: travamento mecânico, entupimento dos canais por onde passa o óleo lubrificante e desarme do conjunto pelo pressostato de óleo.

As possíveis causas para o problema descrito neste desafio podem ser:

- lubrificante incorreto;
- folga do conjunto (pistão/cilindro);
- superaquecimento do conjunto.

## Resumindo

Neste capítulo você teve a oportunidade de estudar diversas questões relacionadas com os lubrificantes, aprendendo que:

- o lubrificante exerce um importante papel no processo de produção de ar comprimido;
- a análise periódica do óleo lubrificante como nível e presença de contaminantes garante uma maior vida útil do equipamento e redução do consumo de energia necessária para a produção do ar comprimido.

## Aprenda mais

Para aprofundar seu estudo sobre o assunto, consulte a apostila Princípios de Lubrificação (Shell). A Internet é também uma boa fonte de informação, visite o site [www.shell.com.br](http://www.shell.com.br), lá você encontra outras informações sobre o tema.



## Capítulo 6

---

# VAZAMENTOS

### Iniciando nossa conversa

Todos os sistemas de ar comprimido têm vazamentos e são comuns perdas de até 40% de todo o ar comprimido produzido. Portanto, identificar, eliminar e reduzir os vazamentos de ar comprimido é uma das maneiras mais simples e eficientes de economizar a energia necessária para a compressão.

Válvulas, tubos, mangueiras e conexões mal vedadas, corroídas, furadas e sem manutenção são responsáveis por vazamentos de enormes proporções num sistema pneumático.

Um método simples para estabelecer a grandeza dessas perdas é interromper o consumo de todo o ar comprimido do sistema, mantendo os compressores em operação. Com isso, a pressão na rede chegará ao seu limite máximo. Dependendo do tipo de controle de cada compressor, eles deveriam desligar-se ou entrar em alívio, pois não haveria consumo de ar.

### Objetivos

O estudo dos temas abordados neste capítulo tem como objetivos:

- demonstrar, por meio de tabelas, as perdas em função do furo e o custo destas perdas.
- determinar vazamentos por diferencial de pressão.

## Um desafio para você

1) Demonstrar na Tabela 2 as perdas de ar em função de um furo de 5mm a uma pressão de 588,36 kPa, determinar o custo da potência necessária para compressão e calcular o número de lâmpadas incandescentes de 60 Watts equivalentes a este desperdício de energia.

**Tabela 2 – Vazamentos e perda de potência em furos**

Diâmetro do furo			Escape do ar em		Potência necessária para compressão	
			588.36 kPa	85 psi		
Tamanho real	mm	pol	m <sup>2</sup> /s	c.f.m	cv	kW
•	1	3/64	0.001	2	0,4	0.3
●	3	1/8	0.01	21	4,2	3.1
●	5	3/16	0.027	57	11,2	8.3
●	10	3/8	0.105	220	44	33

## Continuando nossa conversa

Qualquer sistema de ar comprimido apresenta vazamento ao longo do seu funcionamento, em maior ou menor escala. Mesmo instalações novas, com seis meses de uso, podem apresentar índices de vazamentos de 10% ou mais.

Não somente ocorrem vazamentos na rede de ar comprimido propriamente dita, como nos próprios equipamentos consumidores.



### Atenção!

Uma manutenção regular faz-se necessária em todo sistema devido à deterioração natural de vedações, mangueiras, tubos, etc.

A seguir, são apresentadas algumas medidas com as quais estes vazamentos podem ser minimizados.

- Colocação de válvulas solenóides na entrada do ar comprimido do equipamento. Desligando-se o equipamento, a válvula solenóide é fechada, eliminando uma fonte de vazamentos.
- É claro que esta medida não exclui a necessidade de manutenção do equipamento, que é necessária para reduzir os vazamentos durante a operação do mesmo.
- Desligar o compressor de ar à noite, quando não há produção, pois neste período o compressor trabalha somente para cobrir perdas por vazamento.
- A maneira mais simples de detecção de vazamentos em tubulações de ar comprimido consiste em passar água com sabão ao longo das mesmas, marcando os pontos de formação de bolhas, para posterior correção pela manutenção.
- Por meio de campanhas internas pode ser institucionalizado o uso de marcadores (fitas, adesivos), os quais são afixadas em pontos de vazamentos detectados pelos funcionários, para posterior correções pela manutenção.

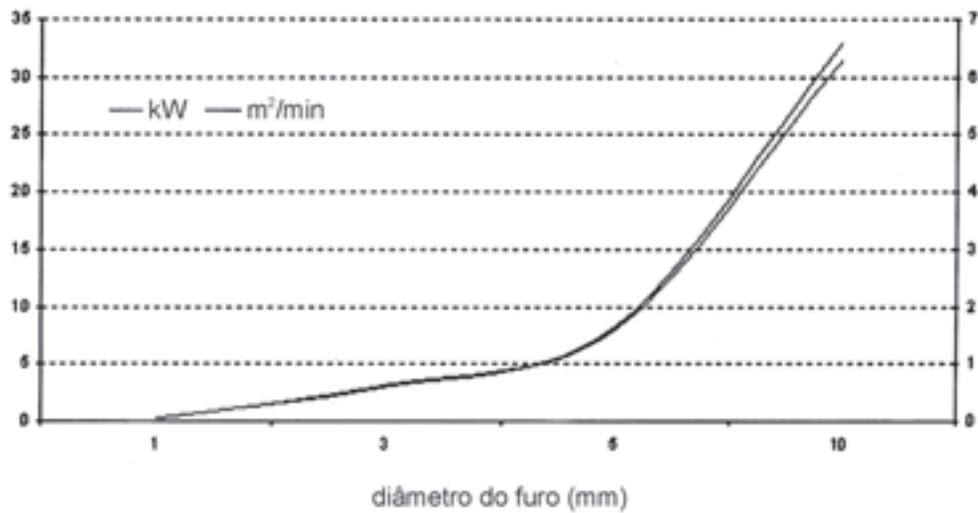


### Fique ligado!

Parece óbvio que o desligamento do compressor de ar à noite reduz o vazamento, mas a experiência tem nos mostrado que nem sempre ele é desligado.

A seguir é apresentado um gráfico com as perdas em função do tamanho do furo, a uma pressão de 6 bar.

Gráfico 6 – Relação entre as perdas pelo diâmetro do furo



Alguns exemplos fornecem uma noção do impacto dos vazamentos de ar comprimido sobre a geração do mesmo:

- o vazamento por um orifício de 3 mm, a 6 bar, corresponde a um consumo de 5 ferros de passar roupa;
- a perda devida a um orifício de 5 mm, a 6 bar, é equivalente ao consumo de um martelete pneumático para perfuração de rocha.



### Atenção!

Enquanto as ferramentas pneumáticas operam 40% a 50% do tempo, os vazamentos ocorrem em tempo integral.



### Fique ligado!

Um vazamento de ar comprimido a 6 bar de pressão, através de um orifício de 1mm corresponde ao consumo de 3 lâmpadas de 100 W.

## Medição de vazamentos de ar comprimido

Para evitar que deturpem os resultados, todas as medições para a quantificação de vazamentos de ar comprimido devem ser realizadas com os equipamentos consumidores de ar desligados.

Por este motivo, as medições geralmente são realizadas em finais de semana, durante férias coletivas ou em outros períodos com a produção desativada.

Devem ser realizadas, no mínimo, três medições do mesmo tipo, trabalhando-se com a média dos valores calculados de acordo com os métodos apresentados a seguir, após expurgo de valores discrepantes.

No método apresentado a seguir, a medição deve ser iniciada após o reservatório ter sido enchido até a pressão máxima regulada; quando o compressor iniciar trabalho em vazio ou se desligar, dependendo do controle utilizado.



### Atenção!

Na medição de vazamentos em sistemas com múltiplos compressores de ar, convém desligar todos, com exceção do compressor utilizado nas medições.

## Medição por diferencial de pressão no reservatório

Este método deve ser aplicado somente no caso da utilização de compressores com modulação no teste, pois para fornecer resultados confiáveis, além do volume do reservatório, é necessário conhecer o volume total da tubulação de ar comprimido.

O teste consiste nos seguintes passos:

- determinar o volume total do reservatório e da tubulação [m<sup>3</sup>];
- desligar todos os consumidores de ar comprimido;
- elevar a pressão no reservatório até a pressão de operação (P<sub>0</sub>);
- fechar a válvula entre o compressor e o reservatório;
- medir o tempo até que a pressão caia até um ponto arbitrário (P<sub>1</sub>);



### Atenção!

A medição de vazamentos é realizada com a alimentação do reservatório (saída do compressor) fechada.

A quantidade inicial de ar livre contida no sistema é dada por:

$$Q_0 = \frac{P_0 + P_{atm}}{P_{atm}} \cdot V$$

Onde:

$Q_0$  [m<sup>3</sup>] Quantidade de ar livre inicial

$P_0$  [bar] Pressão no reservatório no início do teste

$P_{atm}$  [bar] Pressão atmosférica

$V$  [m<sup>3</sup>] Volume do reservatório + tubulação

A quantidade final de ar livre contida no sistema é dada por:

$$Q_1 = \frac{P_1 + P_{atm}}{P_{atm}} \cdot V$$

Onde:

$Q_1$  [m<sup>3</sup>] Quantidade de ar livre final

$P_1$  [bar] Pressão no reservatório no final do teste

Considerando-se a temperatura constante, a vazão devida aos vazamentos pode ser determinada:

$$V_V = \frac{\left(\frac{P_0 + P_{atm}}{P_{atm}}\right) \cdot V - \left(\frac{P_1 + P_{atm}}{P_{atm}}\right) \cdot V}{t}$$

$$V_V = \frac{V}{t} \left( \frac{P_0 + P_{atm}}{P_{atm}} - \frac{P_1 + P_{atm}}{P_{atm}} \right)$$

$$V_V = \frac{V}{t} \left( \frac{P_0 - P_1}{P_{atm}} \right)$$

$$V_V = \frac{V}{t} (P_0 - P_1)$$

Assumindo-se  $P_{atm} = 1\text{bar}$ :

Onde:

$V_V$  [m<sup>3</sup>/s] Vazão por vazamento

$V$  [m<sup>3</sup>] Volume do reservatório + tubulação

$t$  [s] Tempo de medição total

$P_0$  [bar] Pressão inicial

$P_1$  [bar] Pressão final



## Fique ligado!

A vazão foi dada em  $\text{m}^3/\text{s}$ . Para obter a unidade mais usual de  $\text{m}^3/\text{min}$ , basta multiplicar o resultado por 60.

Observe os aspectos a seguir:

- Inclua o volume da tubulação nos cálculos, principalmente se o volume desta for superior a 10% do volume do reservatório. Caso contrário o erro encontrado nos cálculos é muito elevado.
- Ao trabalhar com diferença de pressões, pode-se utilizar as pressões manométricas nos cálculos.

## Voltando ao desafio

Voltando ao desafio proposto no início do capítulo 6, localizamos na primeira coluna do diâmetro do furo (5mm) e projetamos na linha até a interseção da mesma com a coluna escape de ar, encontrando a vazão de  $0,027\text{m}^3/\text{s}$ , para uma pressão de 588,36kPa. Prolongando esta linha até a interseção com a última coluna (potência necessária para compressão), encontraremos o valor em kW, o qual transformaremos para Watt (multiplicando por 1.000) e dividiremos o resultado pela potência consumida por lâmpada, encontrando, desta maneira, o número total de lâmpadas.

$$\text{N}^\circ \text{ de lâmpadas} = (8,3 \times 1000) \text{ W}$$

$$60\text{W/lampadas}$$

Portanto, o compressor terá que consumir de energia o equivalente ao consumo de 138 lâmpadas de 60w para repor o ar que vazou pelo furo da mangueira.

