

# **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO**

**MANUAL PRÁTICO**





## Créditos

Trabalho elaborado no âmbito do contrato realizado entre a ELETROBRÁS/PROCEL e o consórcio EFFICIENTIA/FUPAI

### **MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**

---

Esplanada dos Ministérios Bloco "U" - CEP. 70.065-900 – Brasília – DF  
www.mme.gov.br

Ministra

**Dilma Rousseff**

### **ELETROBRÁS/PROCEL**

---

Av. Rio Branco, 53 - 20º andar - Centro - CEP 20090-004 - Rio de Janeiro – RJ  
www.eletronbras.com/procel - procel@eletronbras.com

Presidente

**Silas Rondeau Cavalcante Silva**

Diretor de Projetos Especiais e Desenvolvimento Tecnológico e Industrial e Secretário Executivo do PROCEL

**Aloísio Marcos Vasconcelos Novais**

Chefe de Departamento de Planejamento e Estudos de Conservação de Energia e Coordenador Geral do Projeto de Disseminação de Informações de Eficiência Energética

**Renato Pereira Mahler**

Chefe da Divisão de Suporte Técnico de Conservação de Energia e Coordenador Técnico do Projeto de Disseminação de Informações de Eficiência Energética

**Luiz Eduardo Menandro Vasconcellos**

Chefe da Divisão de Planejamento e Conservação de Energia

**Marcos de Queiroz Lima**

Chefe de Departamento de Projetos Especiais

**George Alves Soares**

Chefe da Divisão de Desenvolvimento de Projetos Setoriais de Eficiência Energética

**Fernando Pinto Dias Perrone**

Chefe da Divisão de Desenvolvimento de Projetos Especiais

**Solange Nogueira Puente Santos**

### **EQUIPE TÉCNICA**

---

Coordenador Geral

**Marcos Luiz Rodrigues Cordeiro**

## **CONSÓRCIO EFFICIENTIA/FUPAI**

---

### **EFFICIENTIA**

Av. Afonso Pena, 1964 – 7º andar – Funcionários – CEP 30130-005 – Belo Horizonte – MG  
www.efficientia.com.br - efficientia@efficientia.com.br

Diretor Presidente da Efficientia

**Elmar de Oliveira Santana**

Coordenador Geral do Projeto

**Jaime A. Burgoa / Túlio Marcus Machado Alves**

Coordenador Operacional do Projeto

**Ricardo Cerqueira Moura**

Coordenador do Núcleo Gestor dos Guias Técnicos

**Marco Aurélio Guimarães Monteiro**

Coordenador do Núcleo Gestor Administrativo-Financeiro

**Cid dos Santos Scala**

### **FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria**

Rua Xavier Lisboa, 27 – Centro – CEP 37501-042 – Itajubá – MG  
www.fupai.com.br – fupai@fupai.com.br

Presidente da FUPAI

**Djalma Brighenti**

Coordenador Operacional do Projeto

**Jamil Haddad \***

**Luiz Augusto Horta Nogueira \***

Coordenadora do Núcleo Gestor Administrativo-Financeiro

**Heloisa Sonja Nogueira**

### **EQUIPE TÉCNICA**

---

Apoio Técnico

**Adriano Jack Machado Miranda**

**Maria Aparecida Morangon de Figueiredo**

**Micael Duarte França**

Fotografia

**Eugênio Paccelli**

### **AUTORES**

---

**Carlos Roberto Rocha,**

**Marco Aurélio Guimarães Monteiro**

\* Professores da Universidade Federal de Itajubá

## Apresentação

Criado em 1985, pelo Governo Federal, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e implementado pela ELETROBRÁS. O objetivo principal do PROCEL é contribuir para a redução do consumo e da demanda de energia elétrica no país, por meio do combate ao desperdício deste valioso insumo.

A ELETROBRÁS/PROCEL mantém estreito relacionamento com diversas organizações nacionais e internacionais cujos propósitos estejam alinhados com o citado objetivo. Dentre elas, cabe ressaltar o Banco Mundial (BIRD) e o Global Environment Facility (GEF), os quais têm se constituído em importantes agentes financiadores de projetos na área da eficiência energética.

Nesse contexto, o GEF, que concede suporte financeiro a atividades relacionadas com a mitigação de impactos ambientais, como o uso racional e eficiente da energia, doou recursos à ELETROBRÁS/PROCEL, por intermédio do BIRD, para o desenvolvimento de vários projetos. Dentre eles, destaca-se o projeto “Disseminação de Informações em Eficiência Energética”, concebido e coordenado pela ELETROBRÁS/PROCEL e realizado pelo Consórcio Efficientia/Fupai, com o apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), que objetiva divulgar informações sobre tecnologias de uso eficiente de energia para os profissionais dos setores industrial, comercial, prédios públicos e saneamento, difundindo aspectos tecnológicos e operacionais que permitam reduzir o desperdício de energia elétrica.

O objetivo deste manual é instrumentalizar os interessados com informações úteis e práticas, capacitando-os para identificar oportunidades de redução de custos e de consumo de energia em seu sistema.



## Sumário

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>Parte I - PLANO DE AÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1 - CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA E DA INSTALAÇÃO ONDE ESTÁ INSERIDO .....</b>	<b>13</b>
1.1 - Conhecimento de um sistema de ar comprimido genérico .....	13
1.2 - Conhecimento do sistema de ar comprimido específico de sua empresa .....	15
<b>2 - IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIAS .....</b>	<b>16</b>
2.1 - Oportunidades de melhoria em um sistema de ar comprimido genérico .....	16
2.2 - Oportunidades de melhoria no sistema de ar comprimido específico de sua empresa .....	18
<b>3 - IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DEFINIDAS .....</b>	<b>19</b>
3.1 - Implementação de melhorias em um sistema de ar comprimido genérico .....	19
3.2 - Implementação de melhorias no sistema específico de sua empresa .....	19
<b>4 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E REINÍCIO DO PROCESSO PARA NOVAS AÇÕES .....</b>	<b>20</b>
<b>Parte II - OPORTUNIDADES PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA .....</b>	<b>25</b>
<b>1 - IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NA GERAÇÃO DE AR COMPRIMIDO .....</b>	<b>25</b>
1.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência na geração de ar comprimido .	25
1.2 - Áreas de oportunidade de melhoria de eficiência na geração .....	28
1.2.1 - Redução de perdas devido à temperatura do ar aspirado pelo compressor .....	28
1.2.2 - Redução de perda de carga por sujeira no filtro de aspiração .....	30
1.2.3 - Redução de perdas no sistema de compressão .....	30
1.2.4 - Redução de perdas com a pressão de trabalho muito elevada .....	33
1.2.5 - Recuperação de calor de compressão .....	35
1.2.6 - Redução de perdas por manutenção preventiva inadequada .....	37
1.2.7 - Redução de perdas devida à melhoria no sistema de controles de compressores	39
1.2.8 - Redução de perdas usando reservatório e sistema de estabilização de pressão .	42
1.2.9 - Redução de perdas pelo tratamento do ar comprimido .....	44
1.2.10 - Redução de perdas na drenagem do condensado .....	46

1.3 - Exemplos .....	50
1.4 - Sugestões para identificar oportunidades na geração .....	58
<b>2 - IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NA DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO .....</b>	<b>59</b>
2.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência na distribuição de ar comprimido .....	59
2.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência na distribuição do ar comprimido .....	60
2.2.1 - Redução de perdas devido à queda de pressão (perdas de carga na tubulação) .....	60
2.2.2 - Redução de perdas devido aos vazamentos na distribuição .....	62
2.3 - Exemplos .....	66
2.4 - Sugestões para identificar oportunidades na distribuição .....	68
<b>3 - IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NO USO FINAL DO AR COMPRIMIDO ..</b>	<b>68</b>
3.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência no uso final do ar comprimido .....	68
3.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência no uso final do ar comprimido .....	69
3.2.1 - Redução de perdas pela eliminação de usos inapropriados do ar comprimido .....	70
3.2.2 - Substituição de ar comprimido nas aplicações de uso final de baixa pressão ... ..	71
3.3 - Exemplos .....	73
3.4 - Sugestões para identificação de oportunidades no uso final .....	74
<b>4 ASPECTOS ECONÔMICOS .....</b>	<b>76</b>
4.1 - Benchmarking para o custo de ar comprimido .....	76
4.2 - Determinação do custo do ar comprimido para suas instalações .....	76
<b>Parte III - FONTES DE CONSULTA .....</b>	<b>83</b>
<b>1 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
<b>2 - LINKS ÚTEIS .....</b>	<b>85</b>
<b>3 - ÓRGÃOS E INSTITUIÇÕES .....</b>	<b>86</b>

## Introdução

Este Manual foi concebido para disponibilizar informações técnicas aos usuários de sistemas de ar comprimido. Descreve os componentes básicos de sistemas de ar comprimido; sugere passos a serem seguidos na busca de melhorias; esboça oportunidades para melhorar a eficiência energética; e discute os benefícios de uma abordagem sistêmica na identificação e implementação destas oportunidades de melhorias.

Os sistemas de ar comprimido são amplamente utilizados na indústria como fonte de energia para acionamento há mais de um século, sendo freqüentemente considerados como a “quarta utilidade”. Quase toda instalação industrial, desde urna pequena oficina até uma grande indústria, tem algum sistema de ar comprimido.

A produção de ar comprimido pode ser um dos processos mais dispendiosos da fábrica. Atualmente, a maior parte do ar comprimido é produzida por compressores acionados por motores elétricos.

### Objetivo

Disponibilizar informações técnicas úteis e práticas aos profissionais de empresas que possuem sistemas de ar comprimido, capacitando-os a identificar oportunidades de melhoria da eficiência energética que resultem em redução de custos e de consumo de energia em seu sistema.

### Público alvo

Técnicos, engenheiros e participantes de Comissões Internas de Energia (CICE) em cujas empresas existem sistemas de ar comprimido e consultores de engenharia e demais profissionais que trabalhem com esses sistemas.

### Orientações gerais

Este Manual faz parte de um conjunto de publicações editadas pela Eletrobrás/Procel. Apresenta, de forma sucinta, dicas para reduzir de custos e consumo de energia. Simultaneamente, a Eletrobrás/Procel publica o livro “EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO”, com conteúdo mais abrangente sobre este tema, para servir de material de consulta e suporte para aqueles profissionais que desejarem se aprofundar mais no assunto.

As oportunidades de eficiência energética apontadas neste Manual são um extrato dos conceitos e fundamentos apresentados na referida publicação. Assim, ao apresentar as informações neste Manual, procuraremos referenciar o texto original, caso o usuário queira mais informações sobre o assunto.

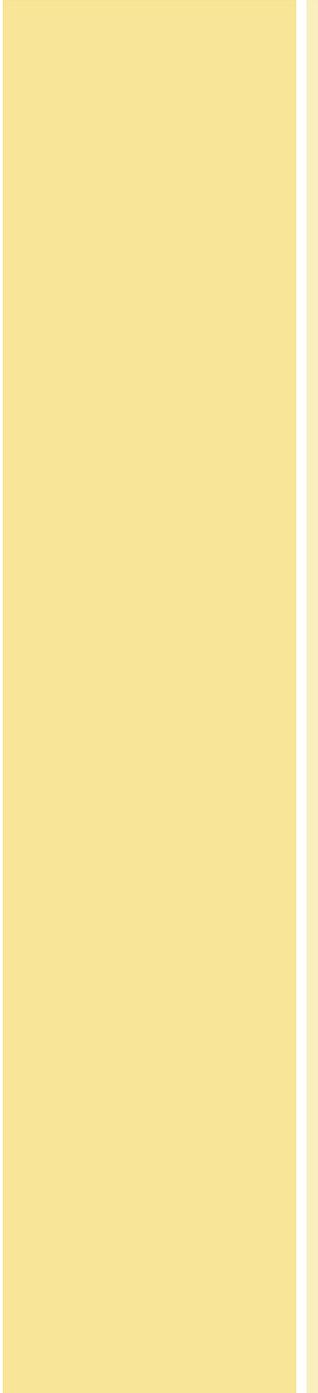
Procurando oferecer uma ferramenta de uso prático e útil, incluímos um CD contendo uma versão eletrônica deste Manual. O CD contém, ainda, programas, textos, planilhas e tabelas de auxílio que servem para complementar as informações e auxiliar no desenvolvimento de um programa de eficiência.

O Manual está dividido em três partes:

1. PLANO DE AÇÃO;
2. OPORTUNIDADES PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA; e
3. FONTES DE CONSULTA.

Naturalmente, o foco do Manual será a parte 2: Oportunidades para melhorar a eficiência.

Para facilitar e agilizar a consulta, no anexo constam grandezas, unidades de medida, fatores de conversão e fórmulas utilizadas neste Manual e no texto base (“EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO”).



PARTE I  
**PLANO DE AÇÃO**



## PARTE I - PLANO DE AÇÃO

Este Manual utiliza três categorias para discutir os componentes de um sistema de ar comprimido: geração, distribuição e uso final. Estas três áreas seguem o trajeto do fluxo do ar comprimido desde a descarga do compressor até os pontos de uso final (pontos de consumo).

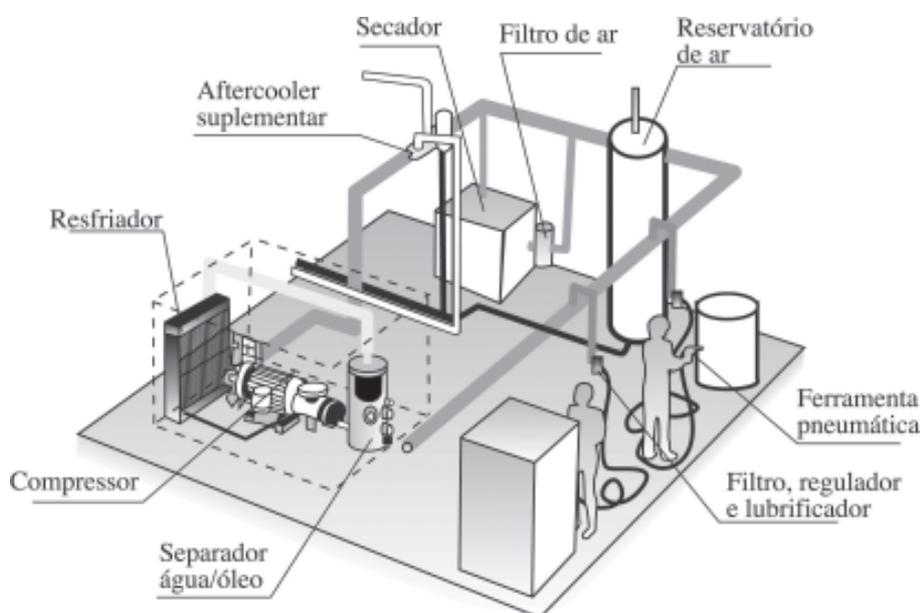
# 1

## CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA E DA INSTALAÇÃO ONDE ESTÁ INSERIDO

### 1.1 - Conhecimento de um sistema de ar comprimido genérico

O conhecimento de um sistema de ar comprimido genérico característico, com seus componentes básicos de geração, distribuição, uso final e as respectivas condições operacionais, pode facilitar a caracterização de um sistema de ar comprimido em particular (por exemplo, o sistema da sua empresa).

A Figura I.1 apresenta o esquema de um sistema de ar comprimido.



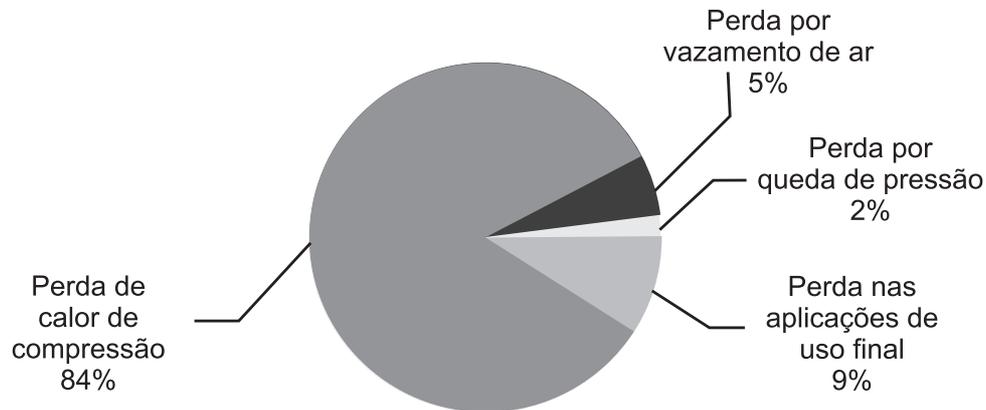
**Figura I.1** - Esquema de um sistema de ar comprimido completo

**Sistema de geração de ar comprimido** - O ar comprimido é produzido por compressores pela captação do ar atmosférico e elevação de sua pressão. Um moderno sistema de geração de ar comprimido industrial é composto de muitos subsistemas e muitos subcomponentes. Os principais subsistemas incluem compressores, motores e acionamentos, controles, equipamentos de tratamento de ar, reservatório e acessórios. O compressor é um equipamento mecânico que capta o ar ambiente e eleva a sua pressão. Motores elétricos normalmente fornecem a energia consumida para acionar o compressor. Os controles servem para regular a quantidade de ar comprimido que está sendo produzida. Os equipamentos de tratamento removem contaminantes do ar comprimido, e os acessórios mantêm o sistema operando adequadamente.

**Sistema de distribuição de ar comprimido** - A distribuição transporta o ar comprimido dos tanques reservatórios alimentados pelos compressores aos pontos de uso final, entregando quantidades suficientes de ar limpo, seco e estável, devendo ser fornecido na pressão adequada, de forma confiável e econômica, às aplicações de uso final. Para isso, muitos sistemas de distribuição possuem reservatórios de ar comprimido e têm diversas linhas de distribuição, que operam em diferentes pressões. Estas linhas são separadas por vários tipos de válvulas de isolamento, reguladoras de pressão e outras. O desempenho eficiente do sistema de distribuição requer um correto balanceamento da pressão do ar comprimido nas linhas, com regulagem eficaz da pressão, boa drenagem de condensado e perfeita estanqueidade.

**Sistemas de uso final de ar comprimido** - Há muitas e diferentes aplicações de uso final para o ar comprimido, como no acionamento de ferramentas pneumáticas em sistemas de acionamento pneumático; acionamento mecânico e comando de válvulas em sistemas de controle; transporte por ar comprimido; jateamento; e operações com sopro de ar e jato de água; operações de inspeção e teste; controle de processos com ar comprimido. É largamente usado em quase todos os setores industriais. Seu campo de aplicação é bastante grande e cresce dia a dia.

O conhecimento do balanço energético característico deste sistema pode contribuir muito para identificar as perdas que reduzem a eficiência do sistema e para fornecer um ponto de partida para a identificação de oportunidades e de seleção e implementação de ações de melhorias da eficiência. A Figura I.2 mostra um balanço de energia característico de perdas de um sistema de ar comprimido.



**Figura I.2** - Diagrama de perdas características de sistemas de ar comprimido

## 1.2 - Conhecimento do sistema de ar comprimido específico de sua empresa

Para caracterizar um sistema de ar comprimido específico, sugerem-se os seguintes passos:

- a)** Elaborar um diagrama de blocos do processo produtivo e das instalações da planta, indicando onde o ar comprimido é utilizado.
- b)** Baseado no leiaute da planta ou instalação industrial, indicar a localização dos componentes do sistema de ar comprimido e as condições operacionais nominais ou de projeto (pressões, vazões, temperaturas, etc).
- c)** Criar um perfil dos “parâmetros operacionais” (demanda de ar comprimido, produção de ar comprimido, consumo de energia elétrica e pressão) do sistema ao longo do dia, semana, mês e ano, o que for necessário para entender o funcionamento do sistema e verificar a ocorrência ou não de sazonalidades.
- d)** Levantar os dados reais (medições). A partir da instrumentação existente ou de medições instantâneas, verificar os valores reais dos parâmetros operacionais. Levantar o regime de funcionamento, picos de carga, consumo e capacidades totais e por período. Simultaneamente, deve-se contabilizar a produção e o consumo que ocorreu no período de medição. Meça seus índices de referência (consumo kW, perfil de pressão, perfil de demanda e carga de pico) e calcule a energia consumida e o seu respectivo custo.

