

ATLAS COPCO

MANUAL DO

AR COMPRIMIDO

9^a Edição

Atlas Copco

Este manual é publicado por:

Atlas Copco Airpower NV

Boomsesteenweg 957

B-2610 Wilrijk

Bélgica

A reprodução do conteúdo desta publicação, total ou parcial, é proibida de acordo com leis de direitos autorais sem a permissão prévia por escrito da Atlas Copco Airpower NV. Isso se aplica a qualquer forma de reprodução por meio de impressão, duplicação, fotocópia, gravação, etc.

Durante a produção deste material, agradecemos o recebimento de fotos e contribuições de nossos clientes e fornecedores, e gostaríamos de citar de modo especial: ABB, Siemens, Vattenfall e AGA.

Atlas Copco Airpower NV

ISBN: 9789081535809 ©

Atlas Copco Airpower NV, Bélgica, 2015

BEM VINDOS!

Bem-vindo ao universo do ar comprimido! Este manual oferece uma orientação abrangente para quem está ansioso para explorar e obter mais informações sobre a tecnologia do ar comprimido. Seja você uma pessoa de negócios, especialista em fabricação, cientista, estudante universitário ou consultor técnico, acreditamos que o conhecimento coletado no manual será muito útil para você. O manual do ar comprimido é único e tem sido amplamente utilizado e apreciado por muitos milhares de leitores interessados ao longo dos anos. Temos agora o orgulho de apresentar a nona edição do manual, várias décadas após a introdução do primeiro manual.

Muitas informações deste manual foram reunidas em todo o mundo e ao longo de muitos anos por vários dos principais engenheiros de tecnologia de ar comprimido da Atlas Copco. Ao compartilhar o conhecimento deles com você, queremos garantir que os ganhos de eficiência possam ser realizados mais rapidamente e melhor em todos os setores que dependem de ar comprimido.

Como todos sabemos, sempre haverá espaço para novas melhorias técnicas e melhores maneiras de fazer as coisas. Nossa missão na Atlas Copco é oferecer continuamente produtividade sustentável superior por meio de soluções de ar comprimido mais seguras, limpas e com maior eficiência de energia. Para isso, dependemos da voz de nossos clientes. Somos muito gratos por quaisquer sugestões ou comentários que você possa ter, o que pode ajudar a tornar este manual ainda mais completo.

*Desejo a você leituras interessantes e
muito sucesso com as suas aplicações de ar comprimido.*

<https://www.atlascopco.com/en-uk/compressors/wiki>

Nico Delvaux
President of Compressor Technique
Atlas Copco

Agradecemos o seu feedback
compressedair@be.atlascopco.com

1 TEORIA

1.1 FÍSICA

- 1.1.1 A estrutura da matéria
- 1.1.2 A molécula e os diferentes estados da matéria

10	1.6.5.4 Classes de proteção	27
10	1.6.5.5 Métodos de resfriamento	27
10	1.6.5.6 Método de instalação	28
10	1.6.5.7 Conexões estrela (Y) e triângulo (Δ)	28
10	1.6.5.8 Torque	29

1.2 UNIDADES FÍSICAS

- 1.2.1 Pressão
- 1.2.2 Temperatura
- 1.2.3 Capacidade térmica
- 1.2.4 Trabalho
- 1.2.5 Potência
- 1.2.6 Vazão volumétrica

11	2 COMPRESSORES E EQUIPAMENTOS AUXILIARES	
----	---	--

1.3 TERMODINÂMICA

- 1.3.1 Princípios fundamentais
- 1.3.2 Leis dos gases
- 1.3.3 Transferência de calor
- 1.3.4 Mudanças de estado
 - 1.3.4.1 Processo isocórico
 - 1.3.4.2 Processo isobárico
 - 1.3.4.3 Processo isotérmico
 - 1.3.4.4 Processo isentrópico
 - 1.3.4.5 Processo politrópico
- 1.3.5 Fluxo de gás através de um bocal
- 1.3.6 Fluxo através de tubos
- 1.3.7 Estrangulamento de fluxo

13	2.1 COMPRESSORES DE DESLOCAMENTO	32
13	2.1.1 Compressores de deslocamento	32
14	2.1.2 Compressores de pistão	32
14	2.1.3 Compressores de pistão isentos de óleo	32
13	2.1.4 Compressores de diafragma	34
13	2.1.5 Compressores de parafuso duplo	34
16	2.1.5.1 Compressores de parafuso isento de óleo	34
16	2.1.5.2 Compressores de parafuso com injeção de líquido	37
17	2.1.6 Compressores de vírgula	37
17	2.1.7 Compressores Scroll	38
17	2.1.8 Compressores de palhetas	40
17	2.1.9 Sopradores Roots	40
18	2.2 COMPRESSORES DINÂMICOS	41
18	2.3.1 Compressores dinâmicos em geral	43
18	2.3.2 Compressores centrífugos	43
18	2.3.3 Compressores axiais	43

1.4 AR

- 1.4.1 Ar de modo geral
- 1.4.2 Ar úmido

19	2.3 OUTROS COMPRESSORES	43
19	2.3.1 Bombas de vácuo	43
19	2.3.2 Compressores Booster	43
20	2.3.3 Intensificadores de pressão	44