## Resumindo

Neste capítulo você pode verificar que:

- adicionando acessórios como válvula solenóide, eliminam-se vazamentos na rede;
- a manutenção regular ajuda a prevenir estes vazamentos;
- é necessário desligar o compressor quando não há produção para evitar o desperdício de energia, pois neste período o mesmo trabalha somente para cobrir perdas por vazamentos.

## Aprenda mais

Para aumentar seus conhecimentos sobre o assunto, consulte o *Manual de ar comprimido* – Metalplan. Visite também os seguintes sites:

[www.fargon.com.br](http://www.fargon.com.br)

[www.chicagopneumatic.com.br](http://www.chicagopneumatic.com.br)



## Capítulo 7

---

# CAPTAÇÃO DE AR PARA COMPRESSÃO

### Iniciando nossa conversa

Para a produção de ar comprimido são necessários compressores que comprimem o ar para a pressão de trabalho desejada. Na maioria dos acionamentos e comandos pneumáticos encontra-se, geralmente, uma estação central de distribuição de ar comprimido. A captação do ar atmosférico deve ficar distante de quaisquer tipos de fonte de contaminação ou calor, tais como: torres de resfriamento de água, banhos químicos, caldeiras, etc. O descuido gera problemas com a qualidade do ar comprimido e com o consumo de energia.

Durante o processo de compressão, o ar é aquecido, devendo esse calor ser retirado do ar comprimido mediante processos de resfriamento e secagem. Após a secagem, o mesmo será armazenado em reservatório para alimentar os consumidores, fluindo por meio de redes de distribuição de ar comprimido.

### Objetivos

A leitura deste capítulo tem por objetivos:

- conhecer os princípios da produção do ar comprimido;
- descrever as características de uma instalação de produção de ar comprimido;
- definir os tipos de resfriadores e secadores;
- distinguir a importância da rede de distribuição de ar comprimido;
- descrever os tipos de redes distribuidoras existentes de ar comprimido.

## Um desafio para você

1) Determine o percentual de perdas por temperaturas elevadas na captação do ar em uma central de produção de ar comprimido de uma determinada indústria e considerando o percentual de perdas por temperaturas elevadas, calcule o custo devido a temperatura elevada na captação deste ar.

Dados:

$T_0$  temperatura do ar ambiente (42°C)

$T'_0$  temperatura do ar na captação (36°C)

Utilizando-se a fórmula a seguir, e checando o resultado obtido, com o exposto na Tabela 2 (Vazamentos e perda de potência em furos), que se encontra no capítulo anterior.

$$T_{\%} = \left(1 - \frac{T'_0}{T_0}\right) \cdot 100$$

$T_0$  [K] Temperatura do ar ambiente

$T'_0$  [K] Temperatura do ar captado otimizado

Obs. (K) *Kelvin* (temperatura absoluta SI)

$$C_T = C_{ac} \cdot \frac{T_{\%}}{100}$$

Onde:

$C_T$  [R\$/ano] Custo devido a temperaturas elevadas na captação do ar.

$C_{ac}$  [R\$/ano] Custo anual de geração de ar comprimido, compressor em carga.

$T_{\%}$  [%] Percentual de perdas por temperaturas elevadas na captação.

$C_{ac} = \text{R\$ } 36.000,00/\text{ano}$

$T_{\%} = 1,90\%$

## Continuando nossa conversa

A temperatura ambiente influi de forma fundamental sobre a eficiência energética do compressor. Da mesma forma o faz a temperatura do ar captado para ser comprimido.

Muitas vezes os compressores encontram-se instalados em salas de máquinas ao lado de caldeiras, em áreas sem ventilação ou em outras áreas sem captação de ar fresco. Outras vezes, encontram-se compressores com captação de ar externa, localizando-se esta exposta diretamente ao sol.



### Atenção!

- O compressor de ar deve ser instalado em área bem ventilada, de modo que o mesmo capte o ar mais frio possível.
- Não sendo possível instalação em ambiente arejado, deve ser instalado um duto de alimentação que liga a entrada de ar do compressor ao exterior; posicionando-se a captação em local sombreado.
- O projeto desta tubulação deve ser feito por um especialista, garantindo o fluxo de ar necessário à alimentação do compressor.

Em locais propensos a baixas temperaturas deve ser previsto um *by-pass* para evitar o congelamento do compressor. Atingindo temperaturas em torno de 10°C, o *by-pass* é acionado, fechando a captação de ar externa, passando a utilizar o ar ambiente, mais quente.

De preferência, este *by-pass* deve ser automatizado, evitando falhas humanas na operação.

A seguir, vamos analisar a questão do percentual de perdas por temperatura elevadas na captação do ar.

## Percentual de perdas por temperaturas elevadas na captação do ar

É importante aprender a calcular o percentual de perdas, por isso apresentamos a seguir a equação que nos permite realizar esse cálculo.

Considerando-se  $T_0 > T'_0$  - o percentual de perdas devida a temperaturas elevadas na captação do ar pode ser definido como:

$$T_{\%} = \left( 1 - \frac{T'_0}{T_0} \right) \cdot 100$$

Onde:

$T_{\%}$  [%] Percentual de perdas por temperaturas elevadas na captação

$T_0$  [K] Temperatura inicial do ar

$T'_0$  [K] Temperatura inicial do ar, pós-otimização

## Tabela auxiliar

Para evitar um excessivo cálculo manual das perdas percentuais devido a temperaturas elevadas na captação do ar, encontra-se a seguir uma tabela com os valores calculados para diferentes temperaturas.

Na primeira coluna procura-se a temperatura atual ( $T_0$ ) e na primeira linha a temperatura otimizada ( $T'_0$ ). Na interseção da linha referente à temperatura atual com a coluna da temperatura otimizada encontra-se a perda percentual procurada.

No exemplo a seguir, a redução da temperatura do ar captado de 44°C para 35°C reduz as perdas no sistema em 2,84%.

**Tabela 3 – Perdas percentuais por temperaturas elevadas na captação de ar**

	PARA									
	44°C	43°C	42°C	41°C	40°C	39°C	38°C	37°C	36°C	35°C
45°C	0,31%	0,63%	0,94%	1,26%	1,57%	1,89%	2,20%	2,51%	2,83%	3,14%
44°C		0,32%	0,63%	0,95%	1,26%	1,58%	1,89%	2,21%	2,52%	2,84%
43°C			0,32%	0,63%	0,95%	1,27%	1,58%	1,90%	2,21%	2,53%
42°C				0,32%	0,63%	0,95%	1,27%	1,59%	1,90%	2,22%
41°C					0,32%	0,64%	0,95%	1,27%	1,59%	1,91%
40°C						0,32%	0,64%	0,96%	1,28%	1,60%
39°C							0,32%	0,64%	0,96%	1,28%
38°C								0,32%	0,64%	0,96%
37°C									0,32%	0,64%
36°C										0,32%

### Custo devido à temperatura elevada na captação de ar

O custo devido à temperatura elevada na captação do ar é determinado pela fórmula a seguir, sendo utilizada somente quando o compressor apresentar em carga:

$$C_T = C_{ac} \cdot \frac{T_{\%}}{100}$$

Onde:

$C_T$  [R\$/ano] Custo devido a temperaturas elevadas na captação do ar.

$C_{ac}$  [R\$/ano] Custo anual de geração de ar comprimido, compressor em carga.

$T_{\%}$  [%] Percentual de perdas por temperaturas elevadas na captação.

### Preparação de ar comprimido

Antes de ser distribuído pela rede aos consumidores, o ar comprimido passa por cinco processos de preparação e tratamento. O ar é esfriado, secado, filtrado, calibrado em pressão e lubrificado.

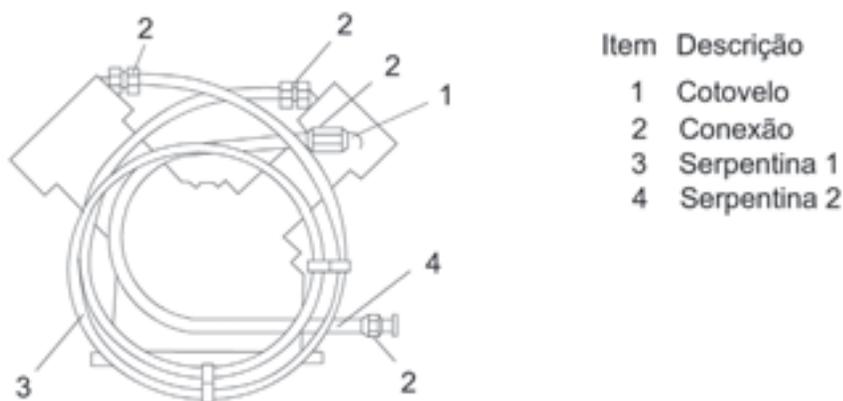
### Resfriadores ou trocadores de calor

Os compressores reduzem o volume do ar para que a pressão aumente. Como pressão e temperatura são diretamente proporcionais, o ar atinge temperaturas excessivamente elevadas. Em compressores de diversos estágios, normalmente

se utilizam resfriadores intermediários (entre estágios). Dependendo da produção efetiva de ar, esses resfriadores trabalham sob a atuação do ar ou da água. Em compressores de um só estágio, o resfriamento do ar é feito logo na saída do compressor, antes da entrada do ar no reservatório.

Os resfriadores a ar são serpentinas ligadas entre um e outro estágio do compressor. Essas serpentinas são ventiladas pela hélice do volante do compressor, esfriando assim o ar comprimido que flui dentro delas.

**Figura 37 – Esquema das serpentinas**



Os resfriadores à água são utilizados apenas em compressores de grande porte cuja produção efetiva de ar comprimido é muito elevada.



### Fique ligado!

O ar comprimido a alta temperatura, além de reduzir a eficiência do compressor, pode, ainda, causar acidentes ao operador e danificar os componentes pneumáticos.

## Secadores

Os secadores servem para retirar a umidade do ar comprimido, esteja ela em estado líquido ou em forma de vapor.

Após ser comprimido e devidamente resfriado, é preciso remover toda a umidade do ar. Isto pode ser feito antes ou depois de ser armazenado no reservatório.

**Figura 38 – Tipos de secadores**



O ar comprimido pode ser secado de três maneiras diferentes. Confira a seguir.

**Quadro 6**

Secagem do ar comprimido	
Processo	Características
Secagem por absorção	Trata-se de um processo químico que consiste no contato do ar comprimido com o elemento secador. A água ou vapor, em contato com esse elemento, mistura-se quimicamente com ele formando um barro que deverá ser removido periodicamente do absorvedor. Portanto, o elemento secador deve ser trocado de duas a quatro vezes por ano, dependendo da umidade relativa do ar da região.
Secagem por adsorção	A secagem por adsorção é um processo físico em que o ar comprimido entra em contato com um elemento secador que tem a função de reter a umidade e liberar o ar seco. Esse elemento, constituído de quase 100% de dióxido de silício(SiO <sub>2</sub> ), é conhecido no mercado como sílica gel.
Secagem por resfriamento	A secagem por resfriamento é feita diminuindo a temperatura do ar comprimido, para que a umidade nele contida se condense e passe ao estado líquido. Com isso o ar entra no secador quente e úmido e sai frio e seco.



**Fique ligado!**

O ar deve ser secado antes de ser distribuído na rede, devido ao fato de que os componentes pneumáticos, em sua maioria, serem metálicos, e, portanto, sujeitos à corrosão.

## **Projeto, instalação e manutenção de ar comprimido**

Quando um projeto de instalação de ar comprimido não for bem realizado, diversos problemas de difícil correção futura ocorrerão, aumentando desnecessariamente o custo de geração e distribuição. O local da instalação dos compressores deverá ser bem ventilado, seco e situar-se o mais próximo possível dos consumidores finais. Deve ser deixado espaço suficiente entre os equipamentos para que o ar possa circular livremente. Recomenda-se verificar nos catálogos dos fabricantes a distância mínima indicada para o afastamento de paredes e dos outros compressores.