Os índices de referência (benchmarks) mais usuais nos sistemas de ar comprimido, normalmente, são os de custo específico de ar comprimido, eficiência do compressor e consumo específico:

- O custo específico relaciona a quantidade de energia elétrica consumida e seu respectivo preço para produzir um metro cúbico de ar comprimido (custo unitário de produção ar comprimido – R\$/m<sup>3</sup>).
- A eficiência de compressão está relacionada à quantidade de energia elétrica (kWh) que o compressor consome para produzir 1 m<sup>3</sup> de ar comprimido na pressão de operação do sistema (kWh/m<sup>3</sup>).
- O consumo específico ou a necessidade de ar comprimido do produto final corresponde à quantidade de ar comprimido necessária para a produção de uma unidade ou um quilo de produto (m<sup>3</sup>/t).

## 2

### IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIAS

Quando se busca a melhoria da eficiência de um sistema de ar comprimido específico, a primeira etapa consiste em identificar as oportunidades e, em seguida, fazer a seleção das oportunidades mais promissoras.

#### 2.1 - Oportunidades de melhoria em um sistema de ar comprimido genérico

Muitas oportunidades de melhoria da eficiência em um sistema de ar comprimido são comuns em instalações industriais. Estas oportunidades podem ser classificadas de acordo com a parte do sistema na qual são implementadas. Oportunidades de melhoria da eficiência para as áreas de geração, distribuição e uso final de um sistema de ar comprimido estão listadas na tabela I.1.

**Tabela I.1 - Oportunidades de melhoria da eficiência**

<b>Medidas de economia de energia</b>	<b>Aplicabilidade<sup>(1)</sup></b>	<b>Ganhos<sup>(2)</sup></b>	<b>Potencial de contribuição<sup>(3)</sup></b>
<b>Instalação ou renovação do sistema</b>			
Melhoria dos acionamentos (motores de alta eficiência)	25 %	2 %	0,5 %
Melhoria dos acionamentos (Reguladores de velocidade)	25 %	15 %	3,8 %
Troca de compressores por versões mais modernas (aperfeiçoamento)	30 %	7 %	2,1 %
Uso de sistema de controle sofisticado	20 %	12 %	2,4 %
Recuperação de calor rejeitado para uso em outras funções	20 %	20 %	4,0 %
Melhoria no resfriamento, secagem e filtragem do ar	10 %	5 %	0,5 %
Projeto global do sistema, incluindo sistema de multipressões	50 %	9 %	4,5 %
Redução na perda por queda de pressão	50 %	3 %	1,5 %
Otimização de dispositivos (equipamentos) de uso final	5 %	40 %	2,0 %
<b>Manutenção e operação do sistema</b>			
Redução de vazamentos de ar	80 %	20 %	16 %
Substituição de filtros mais freqüente	40 %	2 %	0,8 %
<b>TOTAL</b>			<b>32,9 %</b>
(1) Percentual de situações onde esta medida é aplicável			
(2) Percentual de redução no consumo anual de energia			
(3) Potencial de contribuição = aplicabilidade x ganho			

**Exemplo de economia de energia no Brasil** - A avaliação das condições operacionais de um dos três sistemas de ar comprimido da fábrica da DAIMLER-CHRYSLER de São Bernardo do Campo (SP), por iniciativa da ELETROBRÁS/PROCEL, permitiu a identificação de oportunidades para a redução do consumo de energia elétrica. As soluções técnicas com maior potencial de economia de energia propostas possibilitarão redução da ordem de

40% no consumo de energia elétrica do sistema analisado, na geração e na distribuição do ar comprimido, levando a uma redução do consumo de energia elétrica de 2.474 MWh por ano, com economia anual de R\$ 188.011,00.

## 2.2 - Oportunidades de melhoria no sistema de ar comprimido específico de sua empresa

Com o objetivo de identificar oportunidades de melhorias e economia de energia elétrica nos sistemas de ar comprimido, sugerem-se os seguintes passos:

- a)** Obter valores de referências (*benchmark*), que podem ser valores históricos ou de outras empresas com sistema semelhante. Cuidado com as condições de contorno, como pressões envolvidas, porte do sistema, tipo de tecnologia empregada e condições ambientais, que determinaram o consumo de referência. Isto é, não compare laranja com banana.
- b)** Estabelecer metas de redução. Não estabeleça metas para valores absolutos; isto é, não se deve procurar reduzir kWh ou m<sup>3</sup>, mas sim índices específicos, como: kWh/m<sup>3</sup> produzido (consumido) e R\$ faturado/m<sup>3</sup>.
- c)** Identificar as oportunidades de melhoria. Consulte a parte 2 deste manual.
- d)** Estabelecer as ações necessárias para converter uma oportunidade identificada em melhoria concreta ou realizada.
- e)** Levantar a relação custo/benefício para cada ação. Considere custos de investimento, manutenção e operacionais, e ciclo de vida da medida. Então, compare com os benefícios tangíveis (redução de custos de energia, insumos, mão-de-obra) e qualitativos (impacto ambiental, melhoria da imagem, maior conforto, mais segurança). (Ver anexo B do livro "EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO".)
- f)** Priorizar as ações. Primeiramente estabeleça critérios e pré-requisitos compatíveis com a realidade da empresa, tais como disponibilidade de recursos, prazo de implantação, influência sobre o serviço prestado e "patrocinadores". Classifique as ações em: de pouco, médio ou alto investimento; com ou sem parada de produção; de curto, médio ou longo prazo; abrangência (no uso final, na distribuição e/ou no ar comprimido); aquelas que podem ser desenvolvidas por equipe própria ou por terceiros; complexas ou não; e de baixo ou alto impacto. A partir dos critérios e classificações, priorize e escolha as ações/medidas que serão implementadas, primeiramente.

# 3

## IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DEFINIDAS

### 3.1 - Implementação de melhorias em um sistema de ar comprimido genérico

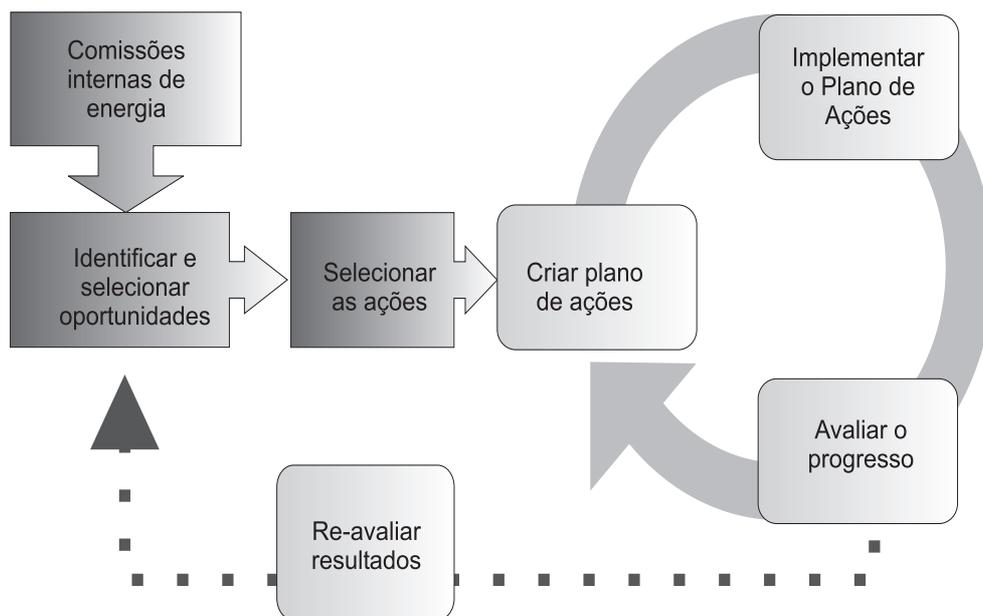
Como referência de implementação de melhorias, podem ser estudados casos publicados na literatura ou consultar os fornecedores de equipamentos e/ou componentes a serem utilizados sobre as melhores práticas a serem adotadas.

### 3.2 - Implementação de melhorias no sistema específico de sua empresa

- a) Planejar todas as atividades necessárias. Trabalhe com especialistas em sistema de ar comprimido, para implementar uma estratégia apropriada de controle para os compressores.
- b) Confirmar a disponibilidade de recursos (materiais, financeiros, humanos e de tempo).
- c) Implementar a medida.
- d) Documentar todas as atividades e custos.
- e) Medir as melhorias obtidas (medir o sucesso da implantação). Do mesmo modo que no início **1.d**, faça o levantamento dos dados da nova situação, estabeleça novos índices e rendimentos e ajuste os índices para as condições atuais, caso elas tenham se modificado ao longo da implantação da medida (aumento de produção, novos consumidores, época do ano, etc.).
- f) Comparar com a meta estabelecida. Justifique aquelas que não estejam em conformidade.
- g) Corrigir as dificuldades que surgiram.
- h) Uma vez que os controles estejam ajustados, repetir as medições para obter uma leitura precisa da potência (kW) e das pressões. Determine a carga de pico e recalcule o consumo de energia e custo do ar comprimido produzido.
- i) Identificar e consertar os vazamentos e corrigir os usos inapropriados – custos conhecidos. Repita as medições e reajuste os controles.

## 4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E REINÍCIO DO PROCESSO PARA NOVAS AÇÕES

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



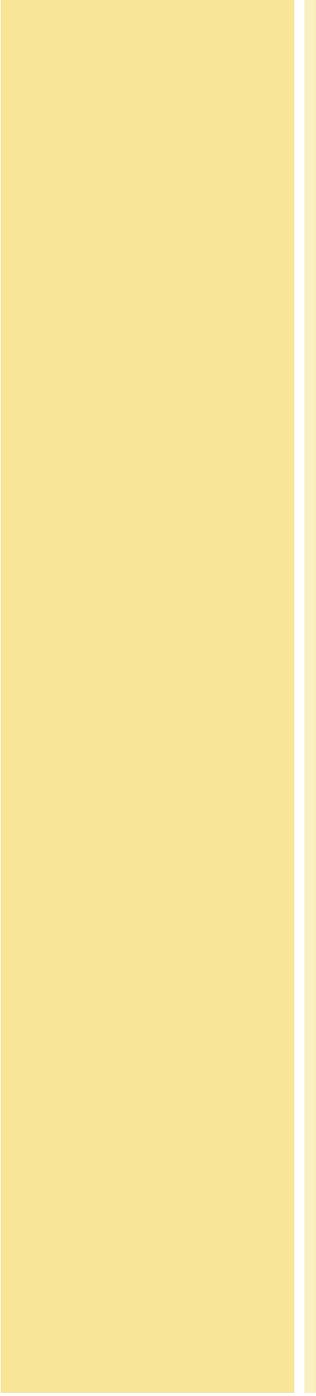
**Figura I.3** - Ciclo de implementação do plano de ação

### **Resumo do Plano de Ação de acordo com a abordagem sistêmica (“system approach”)**

A abordagem sistêmica analisa ambos os lados do sistema - da demanda e do fornecimento - e mostra como eles se interagem, essencialmente transferindo o foco dos componentes individuais para a atenção no desempenho global do sistema. Muitas vezes, os operadores estão tão focados nas demandas imediatas dos equipamentos que não têm conhecimento de como os parâmetros do sistema afetam o equipamento. Similarmente, a abordagem comum da engenharia consiste em explodir (subdividir) o sistema em seus componentes básicos ou módulos, otimizar a escolha (seleção) ou projeto destes componentes e, então, montar estes componentes para formar o sistema. Uma vantagem desta abordagem é que simplifica os problemas. Entretanto, uma desvantagem é que, freqüentemente negligencia a interação entre estes componentes. Por outro lado, a abordagem sistêmica avalia o sistema de forma global para determinar como as necessidades de uso final podem ser mais efetiva e eficientemente servidas.

O aperfeiçoamento e a manutenção do sistema de ar comprimido no seu melhor desempenho requerem não somente a atenção nos componentes individuais, mas também a análise de ambos os lados do sistema, do suprimento e da demanda, e do modo como eles interagem. A aplicação da abordagem sistêmica usualmente envolve os tipos de ações relacionadas nesta parte do Manual.





PARTE II

**OPORTUNIDADES PARA  
MELHORAR A EFICIÊNCIA**



## PARTE II - OPORTUNIDADES PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA

Para a identificação de oportunidades de melhoria na eficiência energética e no desempenho econômico de sistema de ar comprimido, sugere-se a seguinte metodologia de enfoque sistêmico.

# 1

## IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NA GERAÇÃO DE AR COMPRIMIDO

A produção de ar comprimido é, basicamente, um processo de conversão de energia, no qual a energia elétrica é convertida pelo motor em energia mecânica, que aciona o compressor, e este converte em energia potencial em forma de pressão no ar comprimido, pela transformação termodinâmica no ar atmosférico produzida pela compressão. Os compressores são os componentes que realmente demandam energia no sistema de ar comprimido. Isto implica que o gerenciamento da energia deve manter especial atenção nos compressores e nas suas condições de operação. Muitos fatores são ingredientes-chaves no desempenho dos compressores, como visto a seguir.

### 1.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência na geração de ar comprimido

A eficiência energética de um sistema, de maneira geral, indica o quanto um equipamento real aproxima-se de um comportamento ideal, no qual não existem perdas. Teoricamente, a eficiência energética na geração de ar comprimido  $\eta$  deveria ser determinada pela quantidade de energia útil contida no ar comprimido e pela quantidade de energia gasta para a sua produção. Na prática, a eficiência de um compressor é determinada a partir do rendimento termodinâmico  $\eta_{th}$  e do rendimento mecânico  $\eta_c$ .

$$\eta = \eta_{th} \cdot \eta_c$$

**Rendimento termodinâmico.** É obtido pelo trabalho de compressão teórico (processo adiabático reversível) e pelo trabalho de compressão real (processo politrópico) de um gás perfeito.

Rendimento termodinâmico ( $\eta_{th}$ ) associado a um processo real de compressão:

$$\eta_{th} = \frac{W_{th}}{W}$$

em que:

$W_{th}$  - trabalho ideal por unidade de massa, a ser calculado a partir de  $\int vdp$  ao longo de um processo ideal; e  
 $W$  - trabalho real por unidade de massa efetivamente empregado na compressão.

**Trabalho ideal de um compressor** (processo adiabático reversível)

$$W_{th} = P_1 \cdot v_1 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = R \cdot T_1 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \quad [\text{kJ/kg}]$$

em que:

$P_1$  - pressão do ar na admissão [bar] ou [ $10^2$  kN/m<sup>2</sup>];  
 $v_1$  - volume específico do ar na admissão [m<sup>3</sup>/kg];  
 $T_1$  - temperatura do ar na admissão [K];  
 $P_2$  - pressão do ar na descarga [bar] ou [ $10^2$  kN/m<sup>2</sup>];  
 $T_2$  - temperatura do ar na descarga [K];  
 $R$  - 0,287 [kJ/kg.K]; e  
 $n = \lambda = 1,4$  (ar em condições ambiente e processo adiabático).

**Trabalho real de um compressor** (processo politrópico). O trabalho real é obtido a partir de medidas efetuadas durante o funcionamento da máquina. Os parâmetros a serem medidos são:  $P_1, v_1, T_1, P_2, v_2, T_2$ . Utilizando-se as equações:

$$P_1 \cdot v_1^n = P_2 \cdot v_2^n;$$

$$P_1 \cdot v_1 = RT_1;$$

$$P_2 \cdot v_2 = RT_2$$

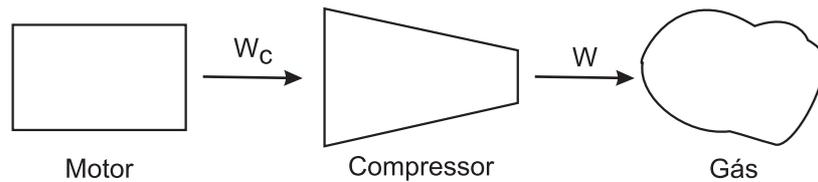
obtem-se:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}$$

Substituindo o valor  $n$  calculado ( $1 < n < 1,4$ ) na equação de  $W_{th}$ , obtém-se o valor de  $W$ .

**Rendimento mecânico.** Durante a transmissão de energia do acionador para o compressor ocorrem inevitáveis dissipações, provocadas pelo atrito mecânico. Dessa forma, como

indica o esquema da Figura II.1, apenas uma parte do trabalho recebido pelo compressor é fornecida ao gás.



**Figura II.1** - Esquema de transferência de energia ao gás

Para que esse efeito seja computado nos cálculos da compressão, utilizamos o rendimento mecânico  $\eta_{mec}$ , com valores típicos entre 0,92 e 0,98, cuja definição é dada por:

$$\eta_{mec} = \frac{W}{W_c}$$

sendo  $W$  o trabalho efetivamente fornecido ao gás para um suprimento  $W_c$  de trabalho ao compressor. A mesma definição poderia ser apresentada em termos das potências consumidas.

**Potência de compressão.** Compressores são equipamentos caracterizados termodinamicamente como volumes de controle, cujo desempenho deve ser analisado por meio da identificação de fluxos de energia. Por isso é que neste texto são feitas referências muito mais freqüentes à potência do que ao trabalho de compressão. Para o cálculo da potência, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\dot{W}_c = \frac{\dot{m} w_{th}}{\eta_{th} \eta_{mec}}$$

em que,

$\dot{m}$	= Vazão mássica do gás	[kg/s];
$w_{th}$	= Trabalho ideal por unidade de massa	[kJ/kg];
$\eta_{th}$	= Rendimento termodinâmico	[-];
$\eta_{mec}$	= Rendimento mecânico	[-]; e
$\dot{W}_c$	= Potência requerida pelo compressor	[kW].

**Consumo específico de energia** (kWh/m<sup>3</sup>). É um índice de referência da eficiência de um compressor. Na prática, para o seu cálculo é necessária a potência (kW) para a compressão e a vazão (m<sup>3</sup>/h) volumétrica de ar.

$$\text{Consumo específico de energia} = \frac{\dot{W}_c}{\dot{Q}} \quad [\text{kWh/m}^3] \quad \text{e} \quad \dot{Q} = \dot{m} \cdot v \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

em que:

$$v - \text{volume específico do gás} \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

Observação:

$$\text{Consumo específico de energia} = \frac{\dot{W}_c}{\dot{Q}} \quad [\text{kW.h/Nm}^3]$$

em que:

$$v - \text{volume específico normalizado do gás} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

Para converter m<sup>3</sup>/h em Nm<sup>3</sup>/h:  $[\text{Nm}^3/\text{h}] = [\text{m}^3/\text{h}] \times \{273/(273+T1)\} \times P1/1,033\}$

Em que o índice 1 indica as condições especificadas para o ar do equipamento.

Se a referência é nas condições de padrão normal, denomina-se **vazão**, ou **descarga padrão normal** (Nm<sup>3</sup>/h)

## 1.2 - Áreas de oportunidade de melhoria de eficiência na geração

### 1.2.1 - Redução de perdas devido à temperatura do ar aspirado pelo compressor

Quanto mais baixa for a temperatura de aspiração de um compressor, menor será a energia necessária para sua compressão. Como indicação, pode-se dizer, aproximadamente, que: para cada 4°C de aumento na temperatura do ar de aspiração, o consumo de energia aumenta em 1% para obter o mesmo volume gerado; e para cada 3°C de redução da temperatura do ar aspirado, verifica-se aumento de 1% da capacidade do compressor para o mesmo consumo.