1.5 TIPOS DE COMPRESSORES

- 1.5.1 Dois princípios básicos
- 1.5.2 Compressores de deslocamento positivo
- 1.5.3 Diagrama para compressores de deslocamento
- 1.5.4 Compressores dinâmicos
- 1.5.5 Compressão em vários estágios
- 1.5.6 Comparação: turbocompressores e os de deslocamento positivo

20	2.4 TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO	44
20	2.4.1 Secagem de ar comprimido	44
22	2.4.1.1 Resfriador posterior	45
23	2.4.1.2 Secador por refrigeração	46
23	2.4.1.3 Sobrecompressão	47
23	2.4.1.4 Secador por absorção	47
23	2.4.1.5 Secador por adsorção	47
23	2.4.1.6 Secadores de membrana	50
24	2.4.2 Filtros	50

1.6 ELETRICIDADE

- 1.6.1 Terminologia básica e definições
- 1.6.2 Lei de Ohm para corrente alternada
- 1.6.3 Sistema trifásico
- 1.6.4 Potência
- 1.6.5 O motor elétrico
 - 1.6.5.1 Velocidade de rotação
 - 1.6.5.2 Eficiência
 - 1.6.5.3 Classe de isolamento

24	2.SISTEMAS DE CONTROLE E REGULAGEM	52
24	2.5.1 Regulagem em geral	52
25	2.5.2 Princípios de regulagem para compressores de deslocamento	53
25	2.5.2.1 Alívio de pressão	53
27	2.5.2.2 Bypass	54
27	2.5.2.3 Estrangulando a entrada	54
27	2.5.2.4 Alívio de pressão com estrangulamento	54

na entrada	54	3.2 TRATAMENTO DE AR	72
2.5.2.5 Partida/parada	54	3.2.1 Geral	72
2.5.2.6 Regulagem da velocidade	54	3.2.2 Vapor de água no ar comprimido	72
2.5.2.7 Porta de descarga variável	55	3.2.3 Óleo no ar comprimido	73
2.5.2.8 Alívio na válvula de sucção	55	3.2.4 Microrganismos no ar comprimido	74
2.5.2.9 Carga-alívio-parada	55	3.2.5 Filtros	74
2.5.3 Princípios de regulagem para compressores dinâmicos	56	3.2.6 Resfrador posterior	75
2.5.3.1 Regulagem na entrada	56	3.2.7 Separador de água	75
2.5.3.2 Regulagem de saída	56	3.2.8 Separação de óleo/água	75
2.5.3.3 Carga-alívio-parada	56	3.2.9 Ar medicinal	76
2.5.3.4 Regulagem de velocidade	56		
2.5.4 Controle e monitoramento	57	3.3 SISTEMA DE RESFRIAMENTO	77
2.5.4.1 Geral	57	3.3.1 Compressores resfriados a água	77
2.5.4.2 Carga-alívio-parada	57	3.3.1.1 Geral	77
2.5.4.3 Controle de velocidade	58	3.3.1.2 Sistema aberto sem água de circulação	77
2.5.5 Monitoramento de dados	58	3.3.1.3 Sistema aberto com água de circulação	77
2.5.5.1 Medição de temperatura	58	3.3.1.4 Sistema fechado	78
2.5.5.2 Medição de pressão	58	3.3.2 Compressores resfriados a ar	78
2.5.5.3 Monitoramento	59		
2.5.6 Sistema de controle abrangente	60	3.4 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA	79
2.5.6.1 Seletor de sequência de partida	60	3.4.1 Geral	79
2.5.7 Controle central	61	3.4.2 Cálculo do potencial de recuperação	81
2.5.8 Monitoramento remoto	61	3.4.3 Métodos de recuperação	82
		3.4.3.1 Geral	82
		3.4.3.2 Sistema resfriado a ar	82
		3.4.3.3 Sistema resfriado a água	82
2.6 COMPRESSORES MÓVEIS	63	3.5 A SALA DE COMPRESSORES	84
2.6.1 Geral	63	3.5.1 Geral	84
2.6.2 Nível de ruído e emissões de escape	63	3.5.2 Posicionamento e projeto	85
2.6.3 Flexibilidade operacional	64	3.5.3 Fundação	85
		3.5.4 Entrada de ar	85
		3.5.5 Ventilação da sala de compressores	86
		3.5.6 Segurança do reservatório de ar	89
3 DIMENSIONAMENTO E MANUTENÇÃO DE INSTALAÇÃO DE COMPRESSORES		3.6 DISTRIBUIÇÃO DO AR COMPRIMIDO	90
3.1 DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES PARA COMPRESSORES	66	3.6.1 Geral	90
3.1.1 Geral	66	3.6.1.1 Reservatório de ar	90
3.1.1.1 Cálculo da pressão de trabalho	66	3.6.2 Projeto da rede de ar comprimido	91
3.1.1.2 Cálculo da necessidade de ar	67	3.6.3 Dimensionamento da rede de ar comprimido	91
3.1.1.3 Medição da necessidade de ar	68	3.6.4 Medição de vazão	94
3.1.2 Centralização ou descentralização	69		
3.1.2.1 Geral	69	3.7 INSTALAÇÃO ELÉTRICA	95
3.1.2.2 Instalação centralizada do compressor	69	3.7.1 Geral	95
3.1.2.3 Instalação descentralizada do compressor	69	3.7.2 Motores	95
		3.7.3 Métodos de partida	95
		3.7.4 Tensão de controle	96
3.1.3 Dimensionamento em altitude elevada	69	3.7.5 Proteção contra curto-circuito	96
3.1.3.1 Geral	69	3.7.6 Cabos	96
3.1.3.2 O efeito em um compressor	70	3.7.7 Compensação de fase	97
3.1.3.3 Fonte de alimentação	71		
3.1.3.3.1 Dimensionamento de motores elétricos	71		
3.1.3.3.2 Dimensionamento de motores de combustão interna (CI)	71		