Os secadores de ar comprimido, os reservatórios e demais equipamentos devem ser dimensionados de acordo com a capacidade máxima dos compressores. Em caso de expansão, deve-se verificar se os equipamentos auxiliares ainda atendem à nova demanda de ar comprimido.

Os componentes e demais equipamentos devem ser mantidos de acordo com as especificações dos fabricantes, dando-se especial atenção à troca de óleo e filtros nos compressores. Nas tubulações com conexões roscadas, as perdas costumam ser superiores à das tubulações com conexões soldadas.

O acúmulo de umidade no interior das tubulações, além de causar danos aos consumidores finais, causa vazamentos e aumenta a perda de carga. Tubulações muito antigas podem apresentar rugosidade muito elevada aumentando a perda de carga.

Mangueiras e seus conectores rápidos são fonte constante de preocupação por causa dos vazamentos que causam, assim como os copos de separação de umidade próximos aos consumidores, pois, quando não estão rachados, são mantidos abertos pelos operadores de máquinas.

### **Tubulações**

Para evitar o acúmulo de umidade nas tubulações, estas devem apresentar um caimento na direção do fluxo e ter purgadores instalados em pontos definidos. Estes purgadores devem ser acionados constantemente para evitar que travem em posição fechada (acúmulo de água) ou aberta (perda de ar comprimido).

Para o projeto pode-se considerar como perda máxima admissível uma perda de carga de 0,08kgf/cm<sup>2</sup> a cada 100 metros, para o caso de as tubulações não puderem seguir as recomendações apresentadas a seguir.

As linhas de ar comprimido podem ser divididas em três categorias:

- A linha principal é aquela que leva o ar comprimido dos compressores até a instalação de consumidores. A velocidade máxima do ar comprimido nesta tubulação, para fins de projeto, deve ser considerada igual a 8m/s e a sua perda de carga máxima admissível deve ser mantida em 0,04bar, se possível.
- A linha de distribuição (secundária) é aquela que distribui o ar comprimido dentro da instalação até próximo aos consumidores. Sua forma pode ser variada, sendo a mais usual a distribuição em anel fechado. A velocidade máxima do ar comprimido nesta tubulação, para fins de projeto, deve ser considerada entre 7 a 10m/s (desde que com comprimento inferior a 10m) e sua perda de carga admissível máxima deve ser mantida em 0,03bar, se possível.
- As linhas de serviço são aquelas que levam o ar comprimido da linha de distribuição até o consumidor final. Usualmente são formados por uma tubulação rígida na parte inicial, terminando em uma mangueira flexível para permitir uma conexão mais cômoda ao consumidor. A velocidade máxima do ar comprimido nesta tubulação, para fins de projeto, deve ser considerada igual a 15m/s e sua perda de carga máxima deve ser mantida em 0,03 bar, se possível.

## Redes de distribuição de ar

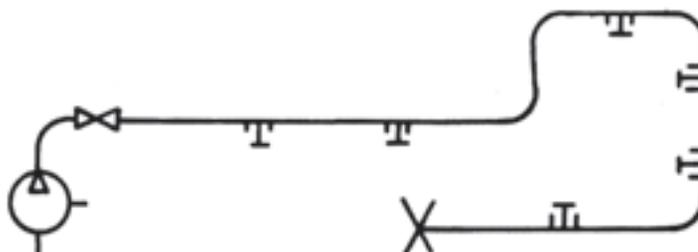
As redes de distribuição de ar comprimido requerem manutenção regular, por isso essas redes não devem ser montadas dentro de paredes, de cavidades estreitas ou subterrâneas. Nesses casos, pequenos vazamentos levariam a consideráveis perdas, além da dificuldade de localizá-los.

A seguir apresentamos os três tipos principais de redes de distribuição.

### Rede de distribuição em circuito aberto

Utiliza-se este tipo de rede somente em oficinas pequenas, pois a pressão de alimentação do ar comprimido é proporcional à distância do compressor. Noutras palavras, à medida que a distância aumenta, do ponto de utilização do ar para o compressor, a pressão do ar diminui.

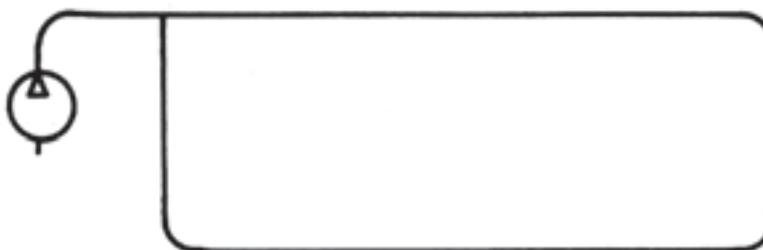
Figura 39 – Esquema do circuito aberto



### Rede de distribuição em circuito fechado

Neste tipo de rede, conhecida também como *rede de distribuição em anel*, as perdas de pressão não ocorrem com a mesma intensidade que no circuito aberto, isto porque, no ponto da linha mais distante do compressor, o ar flui de ambas as direções. Dessa forma, o circuito fechado é utilizado preferencialmente em oficinas de médio porte.

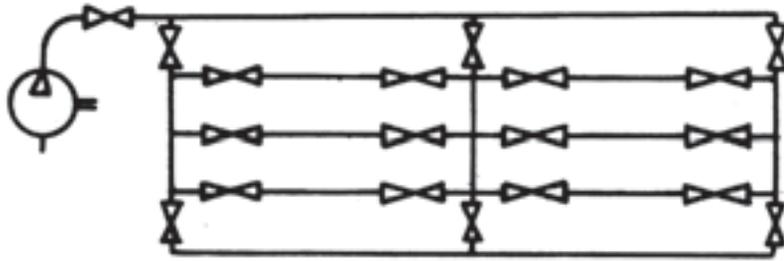
Figura 40 – Esquema do circuito fechado



### Rede combinada

A rede combinada consiste em um circuito fechado dividido em setores. Tais setores podem ser isolados da rede principal por meio de válvulas de fechamento. Isso facilita a manutenção de cada setor, sem ter de despressurizar toda a linha. Usa-se a rede combinada nos pavilhões das grandes indústrias, onde a produção não pode ser paralisada quando houver necessidade de manutenção em algum trecho da rede de alimentação de ar comprimido.

Figura 41 – Esquema do circuito combinado

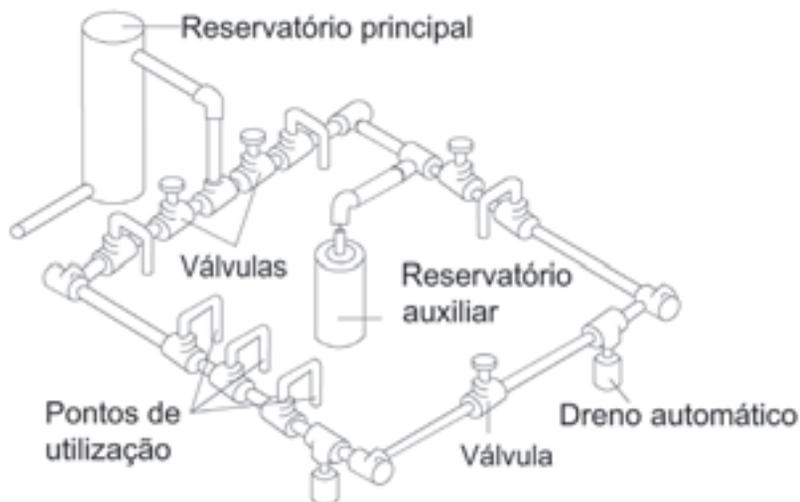


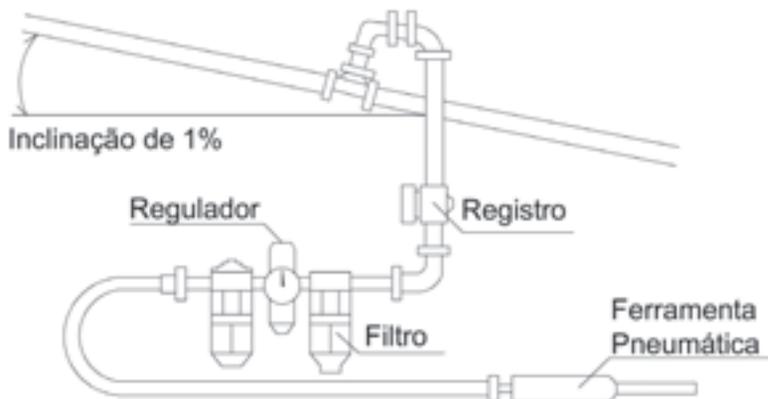
### Fique ligado!

Seja qual for a rede utilizada, todos os pontos da derivação secundária devem ser gerados na parte superior da tubulação de alimentação da linha principal e realizar a drenagem periódica dos mesmos.

Os tubos da linha principal, em regra, têm uma inclinação de cerca de 1% do seu comprimento. Nos pontos mais baixos, devem ser montados purgadores automáticos para a drenagem do condensado água-óleo.

Figura 42 – Tomadas de ar da rede principal



**Figura 43 – Detalhe de inclinação da rede principal**

Na entrada de alimentação de ar comprimido das máquinas pneumáticas deve ser instalada uma unidade de conservação, composta por um filtro, um regulador de pressão com manômetro e um lubrificador.

### Armazenamento do ar comprimido

O ar comprimido produzido por compressores de deslocamento positivo deve ser armazenado em reservatórios ou vasos de pressão.

O reservatório serve para estabilizar a distribuição do ar comprimido. Ele elimina as oscilações de pressão na rede distribuidora e garante uma reserva de ar quando houver, momentaneamente, alto consumo. Além disso, a grande superfície interna do reservatório refrigera parcialmente os ares suplementares, separando, assim, uma parte da umidade do ar.

Quanto ao dimensionamento, em regra geral, a capacidade do reservatório é calculada para conter, no mínimo, um décimo da produção efetiva de ar do compressor.

Observe, a seguir, a fórmula para calcular a capacidade de um reservatório.

$$V = \frac{Q}{10}$$

Onde:

V = volume do reservatório em m<sup>3</sup>

Q = produção efetiva em m<sup>3</sup>/min



## Fique ligado!

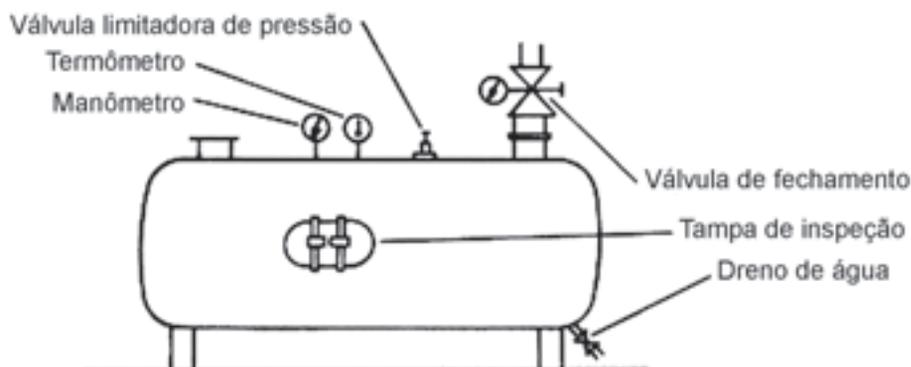
Periodicamente o reservatório deve passar por um teste hidrostático (teste de resistência à pressão de projeto), a fim de verificar o estado da sua estrutura.

Um reservatório bem projetado deve conter:

- dreno de água;
- registro para descarga de ar;
- tampas de inspeção que facilitem a limpeza periódica;
- registro geral para abertura e fechamento do ar;
- manômetro para verificar a pressão do ar;
- termômetro para medir a temperatura do ar;
- válvula de segurança;
- válvula de retenção;
- pressostato para compressores que trabalham em regime intermitente;
- válvula piloto;
- válvula de descarga para compressores que trabalham em regime contínuo.