Quanto mais baixa for a temperatura do ar aspirado, maior será a quantidade de massa de ar que poderá ser aspirada pelo compressor com a mesma vazão volumétrica aspirada e mesma potência consumida neste trabalho, isto porque o ar mais frio é mais denso. Então, maior massa de ar poderá ocupar o mesmo volume do que quando ele está mais aquecido. Portanto, é importante evitar que os compressores aspirem ar no interior do recinto onde

estão instalados, cuja temperatura é sempre mais alta que a do ar atmosférico externo. Nesse sentido, podem-se providenciar tubulações ligando a aspiração de ar do compressor a uma tomada de ar do exterior da sala de máquinas.

Assim sendo, recomenda-se que a tomada da aspiração de ar seja feita do exterior da sala de compressores. Caso seja necessário canalizar a tomada de ar, esta deve ser curta, reta e de grande diâmetro, e o filtro deverá ser mantido sempre limpo, para que a perda de carga na aspiração seja a menor possível. Para cada 25 mbar de queda de pressão na aspiração, o rendimento global do compressor é reduzido em 2%.

Nas instalações onde o compressor é resfriado a ar, também é usual lançar para o exterior o ar aquecido do resfriamento. Deve-se tomar cuidado para que este ar não aqueça o ar de aspiração do compressor. A Tabela II.1 correlaciona as temperaturas do ar aspirado e os percentuais de potência economizados ou incrementados tomando-se como base a temperatura de 21°C. Para valores diferentes dos citados na tabela, os valores podem ser interpolados.

**Tabela II.1** - Variação do consumo com a temperatura de aspiração

TEMPERATURA DO AR DE ASPIRAÇÃO	POTÊNCIA ECONOMIZADA OU INCREMENTADA
(°C)	Temperatura de referência 21°C
-1,0	7,5 % (economizado)
4,0	5,7 % (economizado)
10,0	3,8 % (economizado)
16,0	1,9 % (economizado)
21,0	0,0
27,0	1,9 % (incrementado)
32,0	3,8 % (incrementado)
38,0	5,7 % (incrementado)
43,0	7,6 % (incrementado)
49,0	9,5 % (incrementado)

### 1.2.2 - Redução de perda de carga por sujeira no filtro de aspiração

O ar atmosférico admitido pelo compressor de ar, apesar de ser filtrado à entrada (filtro primário), contém várias impurezas, invisíveis a olho nu. Entre elas, podemos destacar duas principais: vapor de água (umidade) e particulados (poeiras). Toda instalação de ar comprimido possui (ou deveria possuir) um filtro de ar na aspiração (filtro primário) para evitar a entrada de grandes partículas e sujeiras carregadas pelo ar atmosférico. Não havendo uma manutenção programada nesse filtro, a sujeira se acumulará, fechando, parcial e até totalmente os poros do filtro, o que acarretará aumento da perda de carga no filtro, representando um aumento do consumo de energia do motor de acionamento do compressor para a realização do mesmo serviço que faria com o filtro limpo.

### 1.2.3 - Redução de perdas no sistema de compressão

Compressores são utilizados para proporcionar a elevação da pressão de um gás ou escoamento gasoso. Nos processos industriais, a elevação de pressão requerida pode variar desde cerca de 1,0 atm até centenas de atmosferas. Há quem utilize a denominação “sopradores” para designar as máquinas que operam com elevação de pressão muito pequena, porém superior aos limites usuais dos ventiladores. Tais máquinas possuem características de funcionamento típicas dos compressores, mas incorporam simplificações de projeto compatíveis com a sua utilização.

**Escolha do compressor.** A escolha do tipo de compressor a ser adotado precede a seleção propriamente dita da máquina e envolve aspectos diversos. Fazendo uma análise que leve em conta apenas as características previstas para o processo de compressão, é possível estabelecer faixas de operação para o processo de compressão para as quais cada tipo de compressor é mais adequado e pode, em conseqüência, ser encontrado nas linhas de produção dos fabricantes. Conforme ilustra a tabela II.2, a vazão volumétrica aspirada, a pressão de descarga e a relação de compressão são os parâmetros que traduzem as restrições impostas a cada tipo do compressor pelo seu próprio princípio construtivo. Esse quadro foi elaborado a partir de dados fornecidos por diversas fontes bem credenciadas, mas deve ser utilizado apenas com objetivos didáticos. Isso porque ele focaliza valores médios, não se enquadrando rigidamente nos padrões de nenhum fabricante. E também porque a busca de maiores espaços de mercado gera, ocasionalmente, modificações apreciáveis nesse panorama.

**Tabela II.2** - Faixas de aplicação dos compressores

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

Os compressores alternativos foram as primeiras máquinas de compressão de gases a serem construídas, ainda no século passado. Mesmo proporcionando vazões muito baixas, esses compressores se mantiveram absolutos até o meio desse século, quando começaram a ser montadas plantas industriais de grande capacidade. A partir de então, passaram a sofrer a concorrência dos demais tipos de compressores em todas as faixas de aplicação, à exceção daquelas caracterizadas por baixas vazões e altas pressões de descarga. Quanto aos dados fornecidos pela Tabela II.2, convém destacar que vazões da ordem de 250 m<sup>3</sup>/min, mesmo sendo baixas em termos industriais, só podem ser conseguidas com compressores alternativos policilíndricos de grande porte.

Pelo exame da Tabela II.2, pode-se perceber que os compressores do tipo centrífugos são mais versáteis que todos os demais. Podem operar com um amplo espectro de vazões e possuem um limite máximo de pressão de descarga relativamente alto. Essa versatilidade, aliada a um projeto que inclui poucos componentes sujeitos a quebra ou desgaste, faz com que esta máquina seja a preferida para uso em processamento industrial. É relativamente tolerante à presença de líquido e pode, muitas vezes, ultrapassar cinco anos em campanha. Apresenta, todavia, alguma dificuldade de operação pela sensibilidade às variações nos parâmetros do processo. Atualmente, começa a ser fabricada no Brasil.

Os compressores axiais prestam-se a serviços que requeiram vazões extremamente elevadas e baixas pressões de descarga (a primeira condição está quase sempre aliada à segunda). Para tal fim, superam os compressores centrífugos, porque o fluxo está menos sujeito a

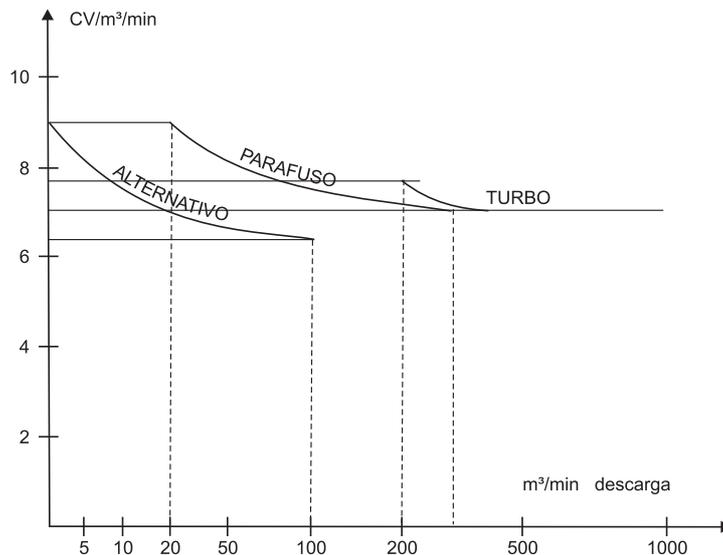
mudanças de direção, e isso lhes confere maior compacidade e eficiência aerodinâmica. Nessa faixa de aplicação, o fluido comprimido é quase sempre o ar, de modo que o projeto do compressor pode ser adaptado das turbinas a gás. Representa, no entanto, uma fração muito pequena no total das instalações industriais de compressão.

É importante frisar que a escolha baseada no custo inicial pode, muitas vezes levar a decisões inadequadas. O custo inicial representa apenas 12% do custo total durante a vida útil de um compressor, mais 12% se devem a gastos com manutenção e os restantes 76% são relativos a custos com energia elétrica nesse caso, para o acionamento.

**Rendimento dos compressores.** A avaliação e comparação das eficiências e capacidades de compressores não é uma tarefa fácil. Uma avaliação preliminar do rendimento dos compressores pode ser feita a partir dos catálogos dos fabricantes. Os catálogos costumam apresentar a potência dos motores instalados nos compressores e a vazão máxima do equipamento. A razão entre os dois valores nos fornece uma primeira idéia do consumo específico:

$$\frac{P}{V} = \frac{kW}{\frac{m^3}{h}} = \frac{kWh}{m^3}$$

O gráfico da Figura II.2 apresenta os consumos específicos médios de diversos tipos e tamanhos de compressores.



**Figura II.2** - Consumo específico médio dos compressores

A compressão em duplo estágio é sempre mais eficiente e, portanto, consome menos energia. Este fato deve ser levado em conta, em particular, para instalações de pequena capacidade volumétrica, pois existe a tendência de selecionar compressores de estágio simples.

O uso de óleo sintético em compressores reduz o consumo de energia de 2% a 5%, além de oferecer outros benefícios em relação ao óleo mineral, tais como: vida útil do óleo de até 8000 horas (equivalente a 7 trocas do óleo mineral), diminuição de depósitos de carbono e vernizes, temperatura do óleo mais baixa, temperatura de descarga do ar comprimido mais baixa, menor consumo de óleo, menor arraste de óleo na descarga; e menor ruído e vibrações. Recomenda-se que esta medida seja analisada em conjunto com o fabricante do compressor, para que se possa verificar sua aplicabilidade, bem como sua compatibilidade com os materiais do compressor e o fator econômico.

#### 1.2.4 - Redução de perdas com a pressão de trabalho muito elevada

A pressão de trabalho é um fator crítico, pois afetará significativamente o consumo de energia, que aumenta com o aumento da pressão de trabalho. Equipamentos que operam com diferentes pressões em uma mesma instalação podem ser atendidos mediante a redução da pressão nos pontos de consumo, por meio de válvulas redutoras. Algumas vezes, torna-se econômico o uso de compressores de diferentes vazões e pressões para atender a diferentes solicitações de operação, em um mesmo sistema.

A pressão de trabalho da instalação é definida pela pressão que atenda aos requisitos dos equipamentos consumidores mais as perdas da rede entre a geração e o consumo. Devem-se levar em conta o projeto e o traçado das tubulações da distribuição, os filtros usados, as válvulas, os secadores de ar, etc. A pressão escolhida deverá ser a menor que possa vencer todos os obstáculos ao fluxo do ar pelas tubulações e que atenda os consumidores segundo as condições exigidas pelo seu fabricante.

A pressão de trabalho é regulada pelo ajuste de desarme do pressostato de controle liga/desliga do compressor. Deverá estar próxima da pressão média de operação da linha. Um ajuste de pressão mais elevada leva o compressor a funcionar mais tempo que o necessário (e dependendo do valor deste ajuste, não entrar em alívio em nenhum momento), fato que poderá incorrer em elevações substanciais no consumo de energia elétrica.

De modo geral, os projetos consideram uma diferença de no máximo 0,8 bar entre a pressão média de trabalho no ponto mais distante do sistema e a pressão que se ajusta no pressostato de controle para fins efetivos de desarme. Essa diferença corresponde às perdas de carga máximas normalmente adotadas em projetos de sistemas de ar comprimido para

os pontos de alimentação mais distantes, levando-se em conta situações críticas (fatores de segurança).

O aumento de 1 bar no ajuste da pressão de desarme leva a um aumento de 6% a 10% na potência consumida pelos motores dos compressores, para pressões em torno de 6 a 7 bar.

A tabela II.3 mostra as relações entre a potência requerida para comprimir o ar em um estágio de compressão e a pressão de desarme. A partir destes dados, é possível estimar o percentual de potência adicional para atender ao trabalho de compressão, consideradas as pressões de desarme superiores às pressões reconhecidas como ideais (que levam em conta ser de 0,8 bar o diferencial máximo acima da pressão média de trabalho).

**Tabela II.3** - Variação de consumo com a pressão de desarme

PRESSÃO DE DESARME IDEAL OU AJUSTADA	POTÊNCIA REQUERIDA PARA COMPRIMIR CONTINUAMENTE 1 m <sup>3</sup> DE AR	
	POR MINUTO	POR HORA
(bar)	(cv/m <sup>3</sup> / min)	(kWh/m <sup>3</sup> )
0,70	1,29	0,016
1,75	2,65	0,032
3,50	4,25	0,052
5,60	5,70	0,070
7,00	6,49	0,080
10,50	8,02	0,098
14,00	9,28	0,114

As **perdas de carga** tornam o sistema mais econômico ou não. Isto dependerá da escolha dos acessórios de rede (curvas, válvulas, filtros etc.) e do dimensionamento das tubulações.

Para cada 0,25 bar de aumento na pressão do sistema para compensar as perdas de carga (filtros + secador + tubulação), consome-se 1,5% de potência a mais no compressor.

**Varição da pressão de trabalho.** A pressão de trabalho dos equipamentos e dispositivos consumidores de ar comprimido especificada pelo fabricante deve ser respeitada. A eficiência de um equipamento ou dispositivo pneumático cai bruscamente se a pressão de fornecimento do sistema cai abaixo de suas pressões de trabalho especificadas. A Tabela II.4 mostra a dependência da eficiência de equipamentos e dispositivos pneumáticos em

relação à pressão de trabalho, utilizando como exemplo ferramentas de um modo geral e martetele de impacto. Considerou-se que a pressão de operação especificada é de 6 bar.

**Tabela II.4** - Variação da performance com a pressão

<b>PRESSÃO DE OPERAÇÃO</b>	<b>DESEMPENHO RELATIVO</b>	<b>DESEMPENHO RELATIVO</b>	<b>CONSUMO DE AR RELATIVO</b>	<b>CONSUMO DE AR RELATIVO</b>
(bar)	Ferramenta	Martelo	Ferramenta	Martelo
7	120	130	115	120
6	100	100	100	100
5	77	77	83	77
4	55	53	64	56

Em certas aplicações, as pressões de trabalho necessárias para o acionamento de vários consumidores são bem diferentes. Uma situação como esta deve ser examinada com mais profundidade, para uma solução mais econômica. É o caso de alguns poucos equipamentos com consumo baixo de ar comprimido, mas que necessitam de pressões de trabalho bem maiores que os outros equipamentos que estão em maior quantidade. Nesse caso, um compressor pequeno secundário pode ser instalado para atender em rede separada, com pressão de desligamento  $P_{max}$  mais alta. Normalmente, o aumento da pressão de trabalho para atender a todos os equipamentos é antieconômica. A melhor solução consiste em separar as redes e instalar compressores menores para atender os casos especiais.

### 1.2.5 - Recuperação de calor de compressão

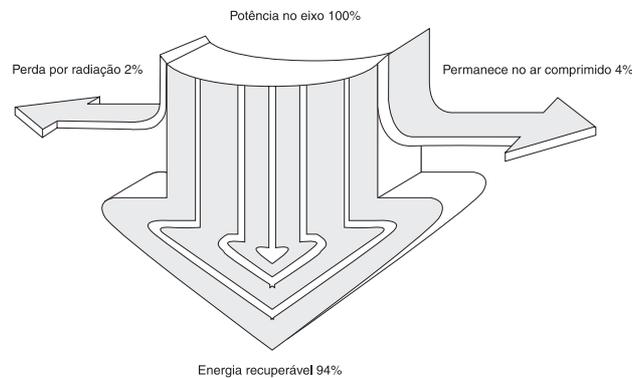
É conveniente ressaltar que 80% da energia gasta na compressão se transforma em calor e que parte do calor produzido pelo compressor e seu motor se transmitem para o ambiente. No caso dos compressores resfriados a ar, o calor dissipado pode superar em até 70% da energia elétrica consumida pelo motor e nos compressores resfriados a água o calor transmitido para a sala dos compressores pode atingir valores da ordem de 15% do seu consumo.

Quando se produz o ar comprimido, ocorre o aquecimento do ar no final da compressão. Este calor é normalmente retirado do ar comprimido por resfriamento (usando um trocador de calor, "cooler"), utilizando-se água ou ar. A seguir, o ar ou a água aquecidos pelo calor do ar comprimido são lançados na atmosfera, no esgoto ou numa torre de refrigeração. Aí se encontra um foco bastante grande do mau uso da energia. Calcula-se que um sistema de ar comprimido que consome 500 kW durante 8000 horas de funcionando por ano

corresponde a uma perda de energia de 4 milhões de kWh/ano de energia térmica, que poderia ser recuperada.

A figura II.3 mostra como a energia térmica gerada na compressão é distribuída.

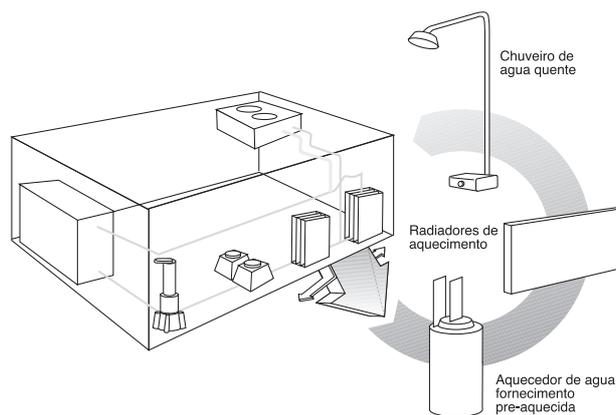
É fácil observar que é possível recuperar até 94% da energia consumida no eixo do compressor, na forma de calor.



*O calor como produto natural de compressão, energia que pode ser recuperada na forma de água quente pelo sistema de resfriamento do compressor*

**Figura II.3 - Energia recuperável**

A Figura II.4 mostra um esquemático de aquecimento de água para banho dos funcionários de uma fábrica.



*Cada compressor da instalação representa grande possibilidades de recuperação de energia. Cera de 95% da energia fornecida ao compressor pode ser recuperada nos compressores de arafuso*

**Figura II.4 - Esquema de recuperação possível de energia térmica**

A tabela II.5 mostra a energia recuperada de acordo com a vazão efetiva de um compressor

**Tabela II.5 - Energia recuperada**

DLE	TAXA DE CALOR	QUANTIDADE GANHA EM 2000 HORAS DE OPERAÇÃO	ÓLEO
m <sup>3</sup> /min	kW	kWh/ano	m <sup>3</sup> /ano
6,4	34	68.000	10,0
7,4	40	80.000	11,8
11,4	51	102.000	15,0
14,0	61	122.000	17,9
18,7	92	184.000	27,1
21,6	109	218.000	32,1
23,2	118	236.000	34,7
27,9	137	274.000	40,3
34,8	176	352.000	51,8
43,1	215	430.000	63,2
46,9	235	470.000	68,1
46,5	229	458.000	67,4
51,3	253	506.000	74,7
56,9	284	568.000	83,5
62,9	319	638.000	93,8
69,7	366	732.000	108
75,4	359	718.000	106
83,2	392	784.000	115
103,6	490	980.000	144
124,5	602	1.200.000	177

### 1.2.6 - Redução de perdas por manutenção preventiva inadequada

Tal como ocorre com os equipamentos eletromecânicos, os sistemas de ar comprimido industrial necessitam de manutenção periódica para operar com eficiência elevada e

minimizar as paradas não programadas. A manutenção inadequada pode aumentar o consumo de redução de eficiência de compressão, vazamentos ou oscilações na pressão.