3.8 SOM	97	5.3.3 Dimensionando o volume do reservatório de ar	118
3.8.1 Geral	97	5.3.4 Dimensionando o secador	118
3.8.2 Absorção	98	5.3.5 Resumo para prosseguir o cálculo	119
3.8.3 Constante da Sala	98	5.3.6 Verificando os cálculos	119
3.8.4 Reverberação	98		
3.8.5 Relação entre o nível de potência sonora e o nível de pressão sonora	99		
3.8.6 Mediçãoes do som	99	5.4 DIMENSIONAMENTOS ADICIONAIS	120
3.8.7 Interação de várias fontes sonoras	100	5.4.1 Cálculo da quantidade de condensados	120
3.8.8 Redução do som	100	5.4.2 Ventilação requerida na sala do compressor	120
3.8.9 Ruído dentro da instalação do compressor	101		
4 ECONOMIA		5.5 CASO ESPECIAL: GRANDE ALTITUDE	121
4.1 CUSTO	104	5.6 CASO ESPECIAL: VAZÃO INTERMITENTE	122
4.1.1 Custo de produção do ar comprimido	104		
4.1.1.1 Geral	104		
4.1.1.2 Alocação de custos	105		
4.2 OPORTUNIDADES DE ECONOMIA	105	5.7 CASO ESPECIAL: RECUPERADOR DE ENERGIA DE ÁGUA DE APLICAÇÃO	123
4.2.1 Potência requerida	105	5.7.1 Pressupostos	123
4.2.2 Pressão de trabalho	105	5.7.2 Cálculo da vazão de água no circuito de recuperação de energia	124
4.2.3 Consumo de ar	106	5.7.3 Balanço de energia no trocador de calor de recuperação	124
4.2.4 Método de regulagem	107	5.7.4 Resumo	124
4.2.5 Qualidade do ar	108		
4.2.6 Recuperação de energia	109		
4.2.7 Manutenção	110	5.8 CASO ESPECIAL: PERDA DE CARGA NA TUBULAÇÃO	125
4.2.7.1 Planejamento de manutenção	110		
4.2.7.2 Equipamento auxiliar	111		
4.3 CUSTO DO CICLO DE VIDA	111	6 ANEXOS	
4.3.1 Geral	111	6.1 O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)	128
4.3.2 Cálculo do custo do ciclo de vida – LCC	112	6.2 SÍMBOLOS EM DESENHOS	130
5 EXEMPLO DE CÁLCULO		6.3 DIAGRAMAS E TABELAS	132
5.1 EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES DE AR COMPRIMIDO	116	6.4 COMPILAÇÃO DE NORMAS E REGULAMENTOS APLICÁVEIS	137
5.2 DADOS DE ENTRADA	116	6.4.1 Geral	137
5.2.1 Requisito de ar comprimido	116	6.4.2 Normas	137
5.2.2 Condições ambientais para o dimensionamento	116	6.4.3 Compilação	137
5.2.3 Especificações adicionais	116	6.4.3.1 Segurança de máquinas	137
5.3 SELEÇÃO DE COMPONENTES	117	6.4.3.2 Segurança em equipamentos sob pressão	137
5.3.1 Dimensionando o compressor	117	6.4.3.3 Meio ambiente	138
5.3.2 Seleção final do compressor	118	6.4.3.4 Segurança elétrica	138
		6.4.3.5 Dispositivos médicos – geral	138
		6.4.3.6 Padronização	138
		6.4.3.7 Especificações e testes	138