### Figura 44 – Reservatório de ar

A seguir, vamos aprofundar nossos conhecimentos sobre cada um desses itens.



## Dreno de água

O vapor de água no ar comprimido, em contato com a superfície interna fria do reservatório, se condensa e volta ao estado líquido, acumulando-se no fundo do tanque. Por meio do dreno de água, é possível retirar esse condensado do reservatório evitando, desse modo, a redução da capacidade de armazenagem.

## Registro para descarga de ar

Trata-se de um registro rosqueado no reservatório. Esse registro serve para descarregar o ar comprimido do tanque na atmosfera, quando houver necessidade de manutenção de algum acessório do reservatório.

## Tampa de inspeção

Normalmente os reservatórios de grande porte possuem uma tampa parafusada na lateral. Isso possibilita a inspeção e a limpeza periódica do interior do tanque. Antes da tampa ser retirada, é necessário que o operador descarregue todo o ar comprimido do reservatório, pela válvula de descarga de ar.

## Registro geral

O registro geral é conhecido também como *válvula de fechamento*. É utilizado quando se faz necessária a manutenção de algum componente localizado na rede de distribuição de ar comprimido. Em algumas situações é preciso que o ar já comprimido não seja totalmente descarregado. Nesse caso, fecha-se o registro geral até que o defeito da linha de distribuição seja reparado.

## Manômetro

Manômetro é um instrumento empregado na hidráulica e na pneumática para medir pressão. O manômetro rosqueado no reservatório serve para medir a pressão do ar comprimido no seu interior e auxilia na regulagem da válvula de segurança, do pressostato e da válvula piloto.

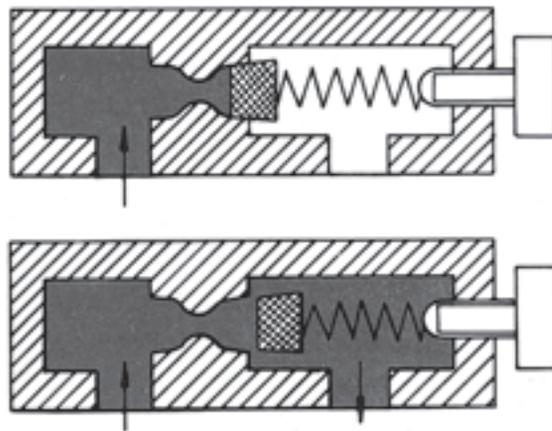
## Termômetro

O termômetro é utilizado em alguns reservatórios para medir a temperatura do ar comprimido. Indica quando é necessário instalar um resfriador na saída do ar que alimenta a rede de distribuição.

## Válvula de segurança

A válvula de segurança é um componente de vital importância no reservatório. Ela evita a explosão do tanque, não permitindo que a pressão do ar comprimido ultrapasse o limite máximo suportado pela chapa. A válvula de segurança serve, ainda, para descarregar o excesso de ar comprimido do reservatório. Isso acontece quando a pressão do ar ultrapassa a pressão máxima calibrada na válvula. Ela deve ser regulada com o auxílio de um manômetro, sempre abaixo da pressão máxima permitida para o trabalho do compressor e do reservatório de ar comprimido.

Figura 45 – Vista em corte da válvula de segurança



## Válvula de retenção

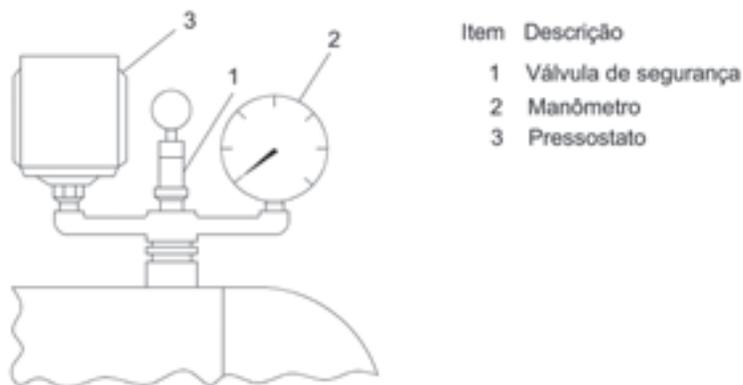
A válvula de retenção serve para evitar que o ar do reservatório volte ao compressor quando ele estiver trabalhando em vazio (regime contínuo) ou quando ele parar (regime intermitente). Isso acontece toda vez que a pressão do ar comprimido no tanque atinge o limite máximo de trabalho.

## Pressostato

O pressostato é um dispositivo eletropneumático que serve para ligar e desligar o motor elétrico de acionamento do compressor em períodos sucessivos. Esses períodos são determinados em função da produção e do consumo de ar comprimido.

Uma vez regulado, o pressostato trabalha automaticamente. Sua regulagem é diferencial: máxima e mínima. A regulagem máxima serve para desligar o compressor quando a pressão máxima for atingida. A regulagem mínima serve para ligar o compressor quando o consumo de ar provocar uma queda de pressão. O pressostato, geralmente, é usado em compressores que trabalham em regime intermitente, quando a potência do motor elétrico de acionamento for inferior a 10 cv.

**Figura 46 – Localização do pressostato**



## Válvula piloto

A válvula piloto determina a pressão máxima de trabalho requerido na rede de distribuição de ar comprimido. Uma vez atingida essa pressão, previamente regulada, a válvula piloto permite a passagem do ar que irá pilotar a válvula de descarga do compressor. Este, por sua vez, passará a trabalhar em vazio até que a pressão na linha volte a cair abaixo da regulagem da válvula piloto.



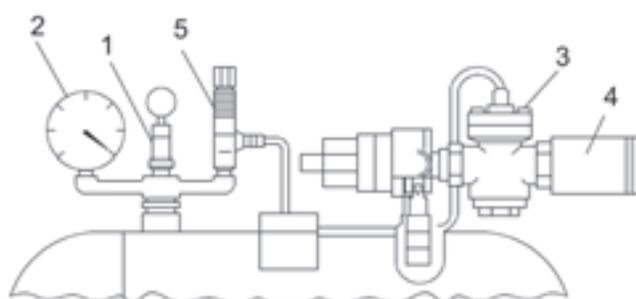
## Fique ligado!

A válvula piloto é usada em compressores que trabalham em regime contínuo, cujo motor elétrico de acionamento possui potência superior a 10cv.

## Válvula de descarga

A válvula de descarga, como o próprio nome diz, serve para descarregar a produção de ar do compressor. Isto é feito toda a vez que a pressão do ar comprimido no reservatório ultrapassar a pressão de regulagem da válvula piloto. A válvula de descarga trabalha acionada pela válvula piloto e ambas são usadas somente quando o compressor opera em regime contínuo, com o motor elétrico de acionamento de potência superior a 10 cv.

Figura 47 – Localização da válvula de descarga



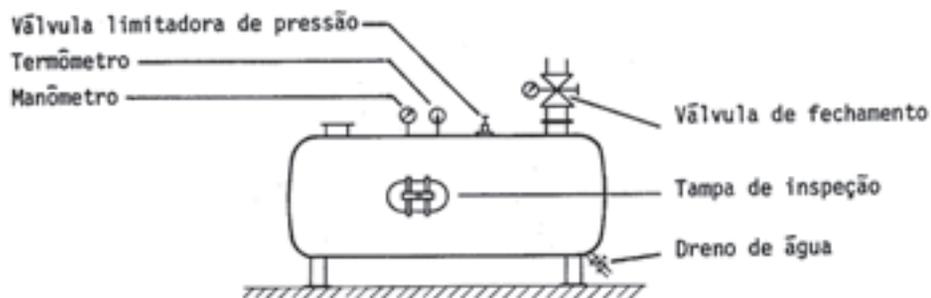
Item	Descrição
1	Válvula de segurança
2	Manômetro
3	Válvula de descarga
4	Silenciador
5	Válvula piloto

## Reservatório de ar comprimido

O reservatório serve para a estabilização da distribuição do ar comprimido. Ele elimina as oscilações de pressão na rede distribuidora e, quando há momentaneamente alto consumo de ar, funciona como uma garantia de reserva.

A grande superfície do reservatório refrigera o ar suplementar. Por isso ocorre diretamente no reservatório a transformação de uma parte da umidade do ar em água.

**Figura 48 – Localização dos acessórios do tanque de captação de ar comprimido**



O tamanho do reservatório de ar comprimido depende de:

- volume fornecido;
- consumo de ar;
- rede distribuidora (volume suplementar);
- tipo de regulagem;
- diferença de pressão desejada na rede.

A seguir, calcularemos o volume de um reservatório quando a regulagem é intermitente, determinado mediante o diagrama a seguir.

Exemplos:

Consumo  $Q = 20\text{m}^3$

Interrupções/h  $Z = 20$

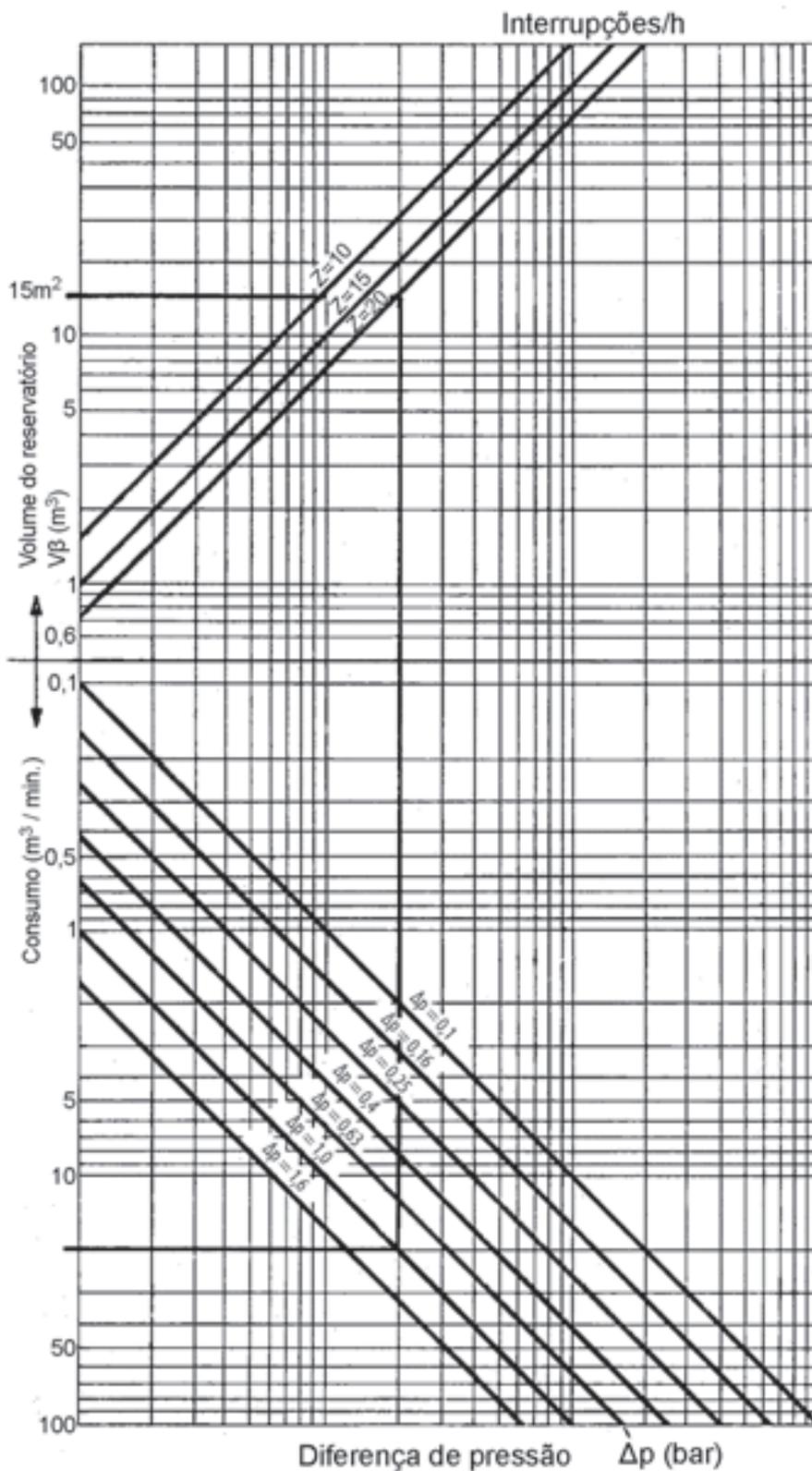
Diferença de pressão  $\Delta p = 1,0\text{bar}$