Também pode acarretar altas temperaturas de operação, deficiente controle de umidade, contaminação excessiva e um ambiente de trabalho inseguro. Muitos problemas são secundários e podem ser corrigidos com simples ajustes, limpeza, substituição de peças ou eliminação de condições adversas. A manutenção de um sistema de ar comprimido é similar à realizada em carros. Filtros e fluidos devem ser trocados, a água de refrigeração deve ser inspecionada, correias devem ser ajustadas e vazamentos devem ser identificados e consertados.

Um bom exemplo de custo excessivo devido a uma manutenção inadequada pode ser visto no uso de filtros, pois quando estão sujos aumentam a queda de pressão, o que reduz a eficiência do compressor. Por exemplo, um sistema de ar comprimido que possui um compressor de 100 cv operando continuamente a um custo de R\$ 0,20/kWh tem um custo anual de energia de R\$ 130.000. Com um filtro coalescente sujo (não substituído no intervalo regular), a queda de pressão através do filtro poderia aumentar para 0,4 bar, vs. 0,1 bar quando limpo, resultando em uma necessidade de aumento na pressão do sistema. A queda de pressão de 0,3 bar acima da queda normal de 0,1 bar eleva em cerca de 2% os custos anuais de energia do sistema ar comprimido, ou R\$ 2.600 por ano. Um medidor de diferença de pressão é recomendado para monitorar as condições dos filtros de entrada do compressor.

Todos os componentes de sistema de ar comprimido devem sofrer manutenção de acordo com as especificações dos fabricantes. Os fabricantes fornecem programação de inspeção, manutenção e de serviços, que deveriam ser rigorosamente seguidos. Por isso, os intervalos especificados pelo fabricante têm como objetivo, primeiramente, proteger o equipamento, mais do que otimizar a eficiência do sistema. Em muitos casos, é conveniente realizar as manutenções nos equipamentos de ar comprimido com maior frequência.

Uma forma de saber se um sistema de ar comprimido está em boas condições de manutenção e operando eficientemente consistem em, periodicamente comparar com a base de referência o consumo de potência, pressão, vazão de ar e temperatura. Se o consumo de potência para uma dada pressão e vazão aumenta, a eficiência do sistema está declinando. Referenciar o sistema também indicará se o compressor está operando à plena capacidade e se sua capacidade está diminuindo com o passar do tempo. Em um novo sistema, as especificações devem ser bem guardadas quando o sistema é instalado pela primeira vez e opera corretamente.

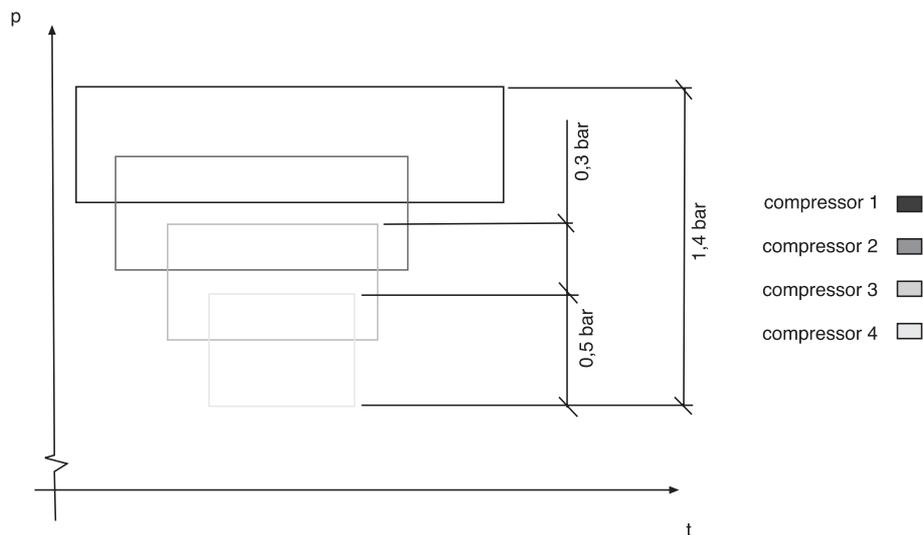
**Tipos de manutenção.** A manutenção em um sistema de ar comprimido requer cuidado com os equipamentos, exigindo atenção às mudanças e tendências, e respondendo prontamente para manter as operações confiáveis e eficientes. Para assegurar o máximo de desempenho e tempo de serviço para os compressores, uma rotina programada de manutenção precisa ser elaborada e seguida. Uma correta manutenção requer procedimentos diário, semanal, mensal, quadrimestral, semestral e anual. A excelência na manutenção é fator chave para aumentar a disponibilidade e confiabilidade de um sistema de ar comprimido, reduzindo o consumo de energia, economizando tempo, cortando custos operacionais e melhorando a produtividade da fábrica e a qualidade dos produtos.

### 1.2.7 - Redução de perdas devida à melhoria no sistema de controles de compressores

A melhoria do desempenho de um sistema de ar comprimido requer não somente a atenção para os componentes individuais, mas também a análise de ambos os lados do suprimento e da demanda, e do modo como eles se interagem, especialmente durante o período de pico na demanda.

**Ajustando o suprimento com a demanda.** Em sistemas de ar comprimido, sistemas de controles capazes de compensar as constantes variações na demanda são especialmente importantes. O uso de sistemas de controle, de armazenagem e de gerenciamento da demanda que atendam aos picos de demanda, mas que também operem eficientemente com carga parcial é fator chave para se obter uma elevada eficiência do sistema de ar comprimido.

**Controle por cascata.** É a forma mais comum de controlar os compressores. Cada compressor é ajustado para um ponto mínimo e máximo de operação diferenciado, e os compressores são acionados em seqüência, de acordo com o nível de queda de pressão e conseqüente demanda de ar comprimido do sistema. Quando a demanda de ar comprimido é pequena, somente um compressor entra em operação. À medida que a demanda aumenta, outros compressores são acionados. Quando são utilizados pressostatos convencionais, é necessária uma diferença mínima de 0,5 bar entre a pressão mínima e máxima de acionamento de cada compressor individual. A diferença entre as pressões máximas e mínimas entre os compressores não poderá ser inferior a 0,3 bar (Figura II.5).



**Figura II.5** - Controle em cascata

A queda de pressão em um sistema com quatro compressores pode chegar a 1,4 bar. Com a utilização de pressostatos eletrônicos, os limites de operação de cada compressor individual podem ser reduzidos para 0,2 bar, e a queda de pressão no sistema para 0,7 bar. Recomenda-se controlar, no máximo, quatro compressores por este método, pois as perdas no sistema decorrentes da largura da banda da pressão podem ser elevadas.

**Controles de carga/vazio.** A maioria dos compressores utilizam motores assíncronos. O número de ciclos de liga/desliga permissível diminui com o aumento da potência destes motores, e este número não corresponde à quantidade de ciclos necessária para manter o nível de pressão do sistema em uma faixa estreita. Por este motivo, quando a pressão máxima é atingida, o compressor entra em alívio; ou seja, abre uma válvula interna, não realizando a compressão do ar. Porém, o motor continua em funcionamento por algum tempo, consumindo cerca de 20% da energia necessária para operar o compressor a plena carga.

**Inversores de frequência.** Compressores controlados por variadores de velocidades não apresentam rendimento constante na faixa de regulação. Em um motor de 120 hp o rendimento cai de 94% para 86%. A este fato somam-se as perdas do compressor e o comportamento não linear da potência dos compressores. Utilizados de forma errada, os variadores de frequência podem aumentar o consumo de energia elétrica sem que seja notado pelo operador do sistema. A instalação de conversores de frequência somente se justifica em compressores utilizados para atender a cargas variáveis, pois nos compressores para a carga básica não devem ser utilizados.

**Controle centralizado.** Os controles centralizados são sistemas eletrônicos que coordenam o funcionamento de um conjunto de compressores. Os compressores devem permitir o seu gerenciamento, a transmissão e o recebimento de dados para o controlador central. Os compressores são agrupados de acordo com sua função (carga básica ou de pico), podendo ser de potências iguais ou diferentes. A coordenação dos compressores é uma atividade complexa, e o controle centralizado deve ser capaz não só de gerenciar o funcionamento dos compressores, como de permitir a utilização uniforme dos mesmos, garantindo uma utilização e a ocorrência de desgastes parecidos entre todos os compressores, reduzindo os custos de manutenção.

Um pré-requisito para um controle eficiente (redução de custos com energia elétrica) é a graduação uniforme das capacidades dos compressores. A soma das capacidades dos compressores de carga de pico deve ser superior à capacidade do próximo compressor de carga básica. Da mesma forma, utilizando-se um compressor com inversor de frequência, a faixa de capacidade do mesmo deverá ser superior à capacidade do próximo compressor de carga básica a ser acionado. De outra forma a operação econômica dos compressores fica comprometida.

A comunicação entre os compressores e o comando central deve ser confiável, inclusive com a comunicação de perda de sinais devidos; por exemplo, a cabos partidos.

**Gerenciamento por faixa de controle.** Utilizando-se de “faixa de pressão” de amplitude definida, diversos compressores são gerenciados de modo a manter a pressão do sistema entre os limites definidos. O gerenciamento vetorial determina a queda ou o aumento da pressão no sistema entre os limites estabelecidos e calcula o consumo de ar momentâneo. Os compressores reagem retroativamente à solicitação de ar do sistema. Em sistemas com consumo muito variável, este tipo de controle pode levar a vibrações na tubulação, exigindo medidas contra pulsações. A amplitude mínima de pressão a ser obtida por um controle deste tipo fica por volta de 0,5 bar.

A análise de tendência, por sua vez, permite um controle mais eficiente, pois permite amplitudes de 0,2 bar para a faixa de controle. Este tipo de controle analisa o padrão de consumo de ar e calcula a tendência de consumo, permitindo o acionamento dos compressores à frente da solicitação de ar comprimido pelo sistema. Sistemas de análise de tendência trabalham com uma precisão entre 0,01 e 0,03 bar, permitindo o gerenciamento de sistemas com variações bruscas de demanda de ar comprimido. É tecnicamente viável coordenar até 16 compressores simultaneamente com uma amplitude de 0,2 bar para a faixa de controle.

**Controladores de pressão/fluxo.** Controladores de pressão/fluxo (P/FC) são sistemas de controle de pressão que podem ser usados em conjunto com controles de compressor individual ou de múltiplos compressores, como descrito acima. Um P/FC não controla diretamente um compressor e isso, geralmente, não é parte integrante do compressor. Um P/FC é um dispositivo que serve para separar (isolar) o lado do suprimento de um compressor do lado da demanda, necessitando de um reservatório para a armazenagem do ar comprimido.

Uma das razões para o custo demasiadamente elevado do ar comprimido é o fato de os compressores nem sempre terem sido adequadamente dimensionados para as necessidades de variação de consumo da instalação. Não é raro encontrar compressores trabalhando com carregamento médio de 50%, fato que não é possível verificar pela instrumentação do compressor se o mesmo apresenta somente um horímetro com as horas totais trabalhadas, mas não com as horas trabalhadas em carga parcial ou em alívio. Em sistemas de controles bem ajustados, o carregamento dos compressores pode ser elevado a 90%, gerando uma economia de energia elétrica de 20% ou mais.

### 1.2.8 - Redução de perdas usando reservatório e sistema de estabilização de pressão

O compressor, usualmente, funciona fornecendo ar para um reservatório. Considera-se que os resfriadores posteriores, ou *aftercoolers*, são parte integrante dos compressores. As necessidades instantâneas de ar comprimido da instalação são cobertas pelo reservatório, que, enquanto está cedendo ar para a instalação, permite que o compressor permaneça desligado ou funcione de modo contínuo, sem quedas bruscas de pressão. A armazenagem compensa as flutuações no consumo e atende aos picos de consumo. Como o motor elétrico é desligado poucas vezes, o seu desgaste é reduzido. Em algumas instalações, vários reservatórios podem ser necessários. Instalações de grande porte configuram casos em que se empregam vários reservatórios. O volume do reservatório é determinado pela DLE do compressor, pelo sistema de controle e pelo consumo de ar comprimido. Os reservatórios de ar comprimido desempenham tarefas importantes nos sistemas pneumáticos.

**Redução da oscilação do ar comprimido.** Devido ao seu princípio de operação, os compressores de pistão fornecem uma vazão pulsante. As flutuações na pressão, às vezes, prejudicam o funcionamento dos equipamentos e dispositivos consumidores. Os instrumentos de controle de operação e medição reagem muito mal a estas flutuações e podem apresentar erros drásticos. Os reservatórios são usados para balancear tais flutuações de pressão. Nos compressores do tipo de parafusos, o aparecimento dos problemas citados acima é muito reduzido, devido ao seu princípio de funcionamento na produção do ar comprimido.

**Atender a picos de demanda.** Para os sistemas usuários que apresentam ferramentas de uso esporádico, terminais usados para limpeza ou equipamentos pneumáticos com consumos elevados mas que funcionam por curto período, o volume de ar do reservatório é utilizado para minimizar ou eliminar a necessidade de compressores de maior capacidade apenas para atender a esses curtos períodos de demanda. Em alguns casos justifica-se a aquisição de um ou mais compressores para atender apenas a esse tipo de carga.

Os reservatórios de ar comprimido são absolutamente necessários em sistemas em que os compressores têm funcionamento intermitente e com muitos tempos mortos. A flutuação da pressão não deve exceder a 20% da pressão máxima de operação (por exemplo, para uma pressão máxima de 10 bar é permitida uma flutuação de até 2 bar). Caso ocorram flutuações maiores, poderão ocorrer problemas estruturais, principalmente nas partes soldadas do tanque, pelo aparecimento de tensões adicionais que levam a falhas por fadiga. Para sistemas assim, deverão ser usados reservatórios de construção especial.

**Volume dos reservatórios ( $V_R$ ).** Diversas são as indicações para o cálculo do volume do reservatório. O volume depende dos mecanismos de controle e automação, do tipo de compressor empregado e do regime de funcionamento. O reservatório deve ter capacidade suficiente para atender a cargas instantâneas elevadas ou esporádicas. O tamanho do reservatório e o número de partidas por hora permitidas para motores de compressores ( $T_C$ ) são variáveis que se relacionam. Algumas regras práticas indicadas na literatura recomendam:

- Volume de 10 a 100% da vazão em  $m^3/min$  que o sistema deve atender ( $V_R = 0,1$  a  $1 \times Q$ ), em que  $Q$  é a demanda do sistema.
- Para sistemas com consumo constante, geralmente, compressores a parafuso,  $V_R = DLE / 3$ .
- Para sistemas com consumo intermitente, geralmente, compressores a pistão,  $V_R = DLE$ .

Sistemas funcionando com compressores a pistão requerem reservatórios maiores para permitir melhor equalização do fluxo de ar, evitando-se os pulsos de ar gerados nesse tipo de compressor.

**Dica:** Quanto maior o diferencial de pressão permitido, menor será o reservatório ou menos tempo o compressor irá funcionar.

Caso se queira reduzir o tempo em alívio dos compressores, isto é, **economizar energia**, deve-se aumentar o tamanho dos reservatórios e/ou aumentar o diferencial de pressão, reduzindo a pressão de entrada em operação, se for possível.

### 1.2.9 - Redução de perdas pelo tratamento do ar comprimido

Os equipamentos mais modernos que utilizam ar comprimido exigem que este esteja completamente livre de impurezas, seco (isento de água) e, em certas aplicações, até esterilizado. As impurezas contidas no ar atmosférico são normalmente invisíveis a olho nu. Elas podem danificar e reduzir a performance de funcionamento dos equipamentos pneumáticos, podendo até, em certos casos, provocar falhas nos produtos finais do usuário / indústria. Em média, 1 m<sup>3</sup> de ar atmosférico contém mais de 180 milhões de partículas, de tamanhos que se distribuem entre 0,01 e 100 µm, e de 5 a 40 g/m<sup>3</sup> de água. Também é comum existir material oleoso na base de 0,01 a 0,03 mg/m<sup>3</sup> em suspensão na forma de aerossóis e de hidrocarbonetos gasosos. Em certos locais também são encontrados traços de material pesado, como: chumbo, cádmio, mercúrio e ferro. Quando o ar é comprimido, o volume ocupado pelo ar é reduzido, e a concentração dessas impurezas aumenta bruscamente. Por exemplo, na compressão de ar a 10 bar a concentração de impurezas aumenta 11 vezes. Assim, o volume de 1 m<sup>3</sup> de ar comprimido nesta pressão conterá cerca de 2 bilhões de partículas.

#### • Benefícios obtidos com o tratamento do ar comprimido

- aumento da vida útil dos equipamentos consumidores de ar comprimido;
- melhoria na qualidade do produto final;
- isenção de condensado e sujeiras nas tubulações pneumáticas;
- redução de problemas mecânicos por mau funcionamento, causado por essas sujeiras;
- redução de custos com a aquisição de dispositivos de coleta e a eliminação de condensado das linhas;
- redução dos tempos mortos, devido à manutenção corretiva;
- redução de perdas de pressão na distribuição de ar, por eliminar as resistências ao escoamento do ar; e
- redução do consumo de energia, que é diretamente ligada à perda de pressão.

A presença das impurezas e de água no ar atmosférico, admitida no sistema de compressão, poderá causar problemas em diversas partes do sistema de ar comprimido. Por exemplo: aumentar o desgaste das tubulações e dos equipamentos consumidores e gerar a possibilidade de redução da qualidade dos produtos do processo fabril. Em algumas aplicações, o uso do ar comprimido sem o devido tratamento pode causar danos muito graves e até prejudiciais à saúde. Tendo em vista essas considerações, torna-se importante que o ar seja tratado; ou seja, retirado o máximo possível de particulados, óleo e água.

**Secagem do ar comprimido.** Uma parte importante no tratamento do ar comprimido é cumprida pela retirada da água do ar comprimido. Esta ação, denominada *secagem do ar comprimido*, oferece inúmeras vantagens aos usuários de ar comprimido, em termos de qualidade, durabilidade e manutenibilidade.

**Aftercooler ou resfriador posterior de ar comprimido.** O aftercooler é um trocador de calor, que resfria o ar comprimido, possibilitando a precipitação primária do condensado, evitando que a água fique nas tubulações. O resfriamento do ar comprimido pode ser realizado por água ou ar. A posição de instalação deverá ser logo após o compressor, antes do reservatório e do sistema de secagem do ar. Cerca de 80-90% do condensado deverão ser precipitados pela ação do aftercooler e do secador. De modo geral, o ar comprimido deixa o aftercooler com a temperatura 10°C acima da do fluido de resfriamento usado: ar ou água. Atualmente, os resfriadores posteriores estão incorporados ao compressor em um único conjunto.

Os métodos de secagem usam os princípios de: condensação, sorção e difusão para a retirada da água contida no ar.

- **Condensação.** Consiste na precipitação da água quando o ar é resfriado do seu ponto de orvalho.
- **Sorção.** É a secagem por remoção química da umidade. Neste processo, o ar é obrigado a entrar em contato com um material higroscópico, que poderá ser líquido ou sólido (exemplo: cloreto de sódio e ácido sulfúrico).
- **Difusão.** É a secagem por transferência molecular em película. Com o tempo de uso, a película tem que ser regenerada. Existem dois tipos de regeneração: a frio e a quente.

Embora exista a possibilidade de utilização de secadores de todos os tipos, a realidade mostra que para o uso normal de ar industrial os secadores que funcionam na base de condensação, denominados *secadores de ar por refrigeração*, são, de longe, os mais utilizados.

O uso de secadores de sorção exige o consumo de material higroscópico, de parcela do ar produzido e de uma fonte de energia para regeneração do material secante. Deste modo, torna-se um processo menos eficiente e mais caro. Entretanto, este tipo de secador deve ser empregado quando se deseja um ar praticamente isento de água, pois ele pode levar o ponto de orvalho a -40°C, enquanto os secadores por refrigeração, para as mesmas condições, atingem pontos de orvalho entre 2 e 10°C. Como seu emprego para secagem completa é limitado a aplicações específicas, faremos considerações somente sobre o uso de secadores de ar por refrigeração. Primeiramente, verificaremos onde deve ser posicionado o secador num circuito de ar comprimido.