CAPÍTULO 1

TEORIA



CAPÍTULO 2

COMPRESSORES E

EQUIPAMENTOS AUXILIARES



CAPÍTULO 3

DIMENSIONAMENTO E

MANUTENÇÃO DE INSTALAÇÕES

DE COMPRESSORES



CAPÍTULO 4

ECONOMIA



CAPÍTULO 5

EXEMPLO DE CÁLCULO

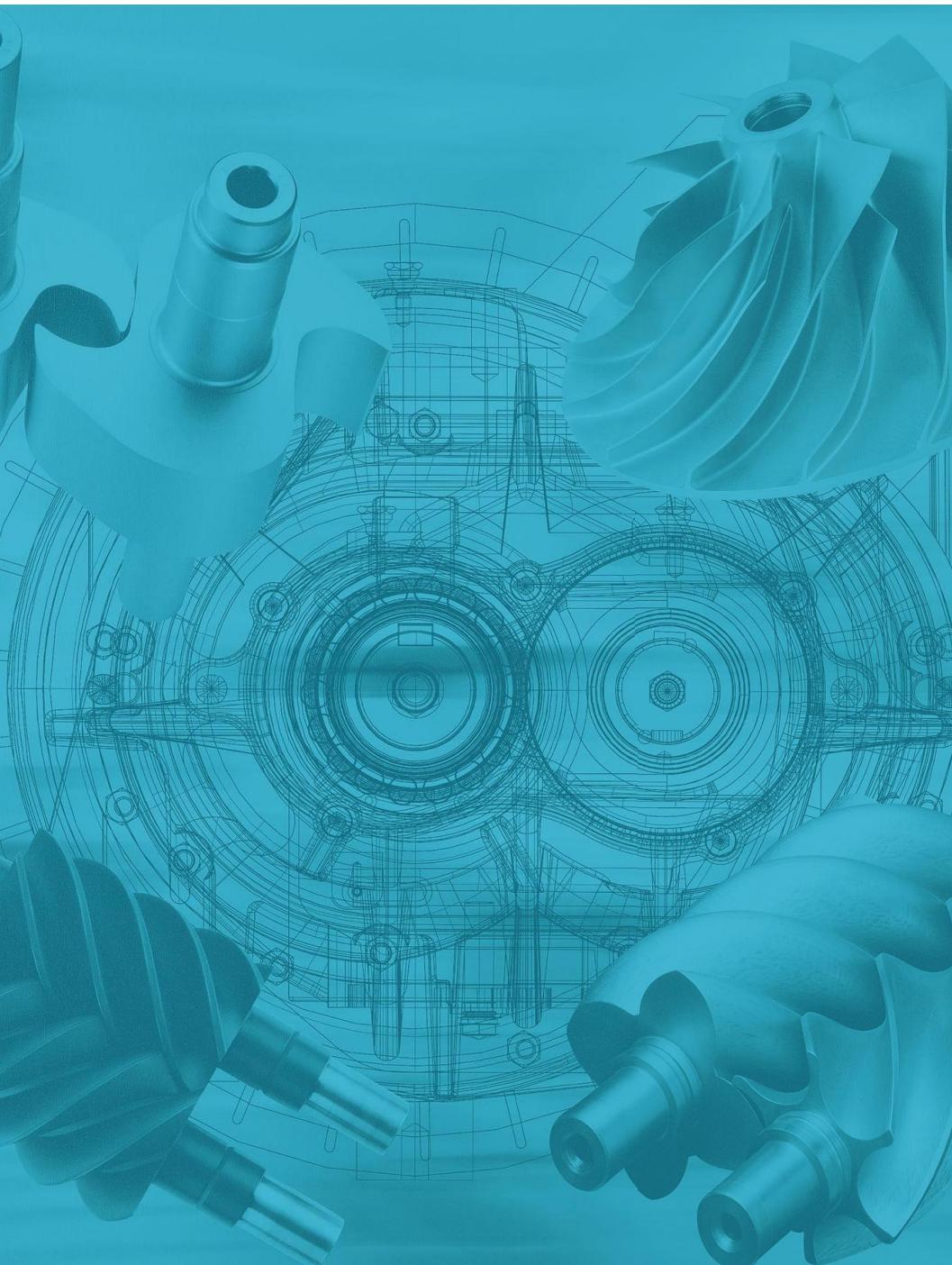


CAPÍTULO 6

APÊNDICES

1

TEORIA

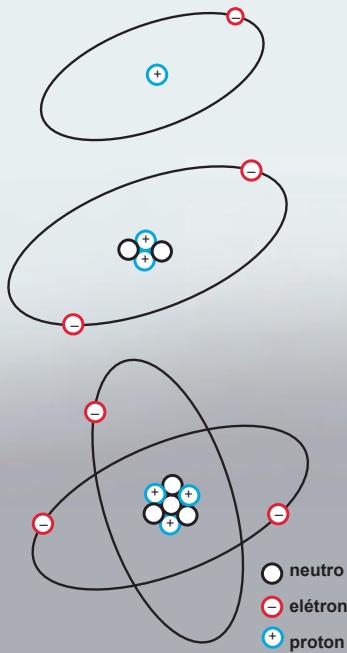


1.1 FÍSICA

1.1.1 A estrutura da matéria

Toda a matéria, seja na forma gasosa, líquida ou sólida, é composta de átomos. Os átomos são, portanto, os elementos básicos da matéria, embora quase sempre aparecem como parte de uma molécula. Uma molécula é um número de átomos agrupados com outros átomos do mesmo ou de um tipo diferente. Os átomos consistem em um núcleo denso composto de prótons e nêutrons cercados por um número pequeno de elétrons leves e de giro rápido. Outros blocos construtivos existem; no entanto, eles não são estáveis. Todas essas partículas são caracterizadas por quatro propriedades: sua carga elétrica, sua massa de repouso, seu momento mecânico e seu momento magnético. O número de prótons no núcleo é igual ao número atômico do átomo. O número total de prótons e de nêutrons são aproximadamente iguais a massa total do átomo, pois os elétrons quase não acrescentam

1:1



A camada de elétrons confere aos elementos as suas propriedades químicas. O hidrogênio (acima) possui um elétron em uma camada de elétrons. O hélio (meio) possui dois elétrons em uma camada de elétrons. O lítio (abaixo) possui um terceiro elétron numa segunda camada de elétrons.

massa. Esta informação pode ser encontrada na tabela periódica. A camada de elétrons contém o mesmo número de elétrons que o de prótons no núcleo. Isso significa que um átomo é geralmente eletricamente neutro.

O físico dinamarquês Niels Bohr introduziu um modelo de construção de um átomo em 1913. Ele demonstrou que os átomos só podem ocorrer no chamado estado estacionário e com uma energia determinada. E se o átomo se transforma de um estado de energia para outro, um quantum de radiação é emitido. Isto é conhecido como um fóton.