Volume do reservatório  $V\beta = ?$

Resultado:

Volume do reservatório  $V\beta = 15\text{m}^3$  (vide diagrama a seguir)

Figura 49 – Diagrama de cálculo do volume do reservatório



## Voltando ao desafio

Vamos agora voltar ao desafio do capítulo 7. Para determinar a captação do ar atmosférico, levando-se em conta o percentual de perdas por temperaturas elevadas, teremos:

$$T_{\%} = \left(1 - \frac{T'_0}{T_0}\right) \cdot 100$$

$$= \left(1 - \frac{309}{315}\right) \cdot 100$$

$$T_{\%} = \left(1 - \frac{36 + 273}{42 + 273}\right) \cdot 100$$

$$= T_{\%} = 1,9$$

Este resultado refere-se ao percentual de perdas por elevação de temperatura no processo. Para calcular o custo devido desta temperatura elevada na captação de ar, utilizaremos a fórmula a seguir:

$$C_T = C_{ac} \cdot \frac{T_{\%}}{100} \quad \text{Valor a ser calculado.}$$

$C_{ac}$  [R\$/ano] Custo anual de geração de ar comprimido, compressor em carga.

R\$ 36.000,00/ano Valor didático, porém, pode ser calculado através de medições e análise tarifária que varia para cada tipo de consumidor.

## Resumindo

Neste capítulo você aprendeu que:

- é de suma importância a qualidade do ar captado, pois pequenas variações de temperatura deste ar geram perdas que refletem no custo total do processo, influenciando diretamente na gestão energética;
- os resfriadores e secadores de linha utilizam-se de processos psicrométricas, onde o ponto de orvalho do ar captado é quem define o nível de umidade deste ar captado, antes de passar pelos mesmos;
- existem três tipos de redes de distribuição de ar comprimido, circuito aberto, circuito fechado e circuito combinado. Na rede principal é necessária uma inclinação no sentido de fluxo do ar comprimido, para arraste de condensado para os pontos de dreno;
- o reservatório de ar comprimido se bem projetado estabiliza a distribuição do ar comprimido, elimina as oscilações de pressão e refrigera parcialmente o ar.

## Aprenda mais

Você pode conhecer mais o assunto, lendo também *Manual de ar comprimido metalplan*, *Manual de ar condicionado trane* e acessando o site [www.metalplan.com.br](http://www.metalplan.com.br).



## Capítulo 8

---

# CUIDADOS NA INSTALAÇÃO DE COMPRESSORES

### Iniciando nossa conversa

Conforme as exigências dos usuários evoluem, altera-se o conceito de eficiência de um sistema de ar comprimido. Em poucos anos as preocupações com produtividade e qualidade expandiram-se para a racionalização do consumo de energia e atingiram o estágio em que se encontram muitas empresas, a busca pelo menor custo total de propriedade (CTP), a qual propõe equacionar todas as variáveis relativas à posse e controle de um sistema de ar comprimido, quais sejam: aquisição, instalação, operação e manutenção.

Num período de trabalho de cerca de dez anos, o custo total de propriedade de um sistema de ar comprimido terá respeitado as seguintes proporções aproximadas:

- 10% manutenção
- 20% implantação
- 70% energia

### Objetivos

Com estudo deste capítulo, temos como objetivos:

- conhecer os princípios de instalação do compressor;
- reconhecer e solucionar as principais dificuldades encontradas durante a instalação do compressor;
- conscientização do pessoal operacional e de manutenção.

## Um desafio para você

Foi observado em uma unidade de ar comprimido, que após o desligamento do motor elétrico pelo pressostato, o ar estava escapando (refluxo) pelo filtro de ar de admissão. Faça o diagnóstico desta situação e aponte a solução para o problema. Cite as principais causas para o aparecimento de depósitos de carvão em cabeçotes de compressores de deslocamento positivo (pistão).

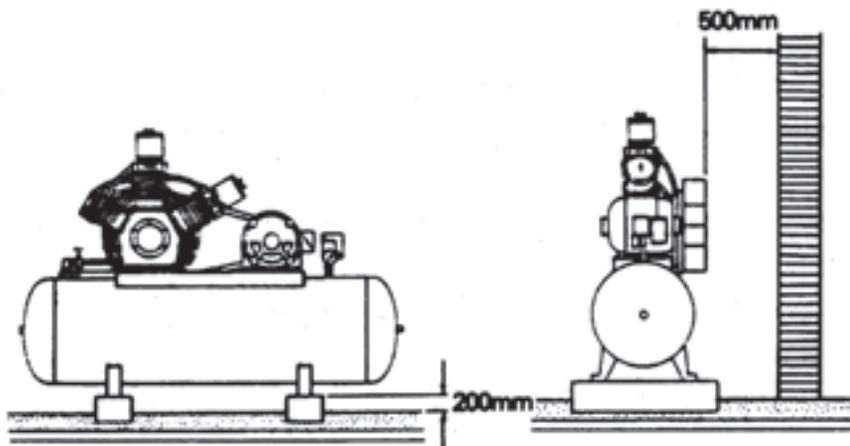
## Continuando nossa conversa

Na instalação de um compressor, além dos procedimentos relacionados no manual do fabricante, devem-se considerar, também, as seguintes precauções:

- O compressor deve ser instalado em local limpo. O ar ambiente deve estar isento de poeira para que o filtro trabalhe com eficiência.
- O ar ambiente deve ser seco para que a quantidade de água condensada seja mínima.
- O local deve ser suficientemente ventilado para poder resfriar convenientemente o compressor e o ar comprimido.
- Se o local de instalação for muito poluído, é recomendável captar o ar de até 30 metros de distância, utilizando uma extensão na linha de admissão de ar do compressor.
- O compressor deve ser isolado do piso e colocado sobre uma base em nível num local de fácil acesso para manutenção.
- O compressor deve ser instalado próximo ao ponto de utilização do ar comprimido, evitando assim perdas de pressão na linha.
- Deve-se prever na linha um comprimento mínimo para resfriamento, onde for necessário condensar a umidade.
- Nas tubulações, evitar curvas bruscas, pois isto causa perdas de pressão.
- Deve-se instalar o compressor com o volante voltado para a parede, mantendo-o a uma distância mínima de 500 mm. Isto permite o perfeito resfriamento do compressor, por meio da hélice do volante.
- A tensão elétrica da linha de alimentação deve ser compatível com a tensão especificada no motor elétrico de acionamento do compressor.

- O motor e os componentes elétricos de controle automático devem ser ligados por técnicos treinados para isso.
- As partes móveis do compressor devem ser lubrificadas antes de serem ligadas. Verificar também o nível de óleo do cárter.
- O sentido de rotação do eixo do motor deve ser o mesmo que o recomendado para o volante do compressor.
- No caso de se utilizar mais de um compressor, instalá-los de forma a permitir a manutenção dos filtros de admissão, dos resfriadores e dos reservatórios de um compressor, independentemente do funcionamento dos demais.
- Deve-se verificar o alinhamento da polia do motor de acionamento com o volante do compressor.
- As correias devem trabalhar esticadas de acordo com as recomendações do manual do fabricante.
- As correias devem ser ajustadas somente quando o compressor estiver desligado.
- Os parafusos de fixação do compressor devem ser chumbados no piso em sapatas de concreto, respeitando as distâncias recomendadas pelo fabricante.

**Figura 50 – Procedimentos de instalação de uma unidade de ar comprimido**



## Manutenção de compressores

A manutenção preventiva e corretiva de um compressor é tarefa importante na indústria. Vejamos quais são os procedimentos para essa manutenção.

### Procedimentos de manutenção

- Trocar o óleo do cárter do compressor após o primeiro mês de operação. Empregar óleo mineral de boa qualidade ou, na falta deste, usar óleo SAE 30. As trocas posteriores poderão ser realizadas trimestralmente, ou de acordo com as especificações técnicas estabelecidas pelo fabricante.
- Verificar semanalmente o nível do óleo de lubrificação e testar o funcionamento da válvula de segurança.
- Limpar semanalmente o compressor. O acúmulo de óleo e de sujeira forma uma camada isolante que prejudica a dissipação normal de calor. Isto, além de prejudicar a eficiência da máquina, pode danificar o compressor e provocar incêndios.
- Remover e limpar o filtro de admissão uma vez por mês, ou mais frequentemente, ainda dependendo das condições do ambiente. Limpar o elemento filtrante com um jato de ar comprimido seco e sem óleo, no sentido contrário ao fluxo de passagem do ar de admissão, isto é, de dentro para fora. Trocar o elemento filtrante pelo menos três vezes ao ano.
- Drenar o reservatório diariamente e de preferência pela manhã. O acúmulo de água no reservatório, além de reduzir sua capacidade, provoca corrosão interna.
- Verificar periodicamente se há vazamentos nas juntas, válvulas, conexões e tubulações, para evitar perdas de ar.
- Verificar as juntas do cárter, para evitar perdas de óleo lubrificante.
- Observar periodicamente a fixação das serpentinas resfriadoras, para evitar que, trabalhando soltas, sejam quebradas pela vibração.
- Verificar temporariamente a tensão das correias. Se elas não forem esticadas corretamente ou tiverem comprimentos diferentes, poderão provocar vibrações prejudiciais ao equipamento.

## Defeitos em compressores e possíveis causas

Agora que já estudamos os cuidados na instalação e os procedimentos de manutenção dos compressores, vamos analisar os defeitos mais usuais e as possíveis causas deles nesse tipo de equipamento.

### Temperatura elevada

Na compressão, o ar é aquecido e provoca um ligeiro aquecimento no compressor. Porém, quando for constatada uma temperatura alta no compressor, isso pode ser causado por:

- falta de óleo no cárter;
- travamento ou sujeira nas válvulas de admissão ou recalque;
- falta de ventilação;
- sujeira ou excesso de tinta nos cabeçotes e cilindros do compressor;
- viscosidade excessiva do óleo do cárter, fora das especificações do fabricante;
- sujeira no filtro de ar de admissão, causando entupimento.

### Barulho excessivo

Ao ser notado barulho excessivo, como batidas anormais no conjunto compressor, observar com atenção se isto está sendo provocado por:

- pistão ou cilindro carbonizados, isto é, com crostas de carvão;
- desgaste ou folga excessiva nos pinos e bronzinas do conjunto biela-pistão;
- folga nos mancais principais ou nas buchas do eixo de manivelas (virabrequim);
- assentos das válvulas de admissão e recalque defeituosos provocando vibrações;
- volante de acionamento solto;
- rolamentos do compressor ou do motor elétrico de acionamento, danificado.