Posicionamento dos secadores com relação ao reservatório de ar. Existem duas

possibilidades de arranjo de um sistema de secagem do ar comprimido por refrigeração em uma instalação. O sistema pode ser instalado antes ou depois do reservatório de ar comprimido. A decisão de se utilizar uma ou outra situação depende das considerações sobre as vantagens e desvantagens da escolha.

**Filtragem do ar comprimido.** Os filtros utilizados nas instalações têm a função de retirar partículas sólidas e óleo presentes no ar comprimido.

Filtros e terminologia dos filtros

a) Filtros coalescentes

- Filtros coalescentes grau AO

Usados para a remoção de partículas de até 1 micron, inclusive água e óleo condensado. A remoção de óleo prescreve um residual máximo de óleo de  $0,5 \text{ mg/m}^3$  de ar a  $21^\circ\text{C}$ .

- Filtros coalescentes grau AA

Usados para a remoção de partículas de até 0,01 micron, inclusive água e óleo condensado. A remoção de óleo prescreve um residual máximo de óleo de  $0,01 \text{ mg/m}^3$  de ar a  $21^\circ\text{C}$ . A instalação deste filtro deve ser precedida em série por um filtro coalescente do grau AO.

- Filtros coalescentes grau ACS e AC (carvão ativo)

Usados para a remoção de vapores de óleo, propiciando um conteúdo remanescente máximo de óleo menor que  $0,003 \text{ mg/m}^3$  de ar ( $0,003 \text{ ppm}$ ) a  $21^\circ\text{C}$ . A instalação deste filtro deve ser precedida em série por um filtro coalescente do grau AA. Os filtros ACS e AC não removem  $\text{CO}$ /  $\text{CO}_2$  ou qualquer outro gás tóxico.

A concentração é usualmente medida pela proporção do peso das impurezas pelo volume [ $\text{mg/m}^3$ ] do ar comprimido. Para concentrações muito baixas, a medida de concentração é usualmente definida pelo número de partículas por unidade de volume [ $\text{n}^\circ$  de partículas/ $\text{cm}^3$ ]. A quantidade de partículas por unidade de volume como medida de concentração é utilizada para medir a eficiência de filtragem de filtros de alto desempenho. A medição precisa e acurada do peso e ou quantidade de partículas por unidade de volume envolve muito trabalho e instrumentos de medição delicados.

### 1.2.10 - Redução de perdas na drenagem do condensado

A compressão produz a umidade em forma de gotas de água (condensado). Esta água é usualmente drenada de dentro do reservatório. Parte do calor gerado no ar devido à compressão é retirada e cedida ao meio que envolve o reservatório pelas superfícies externas do reservatório, e então o ar é resfriado. Esse resfriamento é que origina o fato de grande parte do condensado ser precipitado nas paredes internas do reservatório. O

condensado é coletado no fundo do reservatório e removido para o exterior por meio de um conjunto adequado de drenagem. Nos reservatórios em instalações onde na grande parte do tempo ficam sem funcionar, as paredes poderão ter corrosão pelo condensado. A galvanização das superfícies em contato com o condensado pode reduzir este problema. Porém, se o condensado é drenado constante e regularmente, não é absolutamente essencial a galvanização. Quando o condensado contém concentrações de agentes agressivos, a galvanização é absolutamente necessária.

Sempre e onde aparecer nos sistemas pneumáticos, o condensado deve ser drenado. Caso contrário, ele tomará conta de toda a tubulação, e o ar o transportará para onde for. A coleta e a eliminação de condensado representa um custo operacional obrigatório. O condensado deve ser drenado também para que possam se manter as perdas de pressão do sistema sob controle. Deve-se levar em conta que a formação de condensado não ocorre em regime constante. A quantidade de condensado varia com a vazão, a temperatura e a umidade do ar que é aspirado pelo compressor.

**Classificação dos tipos de drenagem para condensado.** Para selecionar o tipo de drenagem de condensado a ser usado, devem-se observar o tipo de condensado e as condições de formação do mesmo. A partir daí, deve-se escolher o tipo de drenagem a ser utilizado. Para cada local de aplicação do ar comprimido, o condensado gerado irá orientar o uso. Alguns fatores que devem ser levados em conta são:

- condensados muito agressivos;
- condensados pastosos;
- áreas com perigo de explosão;
- redes que operam com pressões muito baixas ou mesmo vácuo; e
- redes que operam com pressões muito altas ou super altas.

**Drenagem por meio de válvulas manuais.** O condensado deverá ser coletado em recipientes apropriados, onde poderá ser também armazenado por algum tempo. O pessoal de operação deverá verificar o nível deste recipiente em intervalos de tempo regulares. Se necessário, o condensado deverá ser drenado, por meio da abertura de uma válvula manual instalada no fundo do recipiente, e ser esgotado direto para o esgoto. Suas principais características são:

- construção simples e barata;
- não necessita do uso de eletricidade; e
- não tem alarme ou aviso de que o reservatório esteja cheio (portanto, a verificação de nível de condensado deverá ser feita em intervalos de tempo regulares).

**Drenagem com controle de nível.** No interior do recipiente de condensado existe uma bóia que controla a abertura da válvula de saída no fundo do tanque, por intermédio do acionamento de uma alavanca. Se o nível do tanque alcança determinada altura, a alavanca efetua a abertura da válvula. A pressão do sistema obriga o condensado a sair do recipiente. Quando o nível atinge certos valores, a alavanca funciona em sentido contrário, fechando a válvula de saída e evitando que ar comprimido da linha escape. Suas principais características são:

- simples e barato;
- não usa eletricidade, o que o torna utilizável em áreas com perigo de explosão;
- não há perda de ar comprimido;
- por ter partes móveis e entrar em contato direto com o condensado, o sistema necessita de ter manutenção mais regular;
- não tem sinal de alarme; e
- as válvulas de bóia devem ser escolhidas para cada tipo de condensado.

**Drenagem por meio de válvulas magnéticas de comando temporizado.** O condensado é acumulado em um recipiente apropriado. Em intervalos de tempo regulares e fixados (1 a 30 min.), uma válvula magnética opera a abertura de uma saída de dreno de condensado no fundo do tanque. Depois de um tempo de operação, por exemplo, de 0,5 a 10 s, a válvula fecha. O condensado é lançado para fora do recipiente pela pressão do sistema.

#### Nota

Para garantir a retirada total do condensado formado, deve-se otimizar o tempo de funcionamento, ou seja, o tempo de abertura e fechamento da válvula. Este ajuste deverá variar, pois no verão a quantidade de condensado é maior que no inverno, devido ao aumento da umidade no ar atmosférico. O ajuste deverá ser otimizado para que não se permita fuga de ar comprimido pelo dreno.

Suas principais características são:

- operação muito confiável (o sistema tem confiabilidade, por resolver o problema da eliminação do condensado);
- são necessárias ligações elétricas;
- nenhum sinal de mau funcionamento poderá ser visto externamente;
- não possui nenhum sinal de alarme; e
- a válvula magnética só opera quando o compressor é ligado.

**Drenagem utilizando medição eletrônica de volume ocupado.** O condensado é recolhido em um recipiente adequado. Tão logo o nível máximo permitido no recipiente é alcançado pelo condensado armazenado, um sensor de nível (Ni-2) habilita a válvula magnética, que abre uma linha de controle, liberando pressão da linha de ar, que age sobre um diafragma. A força sobre o diafragma cessa, e a válvula é relaxada, abrindo passagem para o tubo de saída. Tão logo o nível mais baixo é atingido, o sensor (Ni-1) habilita o fechamento eletrônico da válvula magnética. O diafragma da válvula se fecha antes que o ar comprimido escape. Suas principais características são:

- operação bastante confiável;
- o sistema funciona muito bem, mesmo com condensados problemáticos;
- como a seção de passagem do condensado é bem grande, não existe a possibilidade de sujeiras e material coagulado ficarem retidos no recipiente, pois a descarga é realizada sem dificuldade;
- não existe perda de pressão;
- é necessária ligação elétrica;
- funcionamento flexível (o sistema se adapta automaticamente às mudanças das condições de operação: variação na viscosidade e flutuações de pressão do condensado);
- possui alarme (se acontecer um defeito na drenagem do condensado, o alarme é acionado em 60s - a válvula magnética opera automaticamente o diafragma em intervalos seguidos);
- sinal externo (um LED fica piscando, chamando a atenção dos operadores); e
- faixa de desempenho ótimo bem ampla.

**Drenagem utilizando bóia para controle de nível.** O condensado recolhido segue diretamente para uma câmara de coleta da drenagem do condensado. Uma bóia aciona uma haste dentro de uma guia, acompanhando o aumento de nível do condensado na câmara. Esta guia tem três contatos elétricos, que registram o nível de condensado na câmara. Tão logo a bóia atinja o contato 2, o controlador eletrônico habilita a abertura da válvula magnética. A pressão sobre o diafragma da válvula é relaxada, via uma linha de controle, e o tubo de saída é aberto. A pressão do sistema força o condensado para fora, por um tubo vertical.

O nível do condensado no tubo abaixa e um controlador fecha, depois de um tempo ajustado, para que o ar comprimido não escape. Caso o nível do condensado não alcance o contato 1 no intervalo de tempo, o dreno será automaticamente aberto em intervalos de tempos e novamente fechado depois de um período prefixado. Isto garante que a câmara de acumulação de condensado esteja sempre vazia. Se o nível de condensado alcança o

contato 3, o controle atua e liga um alarme. Suas principais características são:

- exigência de limpeza periódica;
- não causam perda de pressão; e
- existência de contato elétrico.

### 1.3 - Exemplos

#### Exemplo 1

- Compressor do tipo parafuso aspirando ar no interior da casa de máquinas.
- Temperatura do ar aspirado dentro da casa de máquinas: 41°C.
- Temperatura do ar atmosférico: 32°C.
- Procedimento de melhoria: instalação de um duto de aspiração ligando o filtro primário ao exterior da casa de máquinas.
- Resultado esperado: redução no consumo de energia elétrica.

Procedimento:

- Da Tabela II.1, o valor para 41°C (obtido por interpolação entre os valores 38°C e 43°C) é igual a 6,8% (incremento)
- Da Tabela II.1, para 32°C = 3,8%
- Diferença de incrementos: 6,8 - 3,8 = 3%
- Percentual de 3,0% energia economizada sobre o que se estiver consumindo até então.

Considerando tratar-se de um motor elétrico de 150 CV, cuja potência de trabalho média em regime de compressão é da ordem de 93 kW, e que o ciclo de trabalho opera 11 horas por dia e 26 dias por mês de compressão efetiva, tem-se:

- Consumo médio mensal anterior: 26.598 kWh.
- Economia mensal com a redução da temperatura do ar aspirado: 798 kWh.
- Considerando-se um preço médio de 0,20 R\$/kWh, economiza-se a importância de R\$ 159,60/mês ou R\$1.915,00/ano.

#### Exemplo 2

- Compressor de pistão operando com a pressão de desarme de 8,5 bar.
- Pressão de trabalho dos equipamentos pneumáticos = 6 bar.

- Pressão ideal de desarme (considerando as perdas normais do sistema) =  $6 + 0,8 = 6,8$  bar.
- Pressão de desarme excedente =  $8,5 - 6,8 = 1,7$  bar.
- Potência correspondente à pressão de desarme =  $7,14 \text{ cv/m}^3/\text{min}$  (valor obtido por interpolação na Tabela II.3).
- Potência correspondente à pressão de desarme ideal =  $6,43 \text{ cv/m}^3/\text{min}$  (valor obtido por interpolação na Tabela II.3).
- Potência devida ao excedente de pressão =  $7,14 - 6,43 = 0,71 \text{ cv/m}^3/\text{min}$  (que representa 11% de aumento sobre o consumo e sobre o valor da potência correspondente ao valor da pressão ideal).
- Percentual de redução de potência e de energia elétrica consumida no motor de acionamento do compressor **11%**.

Considerando que se trata de um motor de 60 cv, cuja potência de trabalho média em regime de compressão é da ordem de 39 kW, e que o ciclo de trabalho opera 16 horas por dia durante 30 dias por mês em compressão efetiva, têm-se:

- Consumo médio, considerando a pressão de desarme excedente: 18 720 kWh/mês.
- Potencial de economia com a redução de 1,7 bar na pressão de desarme: 2059 kWh/mês.
- Redução de custos com energia elétrica, considerando o preço médio de 0,20 R\$/kWh = R\$ 411,00/mês ou R\$ 4 941,00/ano.

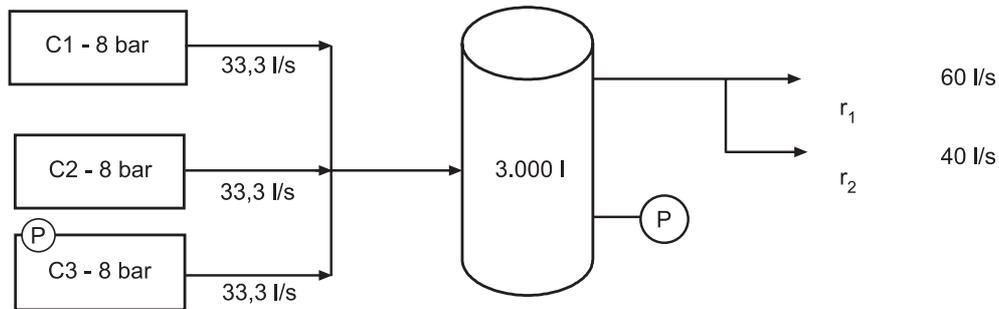
### Exemplo 3

Uma instalação com três compressores trabalhando entre 8 e 7 bar ( $\Delta P = 1$ ), cada um com DLE de  $2 \text{ m}^3/\text{min}$  (33,33 l/s), a 8 bar, reservatório de 3.000 l e temperatura ambiente de 30°C. Os motores de acionamento possuem ciclos mínimos de 5 minutos, isto é, taxa de ciclos seguidos do motor  $-T_c = 12$ , potência em carga de 12 kW e em alívio de 2,5 kW. O sistema demanda  $3,6 \text{ m}^3/\text{min}$  (60 l/s) em média, mas apresenta uma demanda adicional de  $2,4 \text{ m}^3/\text{min}$  (40 l/s) durante 20 segundos a cada 10 minutos.

Dois compressores estão regulados para, ao atingir a pressão de 8 bar na rede de ar, entrarem em alívio, assim permanecendo até que a pressão reduza a 7 bar. Se após 5 minutos a pressão não atingir esse valor, eles são desligados. O outro compressor, que está regulado para uma faixa de pressão maior, trabalha continuamente, conforme verificado.

O sistema funciona 24 h/dia, 720 h/mês. Devem-se verificar as opções de otimização atuando no tamanho do reservatório e/ou no diferencial de pressão.

Considerações iniciais:



**Figura II.6** - Croqui do exemplo

O sistema demanda 100 l/s por 20 s a cada 10 minutos e 60 l/s no tempo restante. O reservatório abastece o sistema. Quando a pressão atinge 8 bar, os compressores 2 e 3 entram em alívio, até que a pressão atinja 7 bar.

Verifiquemos o ciclo de funcionamento do sistema, partindo do reservatório cheio ( $P_1 = 8 \text{ bar}$ ;  $V_1 = 3 \text{ m}^3$ ;  $\rho_1 = 10,47 \text{ kg / m}^3$ ), para a situação de acionamento dos dois compressores ( $P_2 = 7 \text{ bar}$ ;  $V_2 = 3 \text{ m}^3$ ;  $\rho_2 = 9,31 \text{ kg / m}^3$ ).

Da equação geral dos gases  $P \cdot V = m \cdot R \cdot T$   
 $R$  = constante do ar  
 $m = \rho \cdot V$

O volume permanece o mesmo, mas a massa varia. Considerando que a temperatura será a restabelecida e constante, podemos escrever que:

$P / m = \text{constante}$

Logo:  $P_1 / m_1 = P_2 / m_2 \rightarrow m_2 = P_2 \cdot m_1 / P_1 \rightarrow m_2 = P_{2\text{abs}} \cdot \rho_1 \cdot V_1 / (P_{1\text{abs}} \cdot \rho_2)$  (4.6)

Utilizando os dados, temos que  $m_1 = 31,42 \text{ kg}$  e  $m_2 = 27,93 \text{ kg}$ . Teremos as seguintes situações, num ciclo:

t0 – reservatório a 8 bar, compressor 1 com vazão de 33,33 l/s e demanda do sistema de 100 l/s, reservatório perdendo massa.

t1 - ao se perder 3,49 kg de ar, os compressores 2 e 3 serão acionados - demanda e produção igual a 100l/s.

t2 - até os 20s, a pressão do reservatório ficará constante.

t3 - Retornando a demanda para 60 l/s, os 40 l/s excedentes “encherão” o reservatório de novo até a pressão de 8 bar, entrando os dois compressores em alívio.

t4 - haverá uma demanda excedente de 26,67 l/s ( $60 - 33,33$ ), que “esvaziará” o reservatório até 7 bar. Os compressores 2 e 3 serão acionados - produção igual a 100l/s. Volta à situação t3. Esse ciclo (t3 - t4 - t3) permanece até completar 10 minutos, quando reinicia-se o ciclo de t0 a t4.

Devido à variação de massa específica durante os ciclos, usaremos valores médios. A Tabela II.6 resume a situação encontrada.

**Tabela II.6** - Situação encontrada

	t0	t1	t2	t3	t4
t (s)	0	3,3	20	25,4	33,6
Q (l/s)	100	100	100	60	60
P (bar)	8	7	7	8	7
DLE (l/s) - C1	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33
DLE (l/s) - C2	0	33,33	33,33	33,33	0
DLE (l/s) - C3	0	33,34	33,34	33,34	0
<b>C2 e C3 -</b>	<b>sem carga</b>	<b>sem alívio</b>	<b>Total</b>	<b>ciclos</b>	
após 20 s.	5,4	8,2	13,6	42,7	
em 10 min.	248,8	351,2	600,0		
	41 %	59 %	100 %		
Potência - kW	12	2,5			
Consumo* total	15804,1	2107,5	17912	kWh	

\*inclui C1

Com a proposta de operar apenas dois compressores, mantendo um de reserva, conforme a Tabela II.7 apresenta. Nesse caso, propõe-se que t1 coincida com t2, para evitar que C3 opere.

**Tabela II.7** - Situação proposta

	t0	t1	t2	t3	t4
t (s)	0	20,0	20	120,1	145,1
Q (l/s)	100	100	100	60	60
P (bar)	8	?	?	8	?
DLE (l/s) - C1	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33
DLE (l/s) - C2	33,33	33,33	33,33	33,33	0
DLE (l/s) - C3	0				0

C1 e C2 -	s em carga	s em alívio	Total	ciclos
após 20 s.	100,1	25,0	125,1	4,6
em 10 min.	464,1	135,9	600,0	
	77%	23%	100%	
Potência - kW	12	2,5		
Consumo* total	15323,2	407,7	15731 kWh	

\*inclui C1

Para conseguirmos esse ciclo de operação, podemos reduzir a pressão mínima do sistema ou aumentar o volume do reservatório ou ambos.

As três soluções encontradas são apresentadas na Tabela II.8. Elas foram obtidas variando-se a pressão e/ou o volume do reservatório de modo a obter-se t1 = 20 s. Nesse tempo, haverá uma "fuga" de  $666,67 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  ( $20 \times 33,334 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ), que, multiplicada pela densidade média ( $\rho$ ), representa a massa que o reservatório poderá perder e manter a condição proposta.

$$\rho = (-0,00407 p - 0,00398) T + (1,31285 p + 1,2867) \quad (\text{kg/m}^3)$$

em que:

$p$  - Pressão do ar; e

$T$  - Temperatura do ar.