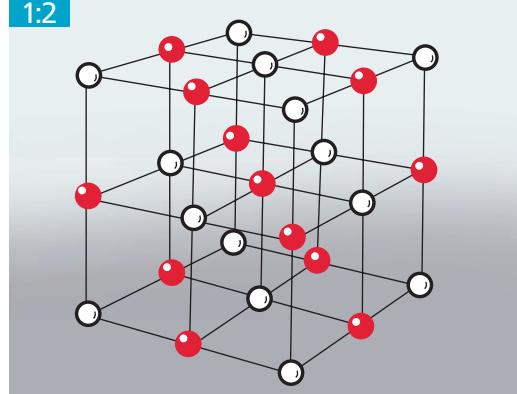
Essas diferentes transições se manifestam na forma de luz com diferentes comprimentos de onda. Em um espectrógrafo, elas aparecem como linhas no espectro de linhas do átomo.

1.1.2 A molécula e os diferentes estados da matéria

Os átomos mantidos juntos por ligação química são chamados de moléculas. Estas são tão pequenas que 1 mm³ de ar a pressão atmosférica contém aprox. $2,55 \times 10^{16}$ moléculas.

Em princípio, toda a matéria pode existir em quatro diferentes estados: o estado sólido, o estado líquido, o estado gasoso e o estado do plasma. No estado sólido, as moléculas são compactadas firmemente em uma estrutura de treliça com forte ligação. Em temperaturas acima do zero absoluto, ocorre algum grau de movimento molecular. No estado sólido, isso corresponde a uma vibração em uma posição equilibrada, que se torna mais rápida com o aumento da temperatura.

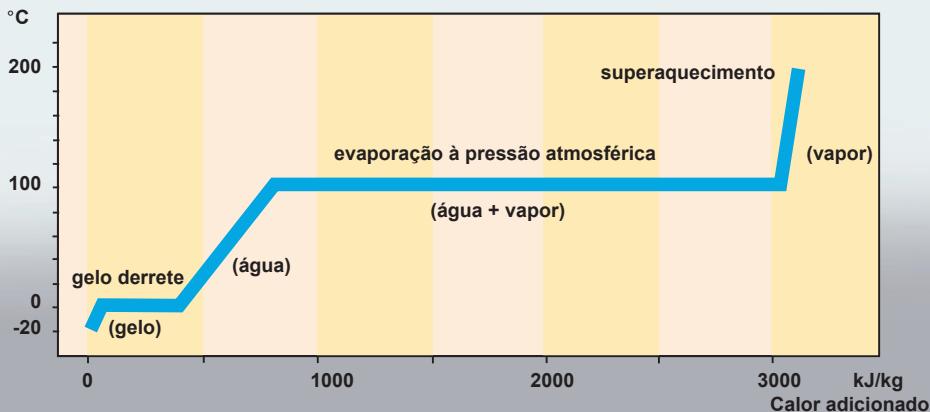
1:2



Um cristal de sal, como o sal de mesa comum (NaCl), possui uma estrutura cúbica. As linhas representam a ligação entre os átomos de sódio (vermelho) e cloro (branco).

1:3

Temperatura



Ao aplicar ou remover a energia térmica, o estado físico de uma substância muda. Essa curva ilustra o efeito para a água pura.

Quando uma substância em estado sólido é aquecida, de tal forma que o movimento das moléculas não pode ser retido pelo padrão rígido da rede, elas se soltam, a substância derrete e é transformada em líquido. Se o líquido é aquecido ainda mais, a ligação das moléculas é totalmente quebrada e a substância líquida é transformada em um estado gasoso, que se expande em todas as direções e se mistura com os outros gases da sala. Quando as moléculas de gás são resfriadas, elas perdem velocidade e se ligam novamente para produzir a condensação. No entanto, se as moléculas do gás são aquecidas ainda mais, elas são decompostas em subpartículas individuais e formam um plasma de elétrons e núcleos atômicos.

1.2 UNIDADES FÍSICAS

1.2.1 Pressão

A força em uma área de um centímetro quadrado numa coluna de ar, que vai do nível do mar até a borda da atmosfera, é de cerca de 10,13 N. Portanto, a pressão atmosférica absoluta no nível do mar é de aprox. $10,13 \times 10^4$ N por metro quadrado, o que é igual a $10,13 \times 10^4$ Pa (Pascal, a unidade SI para pressão).

Expressa em outra unidade que é usada com frequência:

1 bar = 1×10^5 Pa. Quanto mais alto você estiver acima (ou abaixo) do nível do mar, menor (ou mais alta) será a pressão atmosférica.