## **Irregularidades no regime de trabalho**

Em compressores que trabalham em regime intermitente, é preciso observar se os períodos de funcionamento são muito longos, e as paradas muito rápidas. Esta irregularidade poderá ser causada por:

- entupimento do filtro de ar de admissão;
- excesso de tinta ou sujeira depositada sobre os cilindros;
- vazamento de ar na rede de distribuição;
- travamento, defeito ou sujeira no assento das válvulas;
- excesso de água acumulada no reservatório de ar reduzindo sua capacidade de armazenamento;
- regulagem incorreta ou vazamento de ar no diafragma do pressostato;
- rotação incorreta do motor elétrico de acionamento ou correias patinando;
- dimensionamento inadequado (muito pequeno) do reservatório de ar comprimido;
- consumo de ar acima do normal devido a ampliações não previstas na época da instalação do compressor.

## **Consumo excessivo de óleo lubrificante**

Quando o compressor apresenta consumo excessivo de óleo lubrificante, o problema pode ser causado por:

- sujeira ou entupimento do filtro de ar de admissão;
- pontos de vazamento de óleo lubrificante;
- desgastes ou rupturas dos anéis de segmento dos êmbolos dos cilindros;
- viscosidade do óleo abaixo das especificações do manual de serviço do compressor;
- conjunto compressor instalado fora do nível.

## Presença de óleo no ar comprimido

A presença de partículas de óleo lubrificante no ar comprimido pode ser acusada por:

- restrição no filtro de admissão de ar do compressor;
- excesso de óleo lubrificante no cárter do compressor;
- baixa viscosidade do óleo lubrificante, fora das especificações do manual de serviço do compressor.

## Desgaste excessivo das correias

O desgaste prematuro das correias de acionamento do compressor pode ser causado por:

- polia do motor elétrico de acionamento desalinhado em relação ao volante do compressor;
- tensão excessiva ou insuficiente das correias;
- oscilação da polia do motor ou do volante do compressor devido a desgastes de chavetas, furos ou virabrequim;
- deformação dos canais em “V” da polia do motor ou do volante do compressor.

## Temperatura elevada do ar comprimido

A alta temperatura do ar comprimido na saída do compressor pode ser provocada por:

- excesso de tinta ou sujeira acumulada nas serpentinas dos resfriadores;
- ventilação precária dos resfriadores devido à instalação do compressor muito próximo à parede;
- sujeira ou entupimento do filtro de admissão de ar;
- inversão do sentido de rotação do volante do compressor, provocando uma ventilação inadequada das serpentinas.

## Irregularidade no comando elétrico

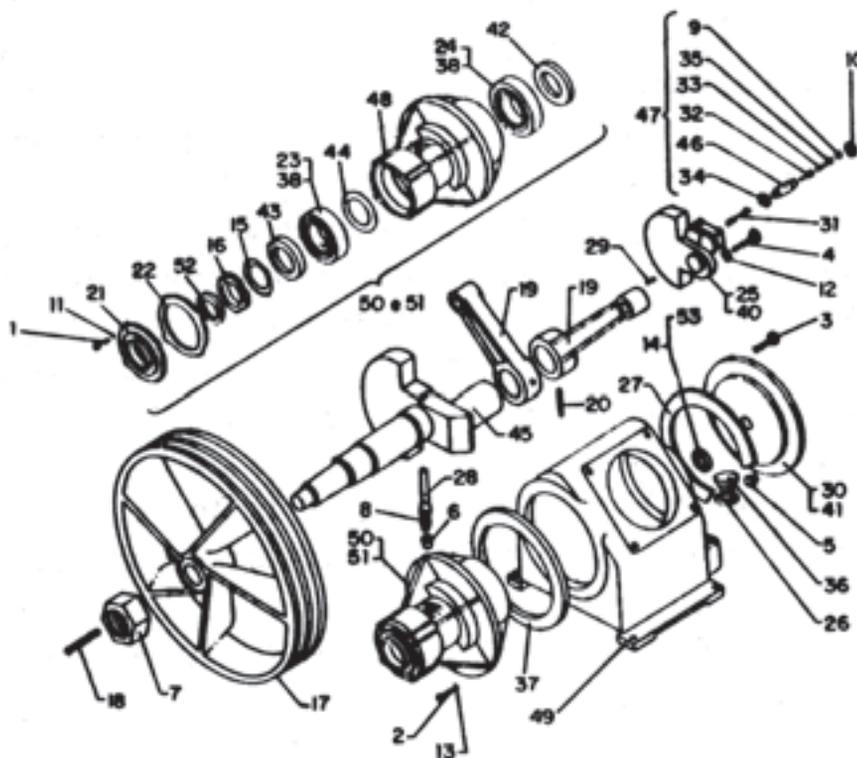
Quando os fusíveis se queimam repetidamente ou a chave elétrica de proteção do motor se desliga com frequência, isto pode ser causado por:

- fusíveis dimensionados para uma corrente elétrica menor que a corrente normal de trabalho do motor;
- sobrecarga do motor elétrico devido a ajuste incorreto dos rolamentos cônicos do compressor.

## Vista explodida de um compressor

Observe nas Figuras 51 e 52 os componentes internos de um compressor de pistões de simples efeito e dois estágios. Consulte, também, o quadro legenda apresentado logo a seguir.

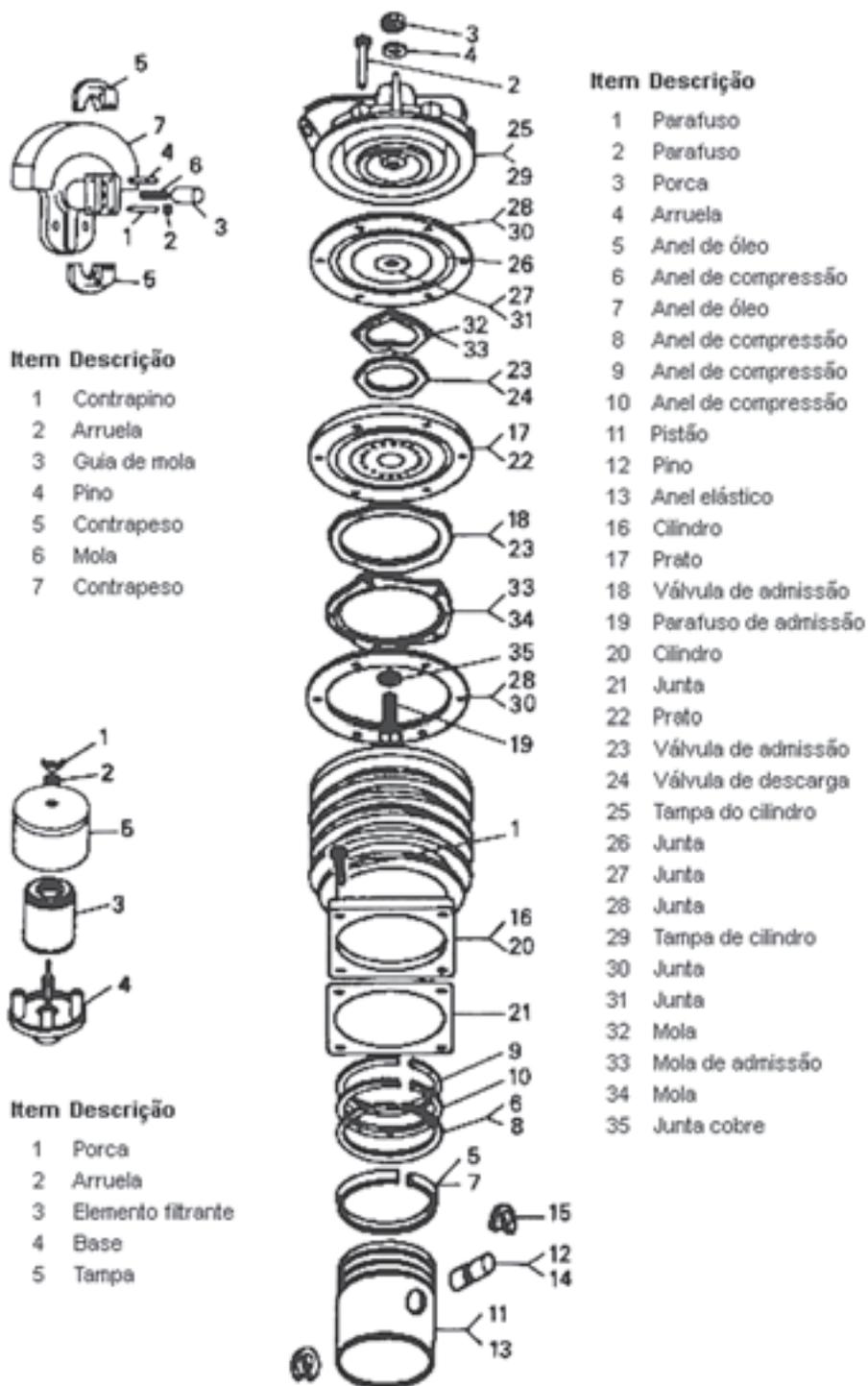
Figura 51 – Detalhes de componentes internos do compressor



### Quadro 7 – Detalhes de componentes internos do compressor

Item	Descrição	Item	Descrição
1	Parafuso	28	Tubo de respiro
2	Parafuso	29	Pino
3	Parafuso	30	Tampa
4	Parafuso	31	Pino
5	Bujão	32	Válvula
6	Bucha de redução	33	Mola
7	Porca	34	Porca
8	Conexão reta	35	Parafuso
9	Anilha	36	Bujão
10	Porca	37	Junta
11	Arruela	38	Rolamento esférico
12	Arruela	39	Rolamento esférico
13	Arruela	40	Contrapeso
14	Visor	41	Tampa
15	Arruela de segurança	42	Calço
16	Porca	43	Calço
17	Volante	44	Calço
18	Chaveta	45	Virabrequim
19	Biela completa	46	Corpo
20	Salpico	47	Válvula aliviadora
21	Tampa	48	Caixa de rolamentos
22	Junta	49	Cárter
23	Rolamento de contato angular	50	Caixa de rolamentos
24	Rolamento de contato angular	51	Caixa de rolamentos
25	Aliviador centrífugo	52	Retentor
26	Junta	53	Junta do visor
27	Junta		

Figura 52 – Detalhes de componentes internos do compressor alternativo





## Fique ligado!

Faça sempre as manutenções preventivas, evitando paradas desnecessárias que elevam os custos e diminuem a produção.

### Voltando ao desafio

No primeiro item do desafio foi observado o refluxo do ar comprimido no filtro de ar. Este tipo de defeito deve-se a problemas na placa de válvulas (válvula de descarga sem retenção). Antes de trocar a placa de válvula e sua guarnição, devemos avaliar se o problema de origem está na própria placa ou surgiu devido a fatores diversos, como: falta de lubrificante ou lubrificante inadequado, filtro de ar saturado ou ausência do mesmo, deixando passar poeiras e sujidades para o interior da câmara de compressão, ar de admissão com temperatura superior ao permitido, sistemas de ventilação do cabeçote inoperante, temperatura do ar da casa de máquinas acima da especificada em projeto.

No segundo item do desafio, podemos citar como principal causa do aparecimento de depósito de carvão em cabeçotes a alta temperatura na câmara de compressão, provocada por desgaste mecânico, alta temperatura do ar na admissão, lubrificante inadequado, sistema de arrefecimento do cabeçote inoperante.

### Resumindo

Neste capítulo foi visto que:

- é importante a execução de um projeto de sistema de ar comprimido seguindo normas técnicas e, também, definir a necessidade de consumo do processo, para que o sistema trabalhe com folga, respeitando a efficientização energética. É necessário, ainda, respeitar a manutenção preventiva e corretiva, seguindo o cronograma citado nos catálogos dos fabricantes.

### Aprenda mais

Procure ler livros técnicos que tratam do assunto, como por exemplo, o *Manual de ar comprimido* – Metalplan. Consulte também o site: [www.metalplan.com.br](http://www.metalplan.com.br)



## Referências

---

COSTA, Ennio Cruz da. **Compressores**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1988. 172 p.