**Tabela II.8** - Alternativas encontradas

ALTERNATIVA	VOLUME DO RESERVATÓRIO	PRESSÃO MÍNIMA
1 - redução da pressão	3,0 m <sup>3</sup>	5 bar
2 - aumento do reservatório	9,2 m <sup>3</sup>	7 bar
3 - ambas	4,6 m <sup>3</sup>	6 bar

Caberá ao pessoal do processo verificar se é possível reduzir a pressão sem prejudicar a produção. Quaisquer das soluções promoverá uma economia de 12% do consumo de energia e poderá reduzir a demanda em até 12 kW.

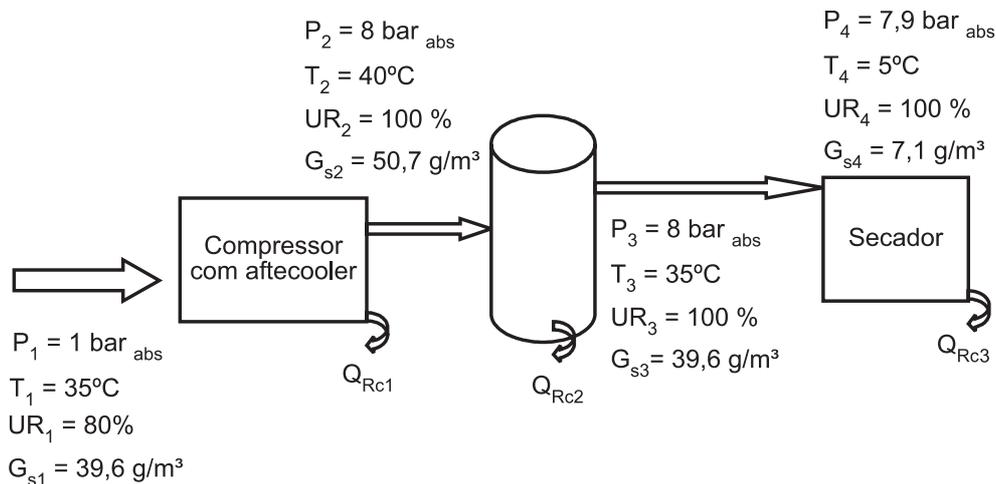
Existem outras soluções: utilizando ou não o terceiro compressor; atuando no tempo de alívio; e automatizando o funcionamento dos compressores com a demanda. Há outras, que não são o objetivo do tema estudado.

O arquivo “exerciciocap4”, que consta no CD que acompanha este Manual, apresenta as planilhas usadas no cálculo.

#### Exemplo 4

Este exemplo mostra como determinar a vazão de condensado, **Q<sub>c</sub>**, que realmente irá se precipitar quando o ar é comprimido. Este volume é o que deverá ser retirado do sistema.

Ar atmosférico é aspirado a pressão de 1 bar<sub>abs</sub>, temperatura de bulbo seco de 35°C, umidade relativa e a máxima fornecida pela meteorologia de 80% e 39,6 g/m<sup>3</sup>, descarga livre (DLL) de 2000 m<sup>3</sup>/h na pressão final P<sub>2</sub> = 7 bar (8 bar<sub>abs</sub>). A instalação de compressão compreende um compressor em série com um “aftercooler” (resfriador posterior de ar), um reservatório de ar comprimido e um secador de ar comprimido por refrigeração e as condições conforme mostradas no esquema representado na Figura II.7.



**Figura II.7 – Condições do exemplo**

O ar atmosférico contém uma quantidade de água. No caso acima, a vazão de água aspirada é dada por:

$$Q_{\text{agua}} = DLL \times G_s \times UR$$

$$Q_{\text{agua}} = 2000 \times 0,0396 \times 0,80 = 63,4 \text{ kg/h} \cong 63,4 \text{ l/h}$$

No compressor, o ar é aquecido por compressão a  $P_2$ . Imediatamente, é resfriado pelo aftercooler, que leva o ar a atingir a temperatura de  $40^\circ\text{C}$ , alcançando 100% de umidade relativa, e aí o condensado se precipita ( $Q_{c1}$ ). Na prática, não é possível coletar todo o condensado, pois parcela é arrastada pelo fluxo de ar. Assumindo uma eficiência ( $\epsilon$ ) do aftercooler de 90%, temos:

$$Q_{Rc} = Q_c \cdot \epsilon$$

$$Q_{c1} = Q_{\text{agua}} - (DLE_2 \times G_{s2} \times UR_2)$$

$$DLE_2 = DLL / P_2 = 2000 / 8 = 250 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$G_{s2} = 50,7 \text{ g de água/m}^3, \text{ da Tabela II.9}$$

$$Q_{c1} = 63,4 - (250 \times 0,0507 \times 1) = 50,7 \text{ kg/h} \cong 50,7 \text{ l/h}$$

$$Q_{Rc1} = 50,7 \times 0,9 = 45,6 \text{ kg/h}$$

A vazão de água contida no ar que vai para o reservatório será:

$$Q_{\text{agua2}} = Q_{\text{agua}} - Q_{Rc1} = 63,4 - 45,6 = 17,8 \text{ kg/h}$$

Logo após, ao entrar no reservatório, sofre ligeira expansão, e sua temperatura equaliza com a do ambiente, de 35°C ( $G_{s3} = 39,6 \text{ g/m}^3$ ), UR de 100%. No reservatório, nova quantidade de condensado se precipita ( $Q_{Rc2}$ ). Mantendo a eficiência de drenagem em 90%, temos:

$$Q_{Rc2} = Q_{c2} \cdot \varepsilon$$

$$Q_{c2} = Q_{\text{agua2}} - (DLE_3 \times G_{s3} \times UR_3)$$

$$Q_{c2} = 17,8 - (250 \times 0,0396 \times 1) = 7,9 \text{ kg/h} \cong 7,9 \text{ l/h}$$

$$Q_{Rc2} = 7,9 \times 0,9 = 7,1 \text{ kg/h}$$

**Tabela II.9** - Máxima umidade do ar

TEMPERATURA	PRESSÃO DE SATURAÇÃO	UMIDADE MÁXIMA
(°C)	(bar)	(g / m <sup>3</sup> )
0	0,00623	4,8
5	0,00891	7,1
10	0,01251	9,4
15	0,01738	12,8
20	0,02383	17,3
25	0,03229	23,0
30	0,04325	30,4
35	0,05733	39,6
40	0,07520	50,7
45	0,09771	65,4
50	0,12578	82,3

A vazão de água contida no ar que vai para o reservatório será:

$$Q_{\text{agua3}} = Q_{\text{agua2}} - Q_{Rc2} = 17,8 - 7,1 = 10,7 \text{ kg/h}$$

Depois, o ar comprimido será resfriado no secador por refrigeração na temperatura de 5°C. O condensado do ar será todo precipitado e drenado do secador, ( $Q_{Rc3}$ ). Como há uma perda de carga (0,1 bar), o DLE terá que ajustado.

$$Q_{Rc3} = Q_{\text{agua3}} - DLE_4 \times G_{s4} \times UR_4$$

$$G_{s4} = 7,1 \text{ g de água / m}^3, \text{ da Tabela II.9}$$

$$Q_{Rc3} = 10,7 - 250 \times (8 / 7,9) \times 0,0071 = 8,9 \text{ kg/h} \cong 8,9 \text{ l/h}$$

A vazão de água contida no ar que vai para a rede será:

$$Q_{\text{agua4}} = Q_{\text{agua3}} - Q_{Rc3} = 10,7 - 8,9 = 1,8 \text{ kg/h}$$

Para a temperatura da rede de 35°C ( $G_{s3} = 39,6 \text{ g/m}^3$ ), a umidade contida será:

$$UA = 1,8 / (250 \times 8 / 7,9) = 0,0071 \text{ g/m}^3$$

Logo, o ar sairá com uma umidade relativa de:

$$UR = 0,0071 / 0,0396 = 0,18 \text{ ou } 18\%$$

A vazão de água retirada do ar será a soma de todas as parcelas,  $Q_{rc}$ . Logo:

$$Q_c = 45,6 + 7,1 + 8,9 = 61,6 \text{ kg/h} \cong 61,6 \text{ l/h}$$

Em vinte quatro horas de funcionamento por dia, retiram-se do ar cerca 1500 litros de água, sendo que o secador é responsável por retirar cerca de 240 l.

#### Exemplo 5 - Exemplo de cálculo de h de filtro

Um aparelho de ar comprimido tem a concentração de impurezas antes da filtragem  $C_1 = 30 \text{ mg/m}^3$ . Após a filtragem, a concentração de impurezas é  $C_2 = 0,003 \text{ mg/m}^3$ , composta por partículas de tamanho maiores que 3  $\mu\text{m}$ .

$$\eta = 100 - (C_2/C_1 \times 100)$$

$$\eta = 100 - [(0,003/30) \times 100] = 99,99$$

O filtro tem uma taxa de separação de 99,99% relativa a partículas maiores que 3  $\mu\text{m}$ .

### 1.4 - Sugestões para identificar oportunidades na geração

- Revise o padrão da demanda de ar comprimido para determinar se o armazenamento está sendo benéfico.
- Examine as aplicações de ar comprimido para determinar se podem ser supridas por um compressor menor com armazenagem separada para reduzir as flutuações do sistema causadas por uma demanda intermitente.
- Revise as aplicações de ar comprimido e determine o nível de pressão necessário.
- Revise o padrão da demanda do sistema de ar comprimido para determinar qual método de estabilização da pressão é mais apropriado.
- Entenda as necessidades do seu sistema pelo desenvolvimento dos perfis de pressão e de demanda antes de investir em controles adicionais.
- Identifique os usos finais que são afetados pelos problemas de pressão.
- Inspeccione os equipamentos existentes para assegurar-se de que estão em boas condições operacionais.

- Uma vez implementado estas ações, trabalhe com um especialista em ar comprimido para casar (adaptar) a estratégia de controle com as reais necessidades do seu sistema.
- Estabeleça um programa de manutenção regular, bem organizado, de acordo com as especificações dos fabricantes.
- Indique alguém da instalação para ter a responsabilidade de cuidar para que todas as necessidades de manutenções do sistema de ar comprimido sejam realizadas corretamente, no tempo programado e adequadamente documentada.
- Revise os equipamentos de tratamento de ar comprimido para confirmar se está operando adequadamente.
- Inspeccione a entrada de ar do compressor para certificar-se de que ele esteja limpo e sem ameaça de contaminação.

## 2

## IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NA DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO

A função do sistema de distribuição é transportar o ar comprimido desde os compressores e/ou reservatórios de acumulação até os pontos de uso final. A eficiência na distribuição de ar comprimido é determinada pela capacidade de conduzir o ar comprimido com menores perdas possíveis.

### 2.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência na distribuição de ar comprimido

As principais perdas de eficiência energética em um sistema de distribuição de ar comprimido são decorrentes de: (1) queda de pressão entre o compressor e os pontos de consumo de ar; e (2) vazamentos de ar. Em geral, a linha de distribuição deve ser projetada para que a queda de pressão entre o ponto de geração e o de consumo não ultrapasse o limite recomendável de 0,3 bar ou 5 % da pressão de geração. No entanto, durante a vida útil de uma instalação pode ocorrer que novos pontos de consumo sejam incorporados, com suas demandas de vazão de ar específicas, fazendo com que o limite de perda de carga seja ultrapassado.

Uma queda de pressão elevada na distribuição pode dar origem a uma pressão de ar no ponto de consumo inferior à prevista, ocasionando perda de potência nas ferramentas pneumáticas. Nas redes de distribuição, sempre que for possível, é recomendável que seu traçado seja em forma de anel fechado, passando o mais próximo dos pontos de consumo. Isto permite que a distribuição seja mais uniforme quando os consumos são intermitentes,

já que o ar poderá chegar até o ponto de consumo por carrinhos diferentes. Com este traçado, as velocidades de escoamento são menores em qualquer ponto e, portanto, as perdas de carga também são menores.

## 2.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência na distribuição do ar comprimido

Considerando o enfoque nos parâmetros que atuam para a redução do consumo e potência, as oportunidades de eficientização nas instalações de distribuição de ar comprimido são relacionadas a seguir.

### 2.2.1 - Redução de perdas devido à queda de pressão (perdas de carga na tubulação)

A queda de pressão no sistema de distribuição implica pressões mais baixas nos pontos de consumo de ar do que na descarga do compressor e, conseqüentemente, também decréscimo na potência disponibilizada para as ferramentas, máquinas ou outros consumidores de ar comprimido. Se a queda de pressão, ou perda de carga, é tão alta que a pressão de trabalho é menor que a pressão prescrita, a perda de potência é proporcionalmente muito maior do que a queda de pressão. A potência desenvolvida por uma ferramenta a 5,0 bar, por exemplo, é de somente 45% a 50% da potência fornecida com a pressão de 7,0 bar. Por esse motivo, a rede de distribuição deve ser corretamente dimensionada, já considerando ampliações futuras, de modo que um posterior acréscimo no consumo não prejudique todo o sistema e torne necessária a substituição da rede inteira. Isso se aplica, acima de tudo, para o ramal principal. O custo inicial é largamente compensado pelos ganhos operacionais.

Às vezes, uma grande queda de pressão na rede é compensada pelo aumento da pressão de trabalho do compressor; por exemplo, de 7,0 para 8,8 bar. No caso de diminuição do consumo, a pressão ficará acima do desejado, aumentando as perdas por vazamentos. Além disso, nem todas ferramentas são projetadas para resistir tais aumentos.

**Perda de pressões admissíveis (DP).** Os seguintes valores são encontrados adotados na prática para não comprometer a eficiência do sistema:

- perda máxima de pressão para o ponto mais afastado do compressor: 0,3 bar;
- tubulações principais (mestras): 0,02 bar para cada 100 metros de tubo;
- tubulações secundárias: 0,08 bar para cada 100 metros de tubo;
- tubulações de acesso direto ao consumidor: 0,2 bar para cada 100 metros de tubo; e

- mangueiras de alimentação de marteleiros, perfuratrizes etc: 0,4 bar para cada 100 metros de mangueira.

### **Velocidades permitidas para o ar nas tubulações (v)**

- Tubulações principais: 6 a 8 m/s;
- Tubulações secundárias: 8 a 10 m/s;
- Mangueiras: 15 a 30 m/s

Linhas com excesso de curvas e com mudanças de direção exageradas causam aumento das perdas de carga a serem vencidas pelo compressor e também levam a uma regulação de pressão de desarme muito alta, causando maior tempo de funcionamento do compressor e levando ao consumo maior de potência e energia elétrica.

As redes de distribuição de ar comprimido devem ser projetadas de modo que a queda de pressão total - do compressor até o ponto de consumo mais distante - não exceda 0,3 bar. Para o caso de instalações que cobrem grandes áreas, como minas e pedreiras, uma queda de pressão maior no sistema de tubos pode ser aceita, mas não maior que 0,5 bar. Esta já inclui a queda de pressão nas mangueiras de borracha, luvas de acoplamento, engates rápidos e conexões. Especial atenção deve ser dada à dimensão dessas peças, pois as perdas mais sérias geralmente ocorrem nessas conexões.

Embora em certos casos se utilize o alimentador em anel, isto é, em circuito fechado, a linha aberta é quase sempre preferida. O dimensionamento pode ser feito por dois critérios: o da velocidade e o da perda de carga. O primeiro deles é usado apenas para trechos curtos usando-se as seguintes velocidades recomendadas: tubulações principais - 6 a 8 m/s; ramais secundários - 8 a 10 m/s; e mangueiras - 15 até 30 m/s. O procedimento é bastante simples. Consiste em determinar o diâmetro a partir da vazão e pressão requerida, considerando as velocidades recomendadas conforme o tipo de trecho.

$$\{Q = A \cdot v \text{ e } A = (\pi \cdot D^2 / 4) \text{ e } D = 1,13 \cdot (Q / v)^{1/2}\}$$

Em um sistema de distribuição já em operação a perda de carga, ou queda de pressão, poder ser facilmente determinada pela colocação de manômetro junto ao ponto de consumo do ar comprimido (ponto de uso final). A partir da leitura da pressão no reservatório e no ponto de uso final, obtém-se a queda de pressão para aquele ponto de uso final. Cada ponto de uso final poderá ter uma queda de pressão ligeiramente diferente dos outros, dependendo da distância e do trajeto que o ar percorre até chegar aos pontos de uso final.

Obs.: Para mais detalhes sobre o cálculo de perda de carga de uma linha de distribuição a ser projetada, consultar o livro texto “EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO”, item 7.6.1. Perdas de carga e velocidades utilizadas nas tubulações.

### 2.2.2 - Redução de perdas devido aos vazamentos na distribuição

Os vazamentos de ar comprimido são freqüentes e de origens diversas. Representam de 10% a 40% da demanda máxima de ar comprimido de um sistema. Esta variação tão ampla depende da configuração de cada sistema e dos cuidados de manutenção. O desgaste dos equipamentos e acessórios e com o mau uso do ar comprimido constituem as principais causas de perdas. O desgaste de um sistema de distribuição e de seus equipamentos é inevitável. Pode-se analisar esse fenômeno por dois aspectos: sistema principal de distribuição de ar; e sistema secundário acoplado a diversos equipamentos.

De maneira geral, os sistemas de distribuição de ar comprimido podem ser configurados de diversas formas. Normalmente, a tubulação é conectada por meio de conexões roscadas, flangeadas ou soldadas. As conexões roscadas e flangeadas dão origem a vazamentos ao longo dos anos, em decorrência da perda gradual de vedação. Estas perdas são menos relevantes do que aquelas que ocorrem nos acoplamentos finais.

A corrosão pode, da mesma forma, dar origem a vazamentos, sendo, portanto, recomendável que os tubos corroídos sejam trocados por razões de segurança e eficiência energética. O uso de mangueiras de material e/ou montagem inadequados também é outro item gerador de vazamentos. A maioria das perdas ocorre no acoplamento de um equipamento à tubulação do sistema de distribuição de ar. Todos os acessórios ou dispositivos são acoplados por meio de conexões com juntas de vedação, as quais, com o uso, deixam escapar o ar comprimido. As mangueiras podem furar ou trincar, devido ao envelhecimento. Os conjuntos de filtro-regulador-lubrificador ou separador de líquido podem apresentar vazamentos em vários locais, seja nos acoplamentos rosqueados de entrada e saída, no manômetro, no copo (que pode rachar) ou no dreno, que pode estar gasto ou mau fechado.

Quanto aos engates rápidos, tanto no macho como na fêmea, podem apresentar perdas. As juntas de vedação dos cilindros pneumáticos podem apresentar vazamentos, sendo que o risco de vazamento será tanto maior quanto mais freqüente for o uso do cilindro.

As válvulas de drenagem elétricas ou os purgadores mecânicos de condensado podem apresentar vazamento tanto nas conexões de acoplamento como no próprio corpo, devido à presença de sujeira na sede da válvula de fechamento. Vazamentos de ar comprimido podem contribuir para problemas com as operações do sistema, incluindo:

- flutuações na pressão do sistema, que podem causar um funcionamento menos eficiente de ferramentas a ar e outros equipamentos operados a ar, possivelmente afetando a produção;
- excesso de capacidade do compressor, resultando em custos mais altos que os necessários; e
- redução da vida útil de serviço e aumento de manutenção dos equipamentos de suprimento (incluindo o compressor), devido ao desnecessário ciclo e aumento no tempo de operação (ligado).