1.2.2 Temperatura

A temperatura de um gás é mais difícil de definir claramente. Temperatura é uma medida da energia cinética das moléculas. As moléculas se movem mais rapidamente quanto mais alta for a temperatura, e o movimento cessa completamente a temperatura do zero absoluto. A escala Kelvin (K) tem como base esse fenômeno, mas a temperatura é graduada da mesma maneira com a escala centígrada ou Celsius (C):

$$T = t + 273,2$$

T = temperatura absoluta [K]

t = temperatura em graus centígrados [C]

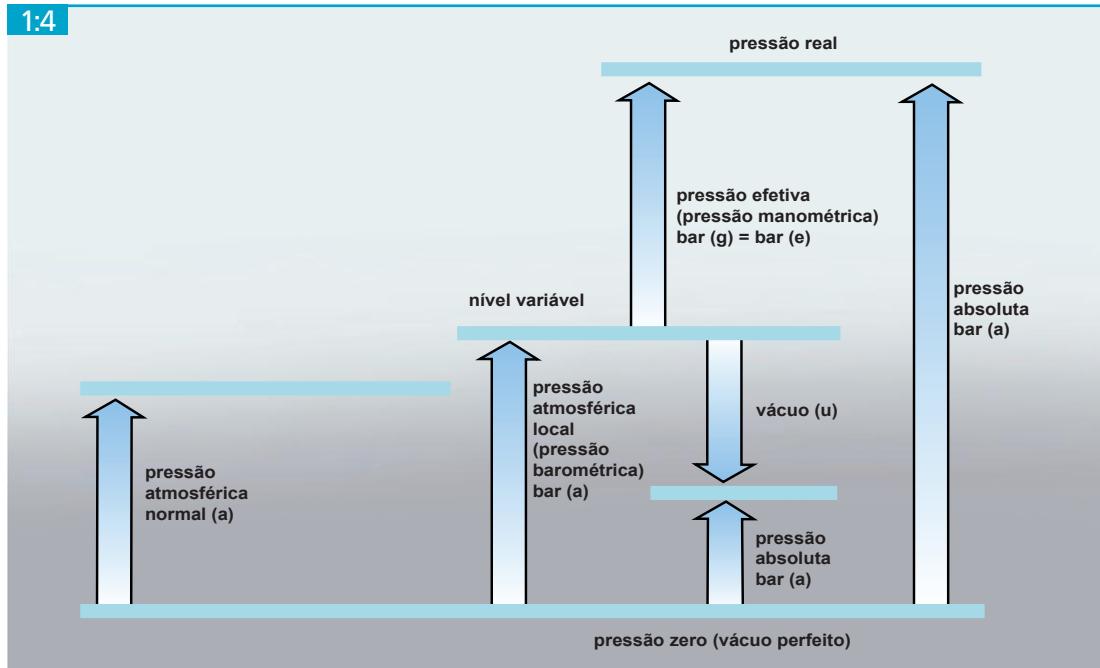
1.2.3 Capacidade térmica

O calor é uma forma de energia, representada pela energia cinética das moléculas desordenadas de uma substância.

A capacidade térmica (também chamada de capacidade de calor) de um objeto se refere a quantidade de calor necessário para produzir uma mudança unitária de temperatura (1K) e é expresso em J/K.

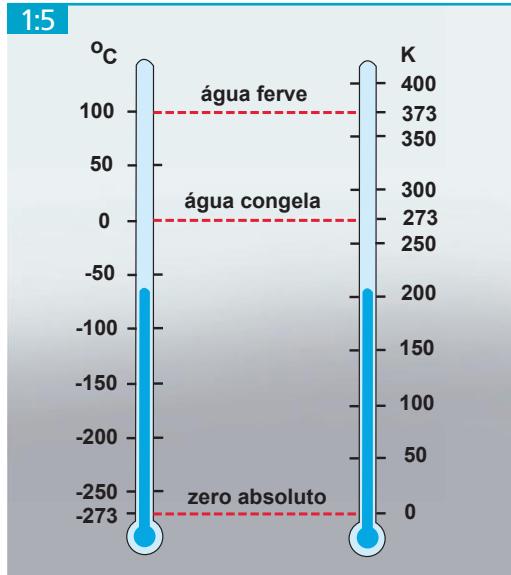
O calor específico ou a capacidade térmica específica de uma substância é mais comumente usado, e refere-se a quantidade de calor necessário para produzir uma mudança unitária de temperatura (1K) em uma massa unitária de substância (1 kg).

1:4



A maioria dos manômetros registra a diferença entre a pressão em um vaso e a pressão atmosférica local. Portanto, para encontrar a pressão absoluta, o valor da pressão atmosférica local deve ser adicionado.

1:5



Isso ilustra a relação entre as escalas Celsius e Kelvin. Para a escala Celsius, 0° é ajustado no ponto de congelamento da água; para a escala Kelvin, 0° é definido como zero absoluto.

O calor específico é expresso em J/(kg x K). De forma similar, a capacidade do calor molar é dimensionada J/(mol x K).

c_p = calor específico a pressão constante

c_v = calor específico a volume constante

C_p = calor específico molar a pressão constante

C_v = calor específico molar a volume constante

O calor específico a pressão constante é sempre maior do que o calor específico a volume constante. O calor específico de uma substância não é constante, mas sobe, em geral, a medida que a temperatura sobe. Para fins práticos, um valor médio pode ser usado. Para líquidos e substâncias sólidas: $c_p \approx c_v \approx c$. Para aquecer um fluxo de massa (\dot{m}) da temperatura t_1 para t_2 , então vai requerer:

$$P \approx \dot{m} \times c \times (T_2 - T_1)$$

P = poder calorífico (W)

\dot{m} = fluxo em massa (kg/s)

c = calor específico (J/kg x K)

T = temperatura (K)

A explicação do motivo de c_p ser maior do que c_v é o trabalho de expansão que o gás a uma pressão constante deve realizar. A razão entre c_p e c_v é denominada expoente isentrópico ou expoente adiabático (κ), e é uma função do número de átomos nas moléculas da substância.