DELMÉE, Gerard J. **Manual de medição de vazão**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982. 476 p.

FESTO DIDATIC. **Módulo instrucional de introdução a pneumática**. 2. ed. São Paulo: SENAI-DR, 1979. 12 v.

MELCONIAN, M. **Elementos de máquinas**. 6. ed. São Paulo: Editora Érica, 2005. 358 p.

MOREIRA, Illo da Silva. **Compressores**: instalação, funcionamento e manutenção. São Paulo: SENAI-SP, 1991. 76 p.

RODRIGUES, P. S. B. **Compressores industriais**. Rio de Janeiro: Didática e Científica Ltda, 1991. 515p

SENAI. MG. **Refrigeração**: termodinâmica. Belo Horizonte: SENAI-MG,



# Anexos

---

## **Anexo A – Tipos de óleos lubrificantes**

São óleos de alta resistência à oxidação e à formação de depósitos. São recomendados para a lubrificação de mancais e cilindros de compressores de ar, alternativos ou rotativos.

- *Mobil Rarus* SHC série 1020
- *Energyn* RC-S
- Disponíveis nos graus ISO VG 32, 46 e 68.
- Equivalência entre unidades – multiplicadores e fórmulas

## Anexo B – Tabelas de conversão de unidades

As tabelas apresentadas neste anexo contêm os fatores de multiplicação necessários para a conversão entre unidades.

Apresentamos, a seguir, algumas dicas de como utilizá-las.

- Na coluna da esquerda procura-se a unidade a ser convertida.
- Na linha superior procura-se a unidade para a qual se deseja converter a unidade original.
- A interseção entre a linha e a coluna indicará o fator de multiplicação a ser aplicado.

### Volume

	Para					
	cm <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>	in <sup>3</sup>	l	m <sup>3</sup>	ml
cm <sup>3</sup>	1	35,3147 E-6	61,0237 E-3	0,001	1 E-6	1
ft <sup>3</sup>	28,169 E+3	1	1,72800 E+3	28,3169	28,3169 E-3	28,3169 E+3
in <sup>3</sup>	16,3871	578,704 E-6	1	16,3871 E-3	16,3871 E-6	16,3871
l	1,000	35,3147 E-3	61,0237	1	0,001	1.000
m <sup>3</sup>	1 E+6	35,3147	61,0237 E+3	1.000	1	1 E+6
ml	1	35,3147 E-6	61,0237 E-3	0,001	1 E-6	1

### Pressão

	Para			
	atm	bar	kgf/cm <sup>2</sup>	mH <sub>2</sub> O
atm	1	1,01325	1,03323	10,3323
bar	986,923 E-3	1	1,01972	10,1972
kgf/cm <sup>2</sup>	967,841 E-3	980,665 E-3	1	10
mH <sub>2</sub> O	96,7841 E-3	98,0665 E-3	100 E-3	1
mmHg	1,31579 E-3	1,33322 E-3	1,35951 E-3	13,5951 E-3
Pa	9,86923 E-6	10 E-6	10,1972 E-6	101,972 E-6
psi	68,0460 E-3	68,9476 E-3	70,3070 E-3	703,070 E-3
Torr	1,31579 E-3	1,33322 E-3	1,35951 E-3	13,5951 E-3

	Para			
	mmHg	Pa	psi	Torr
atm	760	101,325 E+3	14,6959	760
bar	750,062	100 E+3	14,5038	750,062
kgf/cm <sup>2</sup>	735,559	98,0665 E+3	14,2233	735,559
mH <sub>2</sub> O	73,5559	9,80665 E+3	1,42233	73,5559
mmHg	1	133,322	19,3368 E-3	1
Pa	7,50062 E-3	1	145,038 E-6	7,5006 E-3
psi	51,7149	6,89476 E+3	1	51,7149
Torr	1	133,322	19,3368 E-3	1

## Temperatura

A conversão entre as diferentes temperaturas dá-se pelas fórmulas apresentadas a seguir, onde:

$t_C$  [°C] graus *Celsius*

$t_F$  [°F] graus *Fahrenheit*

$T_K$  [K] *Kelvin*-temperatura absoluta

$T_R$  [°R] graus *Rankine* temperatura absoluta

Acompanhe, a seguir, as operações necessárias para as conversões.

$$t_K = \frac{5}{9} (t_F - 32) + 273,15$$

$$t_R = \frac{9}{5} t_C + 491,67$$

$$t_K = t_C + 273,15$$

$$t_C = \frac{5}{9} (t_F - 32)$$

$$t_R = t_F + 459,67$$

$$t_F = \frac{9}{5} t_C + 32$$

$$t_K = \frac{5}{9} t_R$$

$$t_R = \frac{9}{5} t_K$$

**Potência**

	Para		
	cv	hp	kW
<b>cv</b>	1	986,321 E-3	735,499 E+3
<b>hp</b>	1,01387	1	745,699 E+3
<b>kW</b>	1,35962 E-6	1,34102 E-6	1
<b>MW</b>	1,35962 E-9	1,34102 E-9	0,001
<b>PS</b>	1	986,321 E-3	735,499 E+3
<b>W</b>	1,35962 E-3	1,34102 E-3	1.000

	Para		
	MW	PS	W
<b>cv</b>	735,499 E+6	1	735,499
<b>hp</b>	745,699 E+6	1,01387	745,699
<b>kW</b>	1.000	1,35962 E-6	0,001
<b>MW</b>	1	1,35962 E-9	1 E-6
<b>PS</b>	735,499 E+6	1	735,499
<b>W</b>	1 E+6	1,35962 E-3	1

**Energia (trabalho)**

	Para				
	J	kJ	kWh	MWh	Wh
<b>J</b>	1	1.000	277,778 E-9	277,778 E-12	277,778 E-6
<b>kJ</b>	0,001	1	277,778 E-12	277,778 E-15	277,778 E-9
<b>kWh</b>	3,6 E+6	3,6 E+9	1	0,001	1.000





## Anexo D – Perda percentual devido à pressão elevada

### Compressor de 1 estágio

	Para				
	19 bar	18 bar	17 bar	16 bar	15 bar
20 bar	2,40%	4,88%	7,46%	10,15%	12,94%
19 bar		2,55%	5,19%	7,94%	10,80%
18 bar			2,71%	5,53%	8,47%
17 bar				2,90%	5,92%
16 bar					3,11%

	Para				
	14 bar	13 bar	12 bar	11 bar	10 bar
20 bar	15,87%	18,93%	22,16%	25,57%	29,18%
19 bar	13,80%	16,94%	20,25%	23,74%	27,44%
18 bar	11,55%	14,77%	18,16%	21,74%	25,54%
17 bar	9,08%	12,40%	15,88%	19,56%	23,47%
16 bar	6,37%	9,78%	13,37%	17,16%	21,18%
15 bar	3,36%	6,88%	10,59%	14,50%	18,65%
14 bar		3,64%	7,48%	11,53%	15,82%
13 bar			3,98%	8,18%	12,64%
12 bar				4,38%	9,02%
11 bar					4,86%

	Para				
	9 bar	8 bar	7 bar	6 bar	5 bar
20 bar	33,04%	37,18%	41,66%	46,55%	51,97%
19 bar	31,39%	35,63%	40,22%	45,24%	50,79%
18 bar	29,60%	33,95%	38,66%	43,81%	49,51%
17 bar	27,64%	32,11%	36,95%	42,24%	48,10%
16 bar	25,48%	30,08%	35,07%	40,52%	46,55%
15 bar	23,08%	27,84%	32,98%	38,61%	44,83%
14 bar	20,41%	25,33%	30,65%	36,47%	42,92%
13 bar	17,40%	22,50%	28,03%	34,07%	40,76%
12 bar	13,97%	19,29%	25,05%	31,34%	38,30%
11 bar	10,14%	15,60%	21,62%	28,20%	35,48%
10 bar	5,44%	11,29%	17,62%	24,53%	32,19%
9 bar		6,18%	12,87%	20,19%	28,28%
8 bar			7,13%	14,93%	23,56%
7 bar				8,39%	17,69%
6 bar					10,14%

**Compressor de 2 estágios**

	Para				
	19 bar	18 bar	17 bar	16 bar	15 bar
20 bar	1,98%	4,04%	6,20%	8,46%	10,84%
19 bar		2,10%	4,31%	6,61%	9,04%
18 bar			2,25%	4,61%	7,09%
17 bar				2,41%	4,95%
16 bar					2,60%

	Para				
	14 bar	13 bar	12 bar	11 bar	10 bar
20 bar	13,35%	16,01%	18,83%	21,85%	25,09%
19 bar	11,60%	14,31%	17,19%	20,27%	23,58%
18 bar	9,70%	12,47%	15,41%	18,56%	21,93%
17 bar	7,62%	10,46%	13,47%	16,68%	20,14%
16 bar	5,34%	8,24%	11,33%	14,63%	18,17%
15 bar	2,82%	5,80%	8,96%	12,35%	15,98%
14 bar		3,07%	6,33%	9,81%	13,55%
13 bar			3,36%	6,95%	10,81%
12 bar				3,72%	7,71%
11 bar					4,15%

	Para				
	9 bar	8 bar	7 bar	6 bar	5 bar
20 bar	28,59%	32,41%	36,60%	41,27%	46,56%
19 bar	27,15%	31,04%	35,32%	40,09%	45,48%
18 bar	25,58%	29,56%	33,93%	38,80%	44,31%
17 bar	23,87%	27,94%	32,41%	37,40%	43,03%
16 bar	21,99%	26,16%	30,74%	35,85%	41,62%
15 bar	19,91%	24,19%	28,90%	34,14%	40,06%
14 bar	17,59%	21,99%	26,84%	32,23%	38,32%
13 bar	14,98%	19,53%	24,52%	30,08%	36,37%
12 bar	12,02%	16,72%	21,89%	27,65%	34,16%
11 bar	8,63%	13,51%	18,88%	24,86%	31,62%
10 bar	4,68%	9,77%	15,37%	21,61%	28,66%
9 bar		5,34%	11,22%	17,76%	25,16%
8 bar			6,21%	13,12%	20,93%
7 bar				7,37%	15,70%
6 bar					8,99%

## Compressor de 3 estágios

	Para				
	19 bar	18 bar	17 bar	16 bar	15 bar
20 bar	1,85%	3,78%	5,80%	7,93%	10,18%
19 bar		1,97%	4,03%	6,20%	8,49%
18 bar			2,11%	4,32%	6,65%
17 bar				2,26%	4,65%
16 bar					2,44%

	Para				
	14 bar	13 bar	12 bar	11 bar	10 bar
20 bar	12,56%	15,08%	17,77%	20,66%	23,77%
19 bar	10,91%	13,48%	16,23%	19,17%	22,34%
18 bar	9,12%	11,75%	14,55%	17,55%	20,78%
17 bar	7,17%	9,85%	12,71%	15,77%	19,08%
16 bar	5,02%	7,76%	10,69%	13,82%	17,21%
15 bar	2,65%	5,46%	8,45%	11,67%	15,13%
14 bar		2,89%	5,97%	9,27%	12,83%
13 bar			3,17%	6,57%	10,24%
12 bar				3,51%	7,30%
11 bar					3,92%

	Para				
	9 bar	8 bar	7 bar	6 bar	5 bar
20 bar	27,15%	30,85%	34,95%	39,53%	44,75%
19 bar	25,78%	29,55%	33,72%	38,39%	43,71%
18 bar	24,29%	28,14%	32,39%	37,15%	42,58%
17 bar	22,67%	26,59%	30,94%	35,80%	41,34%
16 bar	20,88%	24,90%	29,34%	34,32%	39,98%
15 bar	18,90%	23,02%	27,57%	32,68%	38,48%
14 bar	16,69%	20,92%	25,60%	30,85%	36,81%
13 bar	14,22%	18,57%	23,39%	28,79%	34,93%
12 bar	11,41%	15,91%	20,88%	26,46%	32,80%
11 bar	8,18%	12,85%	18,00%	23,78%	30,36%
10 bar	4,43%	9,29%	14,66%	20,67%	27,51%
9 bar		5,08%	10,70%	16,99%	24,15%
8 bar			5,92%	12,55%	20,09%
7 bar				7,04%	15,06%
6 bar					8,63%