Embora os vazamentos possam ocorrer em qualquer parte do sistema, as áreas em que estes problemas ocorrem com mais frequência são: acoplamentos (juntas, uniões), mangueiras, tubos, adaptações, uniões de tubulações, engates rápidos, FRLs (filtro, regulador, e lubrificador), purgadores de condensado, válvulas, flanges, roscas de vedação e dispositivos de uso final. A vazão de ar perdido é função da pressão e aumenta com a elevação da pressão do sistema. A vazão de ar perdido é proporcional ao quadrado do diâmetro do furo. A tabela II.10 indica valores da vazão de ar perdido (taxa de vazamento) para diferentes pressões de suprimento e furos de tamanhos aproximadamente equivalentes.

**Tabela II.10** - Vazão de ar perdido em função do diâmetro do furo e da pressão do ar (m<sup>3</sup>/min.)

PRESSÃO	DIÂMETRO DO FURO (mm)					
	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	9,6
(bar)						
4,8	0,008	0,033	0,132	0,527	2,107	4,752
5,5	0,009	0,036	0,148	0,588	2,353	5,302
6,2	0,010	0,041	0,162	0,654	2,605	5,851
6,9	0,011	0,044	0,179	0,714	2,857	6,429
8,6	0,014	0,055	0,217	0,868	3,461	7,802

Para a identificação de vazamentos, pode ser utilizada a técnica de detecção por ultra-som, que permite localizar todos os pontos de vazamento de ar na distribuição, bem como na área de geração e uso final. Com base na inspeção com ultra-som, faz-se a classificação segundo a prioridade para eliminação dos vazamentos tendo em vista a perda de energia, colocando-se etiquetas nos pontos de vazamentos. Além disso, visando assegurar que o nível de perdas em vazamentos de ar seja o menor possível, deve-se criar uma rotina de manutenção para a distribuição de ar comprimido, baseada na medição periódica da vazão de ar perdido em vazamentos.

É bastante comum nas instalações de ar comprimido nas indústrias não haver verificação e manutenção periódica das linhas de distribuição, por considerar perda de tempo parar a instalação para fazer a manutenção. Os vazamentos existentes (geralmente do conhecimento de todos) são negligenciados. Porém, estes podem atingir patamares significativos em relação ao consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, aumentar o custo final do ar comprimido. A tabela II.11 indica as correlações entre o tamanho do furo, a vazão de perda e a potência desperdiçada em vazamentos, considerando um sistema com pressão de operação de 6 bar.

**Tabela II.11** - Vazão de ar perdido e potência desperdiçada com vazamentos

<b>DIÂMETRO DO FURO DE VAZAMENTO</b>	<b>ESCAPE DE AR A PRESSÃO DE 6 BAR</b>	<b>POTÊNCIA P/ SUPRIR A COMPRESSÃO PERDIDA</b>
(mm)	(m <sup>3</sup> /min)	(kW)
1	0,006	0,3
3	0,6	3,1
5	1,6	8,3
10	6,3	33,0
15	25,2	132,0

De maneira geral, os manuais de fabricantes informam que, de acordo com a idade e a conservação das linhas, pode-se ter uma orientação quanto ao percentual de vazamentos existentes de todo o ar produzido:

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

Vazamentos de até 5% podem ser tolerados. Existem, atualmente, muitos recursos para detectar vazamentos com aparelhagens específicas que utilizam os princípios do ultra-som.

Uma prática bem comum nas tubulações aparentes e de fácil acesso consiste em borrficar uma substância tenso-ativa, como a espuma de sabão, e esperar a formação de bolhas pelo ar que vaza.

### Método prático para quantificar os vazamentos de uma instalação

Será descrito a seguir um procedimento que revelará o quanto está se perdendo de ar por vazamento.

#### • Pré-requisitos

- A instalação consumidora de ar comprimido deverá estar fora de operação (os equipamentos consumidores devem estar ligados normalmente à rede, porém inoperantes).
- Caso na instalação exista mais de um compressor para alimentar a rede, dá-se preferência ao de menor porte. Todas as características do compressor devem ser conhecidas, principalmente a vazão que pode produzir.
- O manômetro instalado na rede ou no reservatório deverá estar funcionando perfeitamente e, se possível, calibrado.
- São necessários dois cronômetros.
- Utilizar os mesmos níveis de pressão que estiverem ajustados no pressostato de controle e certificar-se de que esteja funcionando perfeitamente.

#### • Procedimento de teste

- Ligar, manualmente, o compressor que será usado no teste, colocando-o em carga até que a pressão da rede atinja o valor de desarme.
- Quando ocorrer o desarme (alívio), acionar o primeiro cronômetro, deixando-o funcionar durante todo o teste.
- Assim que a pressão da linha cair e o compressor religar e entrar em regime de compressão, acionar o outro cronômetro, o qual deverá ser parado logo que novamente for atingida a pressão de desligamento.
- Esta rotina deverá ser repetida pelo menos 5 vezes, para se obter maior precisão dos resultados.
- Ao final da última repetição do teste, ambos os cronômetros devem ser desligados.

Durante o teste, o volume de ar deslocado ao longo do tempo de compressão efetiva é aproximadamente equivalente ao ar que atravessa os orifícios de vazamento durante a somatória dos tempos de compressão e alívio do compressor (é como se os vazamentos fossem um consumidor virtual).

Portanto, o volume de ar vazado multiplicado pela soma do tempo de alívio e o de compressão deve ser igual ao volume de ar comprimido durante os tempos de compressão.

$$Q_{\text{vaz}} \times T = Q_{\text{comp}} \times t$$

$$Q_{\text{vaz}} = (Q_{\text{comp}} \times t) / T$$

Em que:

- $Q_{\text{comp}}$  = capacidade nominal de produção do compressor usado no teste (m<sup>3</sup>/min);
- $T$  = tempo total (alívio + compressão) registrado no primeiro cronômetro (min);
- $Q_{\text{vaz}}$  = vazão atribuída aos vazamentos (m<sup>3</sup>/min); e
- $t$  = tempos do compressor em carga (compressão) registrado pelo segundo cronômetro.

O valor obtido para  $Q_{\text{vaz}}$  é a vazão atribuída aos vazamentos existentes, que poderá ser comparada com a capacidade de todos os compressores do sistema que operem em simultaneidade alimentando a mesma rede de ar sob análise, de forma que se possa quantificar o percentual global das perdas por vazamento (% perdas =  $Q_{\text{vaz}} / Q_{\text{global}} \times 100$ ),

$Q_{\text{global}}$  é a vazão produzida por todos os compressores que funcionam com simultaneidade no sistema.

Esse mesmo percentual poderá ser aplicado para o cálculo da energia elétrica perdida em kWh pelos motores elétricos. Calculados os consumos dos motores por medições reais e aplicando-se esse percentual à energia consumida, tem-se o valor da energia perdida pelos vazamentos.

## 2.3 - Exemplos

### Exemplo 1

Uma indústria química iniciou a implementação de um programa de prevenção de vazamentos, seguindo recomendações de uma auditoria em suas instalações de ar comprimido. O primeiro passo foi identificar os vazamentos. Os vazamentos encontrados foram agrupados de acordo com os tamanhos equivalentes aproximados dos furos: 100 vazamentos de **0,8 mm** (1/32") a **6,2 bar**, 50 vazamentos de **1,6 mm** (1/16") a **6,2 bar** e 10 vazamentos de **6,4 mm** (1/4") a **6,9 bar**. Calcule a economia anual quando estes vazamentos forem eliminados. Assumindo que a indústria opera 7.000 horas por ano, que o custo da energia elétrica seja de R\$0,15 por kWh e que a geração de ar comprimido consuma aproximadamente 6,36 kW / m<sup>3</sup>.

**Economia** = nº de vazamentos x vazão de ar (m<sup>3</sup>) x kW/m<sup>3</sup> x nº de horas x R\$/kWh

Usando os valores da vazão de escape de ar dados na Tabela II.10 pode-se determinar:

**Economia dos vazamentos de 0,8 mm** =  $100 \times 0,041 \times 6,36 \times 7.000 \times 0,15 = \text{R\$ } 27.380,00$

**Economia dos vazamentos de 1,6 mm** =  $50 \times 0,162 \times 6,36 \times 7.000 \times 0,15 = \text{R\$ } 54.092,00$

**Economia dos vazamentos de 6,4 mm** =  $10 \times 2,857 \times 6,36 \times 7.000 \times 0,15 = \text{R\$ } 190.790,00$

Total de economia anual com a eliminação dos vazamentos = R\$ 272.262,00

Verifica-se que a economia com a eliminação dos 10 vazamentos de 6,4 mm foi responsável por mais de 70% do total da economia alcançada. Quando as perdas são identificadas, é importante priorizar e consertar as maiores primeiro.

### Exemplo 2

- Casa de máquinas: dois compressores tipo parafuso atendendo, em paralelo, à mesma rede de ar comprimido (um de 75 cv e outro de 125 cv).
- Vazão de ar proporcionada pelo compressor de maior porte: 13,4 m<sup>3</sup>/min.
- Vazão de ar proporcionada pelo compressor de menor porte: 7,5 m<sup>3</sup>/min.
- Vazão máxima requerida pela instalação nos momentos de pico: 16 m<sup>3</sup>/min.
- Pressão de desarme dos compressores: 7,1 bar.
- Pressão de re-ligamento dos compressores: 6,3 bar.
- Idade da instalação: 8 anos.
- Estado de conservação: regular.
- Vazamentos audíveis em alguns pontos.

Teste realizado:

- Equipamentos consumidores: desligados.
- Compressor utilizado no teste: o de menor porte 75 cv, Q = 7,5 m<sup>3</sup>/min.
- Pressões de tese: as mesmas de re-ligamento e desligamento.
- Tempo de compressão em 6 ciclos de teste (t): 148 s = 9,9 min.
- Tempo total de alívio e compressão (T): 594 s = 9,9 min.

$$Q_{\text{vaz}} = (Q_{\text{comp}} \times t) / T = (7,5 \times 2,46) / 9,9 = 1,86 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\% \text{ perdas} = 1,86 / (13,4 + 7,5) = 8,9 \%$$

Considerando que os motores elétricos que acionam os compressores operam por 480 horas/mês e que apresentam um consumo médio global de 70 560 kWh (compressão +

alívio), tem-se que o potencial de economia de energia, se sanados os vazamentos, é de 6 280 kWh/mês.

Considerando o preço da energia elétrica em R\$ 0,20 kWh, equivaleria a R\$1.256,00/mês, ou R\$15.072,00/ano.

#### 2.4- Sugestões para identificar oportunidades na distribuição

- Inspeccione os purgadores de condensado e determine se estão operando corretamente.
- Revise o método de remoção de condensado utilizado, se possível, com a carga dos compressores durante as horas sem produção. Se estiver liberando muito ar, considere a substituição por um purgador sem perda.
- Identifique e conserte os vazamentos. Uma vez não é o suficiente. Incorpore um programa de prevenção de vazamentos nas operações de suas instalações, que deve incluir: identificação e rotulagem (colocação de etiquetas), rastreamento, reparos, verificação e envolvimento dos funcionários. Estabeleça uma meta razoável para a redução do custo efetivo com os vazamentos. De 5% a 10% da vazão total do sistema é um valor típico para instalações industriais.
- Uma vez consertados os vazamentos, reavalie o sistema de suprimento de ar comprimido. Trabalhe com um especialista em sistemas de ar comprimido para ajustar os controles dos compressores. Para maximizar a economia de energia, o tempo de operação do compressor deve ser reduzido para acompanhar a redução da demanda.

## 3

### IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NO USO FINAL DO AR COMPRIMIDO

Sugere-se que antes de atuar na geração devem-se priorizar as ações de melhorias na utilização final do ar comprimido e sua distribuição, pois os ganhos nessas áreas serão refletidos de modo ampliado na geração. Caso contrário, corre-se o risco de a geração ficar superdimensionada.

#### 3.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência no uso final do ar comprimido

De maneira geral, o desperdício de energia pode estar associado ao uso do ar comprimido quando ou onde não é necessário, ou à não utilização de práticas que permitam otimizar o

seu uso. Por exemplo, o escape de ar comprimido quando a máquina não está em operação pode ser evitado fazendo-se o intertravamento desta com o suprimento de ar.

A vazão de ar comprimido poderia ser controlada pela utilização de dispositivos especialmente concebidos para reduzir o consumo sem diminuir a eficácia de produção ou, ainda, com a colocação de válvulas solenóides no circuito de distribuição, permitindo interromper o consumo de ar comprimido logo que o processo seja paralisado, interrompendo as perdas por vazamentos no circuito. Em alguns casos a utilização de ar comprimido pode ser completamente eliminada, sendo o seu uso substituído por um processo elétrico ou mecânico.

### 3.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência no uso final do ar comprimido

O primeiro passo na análise de um sistema de ar comprimido é a determinação das necessidades de ar comprimido, definidas pela qualidade e pela quantidade do ar comprimido para atender às necessidades das aplicações de uso final. A medição cuidadosa destas necessidades e o entendimento da diferença entre a qualidade e a quantidade de ar irão assegurar que o sistema de ar comprimido esteja configurado adequadamente.

*A qualidade do ar comprimido* é determinada pelo nível necessário de secagem (redução da umidade) do ar e pelo nível de contaminantes toleráveis pelas aplicações de uso final. A qualidade do ar é um fator importante, pois dela dependerá a manutenção preventiva e corretiva tanto das redes de ar como dos consumidores e dos demais acessórios de linha.

*A quantidade do ar comprimido* – A quantidade, ou volume, de ar consumido em um sistema de ar comprimido pode ser determinada pela soma dos volumes necessários às aplicações de uso final de ar comprimido e processos operacionais (levando em conta o fator de carga) e a duração do consumo para cada uma destas aplicações. O total de ar necessário não é a soma do consumo máximo de cada ferramenta ou processo, mas a soma dos consumos médios de cada um.

*Os requisitos de pressão* - O nível mínimo de pressão de descarga do compressor requerida deve levar em conta as diferentes pressões das aplicações de ar comprimido e processos, bem como a queda de pressão nos componentes do sistema. Muito freqüente as quedas ou flutuações na pressão no uso final é mal diagnosticada quando a pressão de descarga não é suficiente. **Queda de pressão** é uma expressão usada para caracterizar a redução na pressão do ar descarregado para uso no ponto final. A queda de pressão ocorre quando o ar comprimido passa através dos sistemas de tratamento e de distribuição. A queda de pressão excessiva resultará em desempenho pobre e excessivo consumo de energia. O perfil de pressão é resultado de uma série de medições de pressões do sistema de ar

comprimido em diferentes pontos no sistema e permite a identificação dos componentes que estão causando excessiva queda de pressão.

*Requisitos da demanda de carga* - Outro fator chave para o projeto e operação adequados de um sistema de ar comprimido é a análise do perfil da carga demandada. A variação da demanda é uma das principais considerações no projeto do sistema. Instalações com grandes variações na demanda de ar necessitam de um sistema que opere eficientemente sob carga parcial. Neste caso, múltiplos compressores com controles seqüenciais fornecem uma operação mais econômica. Instalações com perfil contínuo de carga podem usar estratégias de controle simples.

### **3.2.1 - Redução de perdas pela eliminação de usos inapropriados do ar comprimido**

A geração de ar comprimido é uma das operações mais caras em uma instalação industrial. Quando usado com sabedoria, o ar comprimido pode fornecer uma fonte segura e confiável de potência para os processos industriais. Usuários devem sempre considerar o custo efetivo do ar comprimido para as tarefas requeridas e eliminar demandas improdutivas. Usos inapropriados de ar comprimido incluem qualquer aplicação que possa ser executada por outro método mais eficiente energeticamente que por ar comprimido. A tabela II.12 fornece alguns usos de ar comprimido que podem ser inapropriados e sugestões de formas alternativas de realizar estas tarefas.

**Tabela II.12** - Resumo de usos de ar comprimido que podem ser inapropriados

USOS POTENCIALMENTE INAPROPRIADOS	SUGESTÕES DE ALTERNATIVAS/AÇÕES
Limpeza, secagem, processo de resfriamento	Sopradores de baixa pressão, ventiladores elétricos, vassouras/escovas, bocais
Espalhamento / polvilhamento	Sopradores de baixa pressão e misturadores
Aspiração, atomização	Sopradores de baixa pressão
Deslocamento	Sopradores de baixa para média pressão
Geração de vácuo	Bomba de vácuo dedicada ou sistema central de vácuo
Climatização pessoal	Ventiladores Elétricos
Tubos abertos, resfriamento por vortex operado por ar comprimido sem termostato	Trocador de calor ar / ar ou ar condicionado com termostato para resfriamento
Misturador acionado por ar	Misturador acionado por motor elétrico
Bombas de diafragma operadas a ar	Regulador com controlador de velocidade adequado, bomba elétrica
Equipamentos ociosos*	Coloque uma válvula na entrada de ar e que seja controlada automaticamente
Equipamentos abandonados **	Desconectar o suprimento de ar do equipamento

\* Equipamentos que, temporariamente, não estão sendo usado durante o ciclo de produção.

\*\* Equipamentos que não estão mais em uso ou devido a alterações de processo ou porque estão defeituosos.

### 3.2.2 - Substituição de ar comprimido nas aplicações de uso final de baixa pressão

O ar comprimido é muito caro para ser produzido, pois deve ser limpo, prontamente disponível, e simples de usar. É frequentemente escolhido para aplicações nas quais outros métodos ou fontes de ar podem ser mais econômicas. Para reduzir o custo de energia com ar comprimido, métodos alternativos de suprimento de baixa pressão para uso final devem ser considerados antes de utilizar ar comprimido em tais aplicações. Muitos métodos alternativos de suprimento para usos finais de baixa pressão podem permitir que a indústria alcance maior eficiência e produtividade em seus processos produtivos (Tabela II.13).

**Tabela II.13** - Alternativas para aplicações de uso final de baixa pressão

APLICAÇÕES DE USO FINAL EM BAIXA PRESSÃO EXISTENTES	ALTERNATIVAS EM POTENCIAL	CONSIDERAÇÕES
Sopro com saída aberta, mistura (agitação)	Ventiladores, sopradores, misturadores, bocais	Aplicações de sopro aberto desperdiçam ar comprimido. Para estas aplicações, bocais de alta eficiência podem ser utilizados ou, se não é necessário alta pressão, considerar o uso de ventilador. Métodos mecânicos de misturar tipicamente usam menos energia que o ar comprimido.
Resfriamento de pessoas	Ventiladores e ar condicionado	O uso de ar comprimido para resfriamento de pessoas não somente é caro, mas também perigoso. Neste caso, devem-se utilizar ventiladores e/ou ar condicionado.
Limpeza de partes	Escovas, vassouras, bomba de vácuoventoinhas	Sopradores de baixa pressão, ventiladores elétricos, vassouras, escovas e bocais de alta eficiência para limpeza de partes são mais eficientes que o ar comprimido para efetuar tais tarefas.
Motores e bombas acionados por ar	Motores elétricos, bombas mecânicas	A tarefa realizada por um motor de ar comprimido pode normalmente ser feita com maior eficiência energética por um motor elétrico, exceto em ambientes perigosos (explosivos). As bombas mecânicas são mais eficientes que as bombas de duplo diafragma operadas a ar. Entretanto, em uma atmosfera explosiva e/ou em bombeamento abrasivo, bombas com regulagem de pressão adequada e controle de "shut off" (desligamento) o uso de ar comprimido pode ser mais apropriado.

### 3.3 - Exemplos

#### Exemplo 1

A tabela II.14 mostra exemplos de usos inapropriados de ar comprimido em uma planta industrial de uma montadora de automóveis. A planta industrial implantou as ações identificadas na tabela para eliminar ou reduzir as perdas com estes usos inapropriados.