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_p}{C_v}$$

1.2.4 Trabalho

O trabalho mecânico pode ser definido como o produto de uma força e a distância sobre a qual a força opera em um corpo. Exatamente como para o calor, o trabalho é a energia que é transferida de um corpo para outro.

A diferença é que agora é uma questão de força em vez de temperatura.

Uma ilustração disso é o gás em um cilindro sendo comprimido por um pistão em movimento. A compressão ocorre como resultado de uma força que move o pistão. Assim, a energia é transferida do pistão para o gás fechado no cilindro. Essa transferência de energia é um trabalho no sentido termodinâmico da palavra. O resultado do trabalho pode ter várias formas, como alterações na energia potencial, na energia cinética ou na energia térmica.

O trabalho mecânico associado a alterações no volume de uma mistura de gases é um dos processos mais importantes na termodinâmica de engenharia. A unidade SI para o trabalho é o Joule: 1 J = 1Nm = 1 Ws.

1.2.5 Potência

Potência é o trabalho realizado por unidade de tempo. É uma medida da rapidez com que o trabalho pode ser feito. A unidade SI para potência é o Watt: 1 W = 1 J/s.

Por exemplo, a potência ou a energia transmitida para o eixo de acionamento de um compressor é numericamente semelhante ao calor emitido pelo sistema mais o calor aplicado ao gás comprimido.

1.2.6 Vazão volumétrica

A vazão volumétrica de um sistema é uma medida do volume de um fluido que flui por unidade de tempo.

Pode ser calculado como o produto da área transversal do fluxo e a velocidade média do fluxo. A

unidade SI para o fluxo em volume é m³/s.

Entretanto, a unidade litro/segundo (l/s) também é frequentemente usada quando se refere ao volume do fluxo (também chamada de capacidade) de um compressor. É indicado como Normal litro/segundo N l/s) ou como descarga livre efetiva de ar (l/s).

Com N l/s, a vazão de ar é recalculada para "o estado normal", ou seja, convencionalmente escolhido como 1,013 bar(a) e 0° C. A unidade Normal N l/s é principalmente usada ao especificar a vazão de massa.

Para a descarga livre efetiva de ar (FAD), a vazão de saída do compressor é recalculada para o volume de ar livre na condição de entrada padrão (pressão de entrada de 1 bar (a) e temperatura de entrada de 20° C). A relação entre as duas vazões é a seguinte (observe que a fórmula simplificada abaixo não leva em conta a umidade):

$$q_{FAD} = q_N \times \frac{T_{FAD}}{T_N} \times \frac{p_N}{p_{FAD}}$$

$$q_{FAD} = q_N \times \frac{(273+20)}{273} \times \frac{1.013}{1.00}$$

q_{FAD} = Descarga Livre Efetiva de ar [l/s]

q_N = Vazão normal do fluxo [Nl/s]

T_{FAD} = temperatura de entrada padrão [20 °C]

T_N = temperatura de referência ao Normal [0 °C]

p_{FAD} = pressão de entrada padrão [1,00 bar(a)]

p_N = pressão de referência Normal [1,013 bar(a)]

1.3 TERMODINÂMICA

1.3.1 Princípios fundamentais

A energia existe em várias formas, como térmica, física, química, radiante (luz etc.) e energia elétrica. Termodinâmica é o estudo da energia térmica, ou seja, da capacidade de provocar mudanças em um sistema ou de realizar trabalhos.

A primeira lei da termodinâmica expressa o princípio da conservação da energia. Diz que a energia não pode ser criada nem destruída e, a partir disso, segue-se que a energia total em um ambiente fechado é sempre conservada, perma-

necendo constante e mudando apenas de uma forma para outra. Assim, o calor é uma forma de energia que pode ser gerada ou convertida em trabalho.

A segunda lei da Termodinâmica declara que existe uma tendência na natureza de avançar em direção a um estado de maior desordem molecular. A entropia é uma medida da desordem: os cristais sólidos, a forma de matéria mais estruturada regularmente, têm valores muito baixos de entropia. Os gases mais altamente desorganizados têm altos valores de entropia. A energia potencial de sistemas de energia isolados, que está disponível para executar o trabalho, diminui com o aumento da entropia. A Segunda Lei da Termodinâmica afirma que o calor nunca pode, por "seu próprio esforço", transferir de uma região de temperatura mais baixa para uma região de temperatura mais alta.

1.3.2 Leis dos gases

A lei de Boyle afirma que, se a temperatura for constante (isotérmica), o produto da pressão pelo volume é constante. A relação mostra:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

P = pressão absoluta [Pa]

V = volume [m^3]

Isso significa que, se o volume for reduzido pela metade durante a compressão, a pressão será o dobro, desde que a temperatura permaneça constante.

A lei de Charles diz que, a pressão constante (isobar), o volume de um gás muda em proporção direta a mudança de temperatura. A relação mostra:

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

V = volume [m^3]

T = temperatura absoluta [K]

A lei geral de estado para gases é uma combinação das leis de Boyle e Charles. Isso indica como a pressão, o volume e a temperatura afetam um ao outro. Quando uma dessas variáveis é alterada, isso afeta pelo menos uma das outras duas variáveis.