## Anexo E – Perdas devido a vazamentos

	Diâmetro do furo [mm]									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
	Vazão [m³/h]									
4,5	0,771	3,084	6,939	12,336	19,275	27,756	37,779	49,345	62,452	77,101
5,0	0,841	3,364	7,570	13,458	21,028	30,280	41,214	53,831	68,129	84,110
5,5	0,911	3,645	8,201	14,579	22,780	32,803	44,648	58,316	73,807	91,119
6,0	0,981	3,925	8,832	15,701	24,532	35,326	48,083	62,802	79,484	98,129
6,5	1,051	4,206	9,462	16,822	26,284	37,850	51,517	67,288	85,162	105,138
7,0	1,121	4,486	10,093	17,944	28,037	40,373	54,952	71,774	90,839	112,147
7,5	1,192	4,766	10724	19,065	29,789	42,896	58,386	76,260	96,516	119,156
8,0	1,262	5,047	11,355	20,186	31,541	45,419	61,821	80,746	102,194	126,165
8,5	1,332	5,327	11,986	21,308	33,294	47,943	65,255	85,232	107,871	133,174
9,0	1,402	5,607	12,617	22,429	35,046	50,466	68,690	89,718	113,549	140,184
9,5	1,472	5,888	13,247	23,551	36,798	52,989	72,124	94,203	119,226	147,193
10,0	1,542	6,168	13,878	24,672	38,550	55,513	75,559	98,689	124,904	154,202
10,5	1,612	6,448	14,509	25,794	40,303	58,036	78,993	103,175	130,581	161,211
11,0	1,682	6,729	15,140	26,915	42,055	60,559	82,428	107,661	136,258	168,220
11,5	1,752	7,009	15,771	28,037	43,807	63,083	85,862	112,147	141,936	175,230
12,0	1,822	7,290	16,401	29,158	45,560	65,606	89,297	116,633	147,613	182,239

- Perdas de ar comprimido por furos a uma temperatura de 21°C – sem correção.

	Diâmetro do furo [mm]									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
	Vazão [m³/h]									
4,5	0,748	2,992	6,731	11,966	18,697	26,924	36,646	47,864	60,578	74,788
5,0	0,816	3,263	7,343	13,054	20,397	29,371	39,978	52,216	66,085	81,587
5,5	0,884	3,535	7,955	14,142	22,096	31,819	43,309	56,567	71,592	88,386
6,0	0,952	3,807	8,567	15,230	23,796	34,266	46,640	60,918	77,100	95,185
6,5	1,020	4,079	9,179	16,317	25,496	36,714	49,972	65,269	82,607	101,984
7,0	1,088	4,351	9,790	17,405	27,196	36,162	53,303	69,621	88,114	108,782
7,5	1,156	4,623	10,402	18,493	28,895	41,609	56,635	73,972	93,621	115,581
8,0	1,224	4,895	11,014	19,581	30,595	44,057	59,966	78,323	99,128	122,380
8,5	1,292	5,167	11,626	20,669	32,295	46,505	63,298	82,675	104,635	129,179
9,0	1,360	5,439	12,238	21,756	33,995	48,952	66,629	87,026	110,142	135,978
9,5	1,428	5,711	12,850	22,844	35,694	51,400	69,961	91,377	115,649	142,777
10,0	1,496	5,983	13,462	23,932	37,394	53,847	73,292	95,729	121,156	149,576
10,5	1,564	6,255	14,074	25,020	39,094	56,295	76,624	100,080	126,664	156,375
11,0	1,632	6,527	14,686	26,108	40,793	58,743	79,955	104,431	132,171	163,174
11,5	1,700	6,799	15,298	27,196	42,493	61,190	83,287	108,782	137,678	169,973
12,0	1,768	7,071	15,909	28,283	44,193	63,638	86,618	113,134	143,185	176,772

- Perdas de ar comprimido por furos a uma temperatura de 21°C – cantos arredondados.

	Diâmetro do furo [mm]									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
	Vazão [m³/h]									
<b>4,5</b>	0,470	1,881	4,233	7,525	11,758	16,931	23,045	30,100	38,096	47,032
<b>5,0</b>	0,513	2,052	4,618	8,209	12,827	18,471	25,141	32,837	41,559	51,307
<b>5,5</b>	0,556	2,223	5,002	8,893	13,896	20,010	27,236	35,573	45,022	55,583
<b>6,0</b>	0,599	2,394	5,387	9,577	14,965	21,549	29,331	38,309	48,485	59,858
<b>6,5</b>	0,641	2,565	5,772	10,261	16,034	23,088	31,426	41,046	51,949	64,134
<b>7,0</b>	0,684	2,736	6,157	10,946	17,102	24,627	33,521	43,782	55,412	68,410
<b>7,5</b>	0,727	2,907	6,542	11,630	18,171	26,167	35,616	46,519	58,875	72,685
<b>8,0</b>	0,770	3,078	6,926	12,314	19,240	27,706	37,711	49,255	62,338	76,961
<b>8,5</b>	0,812	3,249	7,311	12,998	20,309	29,245	39,806	51,991	65,801	81,236
<b>9,0</b>	0,855	3,420	7,696	13,682	21,378	30,784	41,901	54,728	69,265	85,512
<b>9,5</b>	0,898	3,592	8,081	14,366	22,447	32,324	43,996	57,464	72,728	89,788
<b>10,0</b>	0,941	3,763	8,466	15,050	23,516	33,863	46,091	60,200	76,191	94,063
<b>10,5</b>	0,983	3,934	8,850	15,734	24,585	35,402	48,186	62,937	79,654	98,339
<b>11,0</b>	1,026	4,105	9,235	16,418	25,654	36,941	50,281	65,673	83,118	102,614
<b>11,5</b>	1,069	4,276	9,620	17,102	26,723	38,480	52,376	68,410	86,581	106,890
<b>12,0</b>	1,112	4,447	10,005	17,786	27,791	40,020	54,471	71,146	90,044	111,166

- Perdas de ar comprimido por furos a uma temperatura de 21°C – cantos vivos.

## Anexo F – *Check list* diagnóstico de defeitos, causas e soluções em unidade central de ar comprimido

Defeitos	Causas	Soluções
Compressor não liga	Verificar: - tensão na rede; - dispositivo de proteção; - comando elétrico.	Ligar chave geral e disjuntores. Trocar dispositivo de comando defeituoso.
Compressor aciona e não parte.	Subtensão ou sobretensão na rede. Mau contato elétrico. Compressor travado. Correia estourada ou frouxa.	Corrigir alimentação elétrica. Reapertar os terminais. Trocar ou reparar o compressor. Trocar ou ajustar a tensão da correia.
Compressor parte com ruído.	Fixação à base frouxa. Carenagem de proteção frouxa. Sistema desalinhado. Problema mecânico interno. Sistema de transmissão frouxo.	Reapertar a base. Fixar carenagem. Alinhar sistema. Desmontar e corrigir defeito. Reapertar os componentes frouxos.
Compressor aspira e não comprime.	Placa de válvula defeituosa.	Trocar a placa de válvula.
Aquecimento excessivo do cabeçote.	Sistema de arrefecimento com defeito. Ar de captação com temperatura elevada. Falta de óleo lubrificante. Folga mecânica. Cabeçote sujo. Defeito em placa de válvula. Óleo do Cárter com viscosidade alta. Sujeira no filtro de óleo.	Inverter giro do volante. Verificar sistema de bomba d'água. Modificar projeto de captação de ar. Verificar nível e qualidade do óleo. Desmontar e corrigir o problema. Retirar o excesso de poeiras, graxas e tintas. Trocar a placa. Trocar o óleo conforme especificação do fabricante. Trocar filtro de óleo.

Defeitos	Causas	Soluções
Barulho excessivo	<p>Folga nos mancais principais ou nas buchas do eixo de manivela. Volante de acionamento solto.</p> <p>Rolamento avariado.</p> <p>Placa de válvula danificada.</p> <p>Quebra de anéis de segmentos.</p> <p>Desalinhamento da transmissão. Folga na fixação (chumbadores).</p>	<p>Desmontar e avaliar as folgas e providenciar manutenção.</p> <p>Verificar dispositivo de fixação (chaveta) e reapertá-lo.</p> <p>Localizar o rolamento danificado e providenciar a substituição.</p> <p>Providenciar a substituição.</p> <p>Desmontar, avaliar os danos e providenciar a substituição.</p> <p>Alinhar.</p> <p>Avaliar o estado do mesmo, reapertar os fixadores ou trocá-los.</p>
Irregularidades no regime de trabalho	<p>Obstrução do filtro de ar.</p> <p>Vazamento de ar na rede de distribuição.</p> <p>Avárias em placa de válvulas.</p> <p>Excesso de água em reservatório de ar, reduzindo a sua capacidade de armazenamento.</p> <p>Pressostato danificado.</p> <p>Reservatório incompatível com o consumo do processo.</p> <p>Relação de transmissão diferente da de projeto.</p>	<p>Substituição do filtro de ar.</p> <p>Correção do vazamento.</p> <p>Trocar a placa de válvula.</p> <p>Drenar o reservatório periodicamente.</p> <p>Substituição ou regulação do pressostato.</p> <p>Redimensionar reservatório.</p> <p>Redimensionar a transmissão.</p>
Consumo excessivo de óleo lubrificante.	<p>Sujeira do filtro de ar de admissão.</p> <p>Pontos de vazamentos de óleo lubrificante.</p> <p>Folga nos anéis de segmento.</p> <p>Baixa viscosidade do óleo lubrificante.</p> <p>Conjunto moto-compressor desnivelado.</p>	<p>Limpar ou trocar o filtro de ar.</p> <p>Corrigir vazamento.</p> <p>Trocar os anéis de segmento.</p> <p>Substituir o óleo lubrificante de acordo com o manual do fabricante.</p> <p>Nivelar o conjunto.</p>

Defeitos	Causas	Soluções
Presença de óleo no ar comprimido.	Restrição na sucção de ar do compressor. Excesso de óleo lubrificante no cárter.  Baixa viscosidade do lubrificante.	Desobstruir o filtro de ar.  Retirar o excesso até nivelar pelo indicador de nível de óleo. Substituir o lubrificante de acordo com o catálogo.
Desgaste excessivo das correias.	Desalinhamento do conjunto de transmissão. Tensão excessiva ou insuficiente das correias. Folga mecânica no conjunto de transmissão. Polias avariadas (canais desgastados).	Alinhar as polias.  Regular a tensão das correias. Corrigir a folga.  Troca das polias.
Temperatura elevada do ar comprimido	Sujeira acumulada nas aletas de arrefecimento do cabeçote. Ventilação precária.  Inversão do sentido de rotação do motor, reduzindo a ventilação das serpentinas.	Remoção da sujeira.  Afastar das paredes, respeitando a distância mínima estabelecida no catálogo do fabricante. Inverte sentido de rotação do motor.
Irregularidades no comando elétrico (queima de fusíveis ou desarme dos disjuntores).	Dispositivo de proteção subdimensionado.  Folga em terminais e parafusos de fixação. Sobrecarga mecânica.  Chave centrífuga avariada (em sistemas monofásicos este dispositivo liga /desliga o motor elétrico).	Rever dimensionamento dos dispositivos de proteção. Trocar terminais frouxos e reapertar os parafusos. Avaliar os mancais e elementos de transmissão. Trocar a chave centrífuga.





Ministério de  
Minas e Energia