**Tabela II.14** - Exemplos de usos inapropriados de ar comprimido

OPERAÇÃO	VAZÃO DE PICO ORIGINAL (m <sup>3</sup> /min)	NÚMERO DE HORAS	AÇÕES	VAZÃO DE PICO REVISADA (m <sup>3</sup> /min)	REDUÇÃO DA VAZÃO DE PICO (m <sup>3</sup> /min)
Sopradores de saída aberta	5,66	6.500	Instalação de bocais	1,42	4,24
Gerador de vácuo	28,32	5.000	Bomba de vácuo acionada por motor elétrico	0	28,32
Climatização-pessoal	22,66	3.500	Utilização de ventiladores	0	22,66
Atuadores pneumáticos	21,24	3.500	Substituído por atuador elétrico	0	21,24
<b>Redução Total</b>					<b>76,46</b>

Uma auditoria na planta industrial mostrou que a energia usada para gerar o ar comprimido era, em média, de 18 kW / 2,8 m<sup>3</sup>/min . O custo da energia elétrica para a planta industrial é de R\$ 0,15 por kWh.

$$\begin{aligned} \text{Economia anual} &= [\text{kW por m}^3/\text{min}] \times [\text{m}^3/\text{min economizado}] \times [\# \text{ de horas}] \times [\$ \text{ por kWh}] \\ &= 18/2,8 \times [(4,24 \times 6500) + (28,32 \times 5000) + (22,66 \times 3500) + (21,24 \times 3500)] \times \text{R}\$0,15 \\ &= \text{R}\$ 311\ 350,24 \end{aligned}$$

### 3.4 - Sugestões para identificação de oportunidades no uso final

- Identifique o uso de equipamentos de baixo consumo de ar comprimido.
- Procure orientações sobre procedimentos adequados, processos ou equipamentos alternativos que sejam capazes de realizar as mesmas aplicações do ar comprimido, porém com menor consumo de energia.
- Monte uma “sala de aula” de treinamento em otimização de sistema ou procure serviços de profissionais em sistemas de ar comprimido.
- Contrate bons profissionais para projetos eficientes ou manutenção adequada, por meio de cadastros, capacitação e certificação desses profissionais.
- Realize campanhas de caça aos vazamentos.
- Revise as aplicações de ar comprimido para determinar os níveis de pressão do ar necessários.
- Revise os usos originais do ar para determinar se o desenvolvimento dos processos de fabricação eliminou alguns pontos de consumo e não são mais necessárias ou podem ser re-configurados para se tornarem mais eficientes.
- Considere a implementação de um programa de detecção e reparos de vazamentos usando um detector ultrassônico de vazamento. Um programa efetivo de reparo de vazamentos deve incluir uma revisão das pressões e dos controles do sistema com objetivo de reduzir o consumo de energia.

Avaliando as aplicações de uso final para obter máxima eficiência

Para assegurar a eficiência das aplicações de uso final de ar comprimido, os passos apontados na tabela II.15 devem ser tomados:

**Tabela II.15** - Passos e ações para melhora eficiência

PASSOS	AÇÕES
1	Revisar os níveis de pressão requeridos pelas aplicações de uso final que devem determinar o nível de pressão do sistema. Pelo fato de freqüentemente existir uma substancial diferença no consumo de ar e nos níveis de pressão requeridos por ferramentas similares de diferentes fabricantes, levante os valores de cada fabricante para a aplicação específica. Não confundir pressão máxima permitida com pressão requerida.
2	Monitorar a pressão do ar na entrada das ferramentas. O dimensionamento inadequado das mangueiras, adaptadores e engates rápidos freqüentemente resulta em grande queda de pressão. A pressão reduzida na entrada de uma ferramenta reduz o seu desempenho e, em alguns casos, pode requerer ferramentas maiores para a velocidade e torque específico.
3	Evitar operação de qualquer ferramenta com “velocidade livre” sem carga. A operação de uma ferramenta desta forma irá desperdiçar ar sem ocorrer trabalho útil.
4	Inspeção a situação de cada uso final. Uma ferramenta desgastada normalmente requer alta pressão, consumo excessivo de ar comprimido e pode afetar outras operações nas proximidades.
5	Ferramentas a ar devem ser lubrificadas como especificado pelo fabricante. O ar fornecido para todo uso final deve estar livre de condensado, para maximizar a vida das ferramentas e sua eficácia.
6	Aplicações de uso final com requerimentos de similares de pressão e qualidade de ar devem ser agrupadas, permitindo minimizar as tubulações, tratamento de ar e controles.
7	Avaliar e, se possível, reduzir os requerimentos de altas pressões nos pontos de uso final. Em seguida ajustar a pressão do sistema.
8	Investigar e substituir aplicações de uso final ineficientes como as de sopramento aberto por aqueles mais eficientes tais como o bocal vortex.

## 4

## ASPECTOS ECONÔMICOS

## 4.1- Benchmarking para o custo de ar comprimido

Benchmarking é a prática de determinar parâmetros-chaves de operação de um sistema para fornecer pontos de comparação, constituindo-se em uma valiosa ferramenta de rastreamento do desempenho do sistema, de identificação de problemas e de determinação da eficácia de alterações implementadas no sistema. Alguns índices de referência práticos são: **consumo específico do compressor, custo unitário do ar comprimido e necessidade de ar comprimido do produto final.**

Os índices de referência podem ser usados para comparar uma instalação com um sistema teórico para determinar o desempenho máximo atingível (eficiência clássica). Os índices de referência também são usados para comparar a operação atual com o histórico das operações passadas. Isto pode identificar as falhas potenciais dentro do sistema, bem como identificar oportunidades de melhorias da eficiência. Outro uso comum dos índices de referência é na comparação de instalações similares.

## 4.2 - Determinação do custo do ar comprimido para suas instalações

Muitas instalações industriais necessitam, de alguma forma, de ar comprimido, seja para acionar uma simples ferramenta a ar ou para a realização de tarefas mais complicadas, como a operação e controle pneumático. Uma pesquisa recente do Departamento de Energia dos EUA mostrou que em uma instalação industrial típica aproximadamente 10% da energia elétrica consumida é para a geração de ar comprimido. Para algumas instalações a geração de ar comprimido pode atingir 30% ou mais da eletricidade consumida. Ar comprimido é uma utilidade industrial gerada na própria indústria. Muito freqüentemente o custo de geração não é conhecido. Algumas companhias nos EUA usam valores de 6,40 a 10,60 dólares por 1000 m<sup>3</sup> de ar.

Ar comprimido é uma das formas de energia mais caras em uma planta industrial. A eficiência global de um sistema típico de ar comprimido pode ser tão baixa quanto 10% a 15%. Por exemplo, um compressor consome aproximadamente 7 a 8 kW para produzir 1 kW de ar comprimido. Para calcular o custo do ar comprimido produzido, usa-se a fórmula:

$$\text{Custo (\$)} = \frac{(\text{pcv}) \times (0,735) \times (\text{n}^\circ \text{ de horas}) \times (\$/\text{kWh}) \times (\% \text{ tempo}) \times (\% \text{ pcv} - \text{carga plena})}{\text{Eficiência do Motor}}$$

em que:

**pcv** - potência (cv) do motor com carga plena (normalmente maior que a potência indicada na placa do motor);

**0,735** - conversão entre cv e kW;

**% tempo** – percentual do tempo trabalhando neste nível de operação;

**% pcv - plena carga** - percentual do tempo a plena carga neste nível de operação; e

**Eficiência do Motor** - Eficiência do Motor neste nível de operação.

### Exemplo

Uma instalação típica de uma fábrica tem um compressor de 200 cv (o qual requer 215 pcv) operando 6800 horas por ano. O compressor opera a plena carga 85% do tempo (eficiência do motor = 95%) e opera em vazio o restante do tempo (25% pcv - carga plena e eficiência do motor = 90%). O custo da energia elétrica é de R\$0,15/kWh.

Custos quando totalmente operando carregado

$$\text{Custo (\$)} = \frac{(215\text{cv}) \times (0,735) \times (6800\text{h}) \times (\text{R}\$0,15/\text{kWh}) \times (0,85) \times (1,0)}{0,95} = \text{R}\$144217,00$$

Custos quando operando vazio

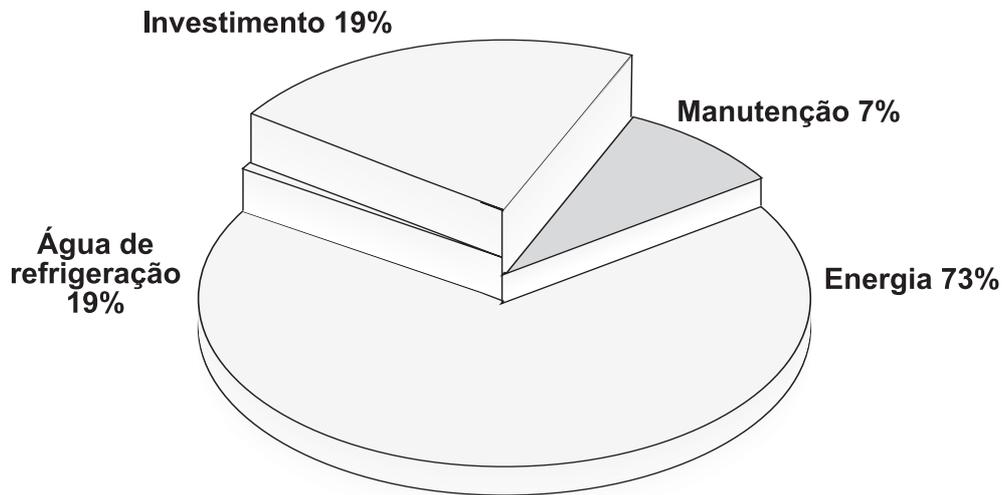
$$\text{Custo (\$)} = \frac{(215\text{cv}) \times (0,735) \times (6800\text{h}) \times (\text{R}\$0,15/\text{kWh}) \times (0,15) \times (0,25)}{0,90} = \text{R}\$6716,00$$

**Custo anual** = R\$ 144 217,00 + R\$ 6 716,00 = **R\$ 150 933,00**

### Perspectiva de custos durante a vida útil de 10 anos para um sistema de ar comprimido

Os custos da energia são os principais fatores de economia. Um estudo profundo dos custos da instalação deverá mostrar os caminhos da otimização. A figura II.8 mostra os percentuais dos custos envolvidos num sistema de ar comprimido.

As maiores despesas recaem no consumo da energia. A escolha de um sistema de regulação e controle de operação eficiente, do tipo do compressor, e do dimensionamento para atender à demanda vai influenciar bastante nos custos finais dos produtos.



**Figura II.8** - Custos de uma instalação de ar comprimido

### Sugestões

- Determine o custo do ar comprimido para as suas instalações pelo monitoramento periódico das horas de operação do compressor e do ciclo de trabalho com carga.
- Use a abordagem sistêmica enquanto operar e realizar manutenção no sistema de ar comprimido.

Adote uma política abrangendo toda a instalação de ar comprimido para cortar custos e reduzir desperdícios pela eliminação de usos inapropriados, reparo rápido de vazamentos e casamento do sistema de suprimento com a demanda.

### Custo do ar comprimido

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

### Custo anual do compressor trabalhando em carga

A parcela do custo anual de geração de ar comprimido, devido ao compressor trabalhando em carga, é fornecida pela equação:

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

em que:

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

#### Custo anual do compressor trabalhando em vazio

A parcela do custo anual de geração de ar comprimido, devido ao compressor trabalhando em vazio, é fornecida pela equação:

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

em que:

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

#### Custo anual de geração de ar comprimido

Com a soma dos valores obtidos por meio das fórmulas acima, chega-se ao custo anual de geração do ar comprimido:

$$C_{aa} = C_{ac} + C_{av}$$

Em que:

$C_{aa}$	custo anual de geração do ar comprimido	R\$ / ano
----------	---	-----------

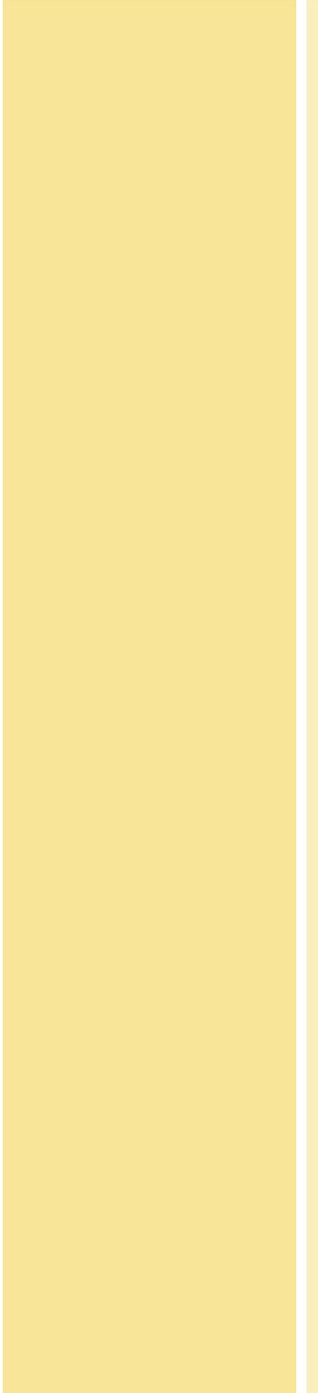
### Custo específico do ar comprimido

Com o custo anual de geração de ar comprimido, calcula-se o custo específico do mesmo:

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

em que:

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



PARTE III  
**FONTES DE CONSULTA**



## PARTE III - FONTES DE CONSULTA

## 1

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL/ANP. Eficiência Energética: Integrando Usos e Reduzindo Desperdícios, Brasília, 432p, 1999.

ATLAS COPCO. **Compressed air engineering**. Suécia: Atlas Copco Literature Department, 1971. 1 volume, 360 páginas.

CAMELO CAVALCANTI, E.S.; SOARES, G-A- ;CAPELLA, P-S-; OLIVEIRA, T-D- Diagnóstico Energético no Sistema de Ar Comprimido da Fábrica da Mercedes-Benz de São Bernardo do Campo (SP), Relatório Técnico CEPEL- ADG/A-DUE-539/00, CEPEL, 47p, 2000.

Compressed air manual, 6<sup>th</sup> edition, ATLAS COPCO COMPRESSOR AB, ISBN 91-630-7342-0, Sweden.

Compressed air systems in the European Union (3), Energy emissions, Savings potencial and policy actions, Peter Raddgen and Edgard Blaustein, 161, ISBN 3-932298-16-0, or as PDF document.

Compressed air systems, A guidebook on energy and cost savings, E.M. Talbott, 260, ISBN 0-13-175852-7.

COSTA, E. C. **Compressores**. 1<sup>a</sup> Edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1988 . 1 volume, 368 páginas

EDWARDS, P. Coinpressed Air Systems Energy Reduction Basics. Ingersoll-Rand Company, Davidson, NC (EUA), March 1998.

HORTA, F. J. N. Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido; Eletrobrás/Procel, 2004.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE **Applications of Ac Adjustable Speed Drives**. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1991. 1 volume, 50 páginas.

GIRAU, E. Ahorro de Energia Eléctrica en Sistemas de Ar Comprimido. Electrical Energy Efficiency in Latin American Industry, Junho 1997.

GOLDEMBERG, J. Economia de Energia no Setor Industrial: Série Estudos e Documentos, Companhia de Promoção de Pesquisa Científica e Tecnológica do Est, de São Paulo, São Paulo, 27p., 1981.

HAHN, A, **Programa de Eficientização Industrial - Compressores**. Rio de Janeiro: Eletrobrás / PROCEL, 2003. 1 volume, 88 páginas.

Industrial Pneumatic Technology, Bulletin o275-B1, Parker Training, 151, ISBN 1-55769-015-4.

Lawrence Berkeley National Laboratory. Improving Compressed Air System Performance: A Source-book for Industry, Revision 0, DOE – Motor Challenge and the Compressed Air Challenge Programs, Washington (D.C.) (EUA), Abril 1998.

LOWEN, K. e WILLOVER, L. Maximizing Your Compressed Air Utility Through Microprocessor Control Systems, Air Compressor Group, Ingersoll-Rand Company. 1996.

MACINTYRE A.J, **Instalações hidráulicas prediais e industriais**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Guanabara SA, 1988. 1 volume, 798 páginas.

MALLORY, M. Understanding Your Compressed Air System is Important to Managing it Well, Energy Matters, Maio/Junho, p. 4, 2000.

Manual de Ar Comprimido e Gases – Compressed Air and Gas Institute; John P. Rollins; Prentice Hall, 2004.

MARQUES, M.; HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S. (coordenadores) **Conservação De Energia**. 1ª Edição. Itajubá: Editora da EFEL, 2001. 1 volume, 467 páginas.

NADEL, S.; SHEPARD, M. et al. **ENERGY-EFFICIENT MOTOR SYSTEMS: A Handbook on Technology, Programs and Policy Opportunities**. USA: ACE3, [2000].

New Compressed Air and Gas Data, INGERSOLL - RAND, USA, New York, 1970.

PACT Collections of CA - audit documents (an electronic survey) vide links.

Pneumatic Handbook. Principles of Pneumatics-Pneumatic Technical Data, 5<sup>th</sup> edition, Trade and Technical Press Ltd., London.

Pneumatik-Anwendungen (Pneumatic Applications), Kosten mit pneumatik, Kurt Stoll, 335, ISBN 3-8023-1802-1.

RISI, J-D- Energy Savings With Coinpressed Air, Energy Engineering; 92 (6): 49-58 (1995).

RODRIGUES, P.S.B. **Compressores industriais**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: EDC – Ed. Didática e Científica, 1991. 1 volume, 515 páginas.

SHOEPS, C-A- & ROUSSO, J. Conservação de Energia Elétrica na Indústria, 3a. edição, Rio de Janeiro, CNI, DAMPI, ELETROBRÁS/PROCEL, 92p.

SPIRAX SARCO, **Manual de produtos para seu sistema de ar comprimido**. 1ª Edição. São Paulo: 1996. 1 volume, 120 páginas.

STREETER, V.L, WYLIE, E.B, **Mecânica dos fluidos**. 7ª Edição. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1988. 1 volume, 583 páginas.

TALBOT, E-M- Compressed Air Systems: a Guidebook on Energy and Cost Savings, Ed. Prentice Hall, Nova York, 260 p., 1992.

US-DEPARTMENT OF ENERGY. Industrial Compressed Air System Energy Efficiency Guidebook. Carroll, Hatch and Associates, Inc., Portland, EUA. 1993. 98p. Sponsored by USDOE, Washington, DC (United States). DOE Contract AC79-908P03940.

VAN WYLEN, J.G., SONNTAG, R.E. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 2ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1991 . 1 volume, 565 páginas.

WILSON, R-E- Data Logging a Plant Coinpressed Air Systein, Energy Matters, (5),:5- 9, 1999.

## 2

### LINKS ÚTEIS

<http://www.atlascopco.com.br>

<http://www.barionkar.com.br>

<http://www.chicagopneumatic.com.br>

<http://www.drucklufttechnik.de>

<http://www.eere.energy.gov>

<http://www.eniplan.com.br>

<http://www.festo.com.br>

<http://www.gardnerdenver.com>

<http://www.hitachi.com.br>

<http://www.ingersoll-rand.com.br>

<http://www.knowpressure.org>

<http://www.leybold.com>

<http://www.nash.com.br>

<http://www.oit.doe.gov/bestpractices/>

<http://www.omel.com.br>

<http://www.pactapplied.com>

<http://www.schulz.com.br/compressores>

<http://www.spiraxsarco.com.br>

<http://www.sulzer.com.br>

## 3

### ÓRGÃOS E INSTITUIÇÕES

Eletróbrás / Procel

Universidades

Instituto Nacional de Eficiência Energética - INEE

Associação Brasileira de Empresas de Conservação de Energia - ABESCO

SENAI