Isso pode ser escrito:

$$\frac{P \times V}{T} = R$$

P = pressão absoluta [Pa]

V = volume específico [m^3/kg]

T = temperatura absoluta [K]

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \text{constante individual do gás}$$

\bar{R} [J/(kgxK)]

A constante individual do gás R depende apenas das propriedades do gás. Se uma massa m do gás absorve o volume V , a relação pode ser escrita:

$$P \times V = n \times \bar{R} \times T$$

P = pressão absoluta [Pa]

V = volume [m^3]

n = número de mols

\bar{R} = constante universal do gás

= 8,314 [J/molxK]

T = temperatura absoluta [K]

1.3.3 Transmissão de calor

Qualquer diferença de temperatura dentro de um corpo ou entre diferentes corpos ou sistemas leva a transmissão de calor, até que seja alcançado um equilíbrio de temperatura. Essa transferência de calor pode ocorrer em três maneiras diferentes: por condução, convecção ou radiação. Em situações reais, a transmissão de calor ocorre simultaneamente, mas não de maneira igual nas três maneiras acima.

Condução é a transmissão de calor por contato direto de partículas. Ocorre entre corpos sólidos ou entre camadas finas de um líquido ou gás. Os átomos em vibração emitem uma parte de sua energia cinética para os átomos adjacentes que vibram menos.

$$Q = -\lambda \times A \times t \times \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Q = calor transmitido [J]

λ = coeficiente de conectividade térmica [W/mxK]

A = área do fluxo de calor [m^2]

t = tempo [s]

ΔT = diferença de temperatura

(frio – quente) [K]

Δx = distância [m]

Convecção é a transmissão de calor entre uma superfície sólida quente e o fluido estacionário ou móvel adjacente (gás ou líquido), reforçada pela mistura de uma porção do fluido com a outra. Pode ocorrer como convecção livre, por movimento natural num meio como resultado de diferenças na densidade devido a diferenças de temperatura. Também pode ocorrer como convecção forçada com movimento de fluido causado por agentes mecânicos, por exemplo, um ventilador ou uma bomba. A convecção forçada produz uma transferência de calor significativamente maior como resultado de velocidades de mistura mais altas.

$$Q = -h \times A \times t \times \Delta T$$

Q = calor transmitido [J]

h = coeficiente de transmissão de calor [$\text{W/m}^2 \times \text{K}$]

A = área de contato [m^2]

t = tempo [s]

ΔT = diferença de temperatura
(frio – quente) [K]

Radiação é a transmissão de calor através do espaço vazio. Todos os corpos com temperatura acima de 0° K emitem calor por radiação eletromagnética em todas as direções. Quando os raios

de calor atingem um corpo, parte da energia é absorvida e transformada para aquecer esse corpo. Os raios que não são absorvidos passam pelo corpo ou são refletidos por ele.

Em situações reais, a transmissão de calor é a soma da transferência simultânea de calor por condução, por convecção e por radiação.

Geralmente, a relação de transmissão de calor abaixo se aplica:

$$Q = -k \times A \times t \times \Delta T$$

Q = calor transmitido [J]

h = coeficiente total de transmissão de calor [$\text{W/m}^2 \times \text{K}$]

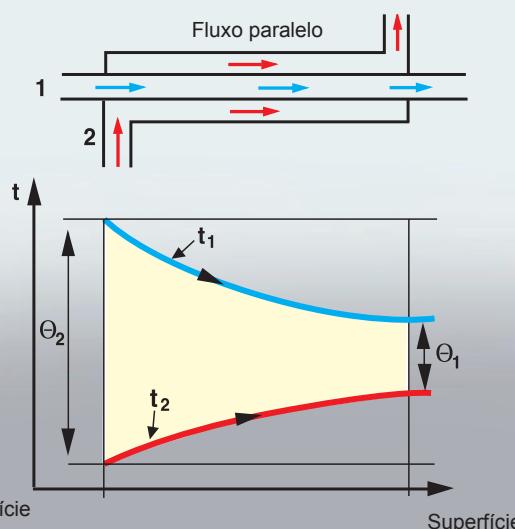
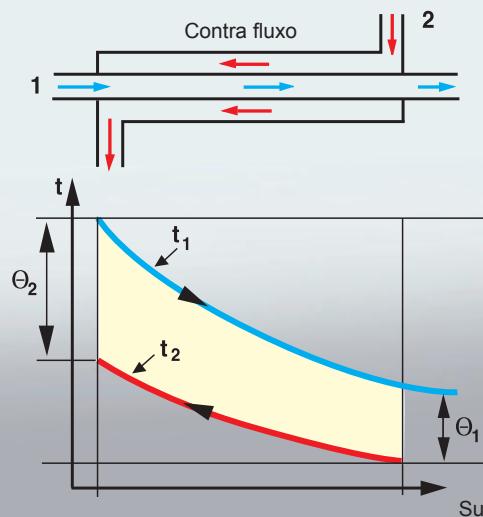
A = área de contato [m^2]

t = tempo [s]

ΔT = diferença de temperatura
(frio – quente) [K]

A transmissão de calor ocorre frequentemente entre dois corpos que são separados por uma parede. O coeficiente total de transmissão de calor "k" depende do coeficiente de transferência de calor de ambos os lados da parede e do coeficiente de condutividade térmica da própria parede.

1:6



Isso ilustra o gradiente de temperatura nos trocadores de calor com contra fluxo e com fluxo paralelo.

Para uma parede plana e limpa, a relação abaixo se aplica:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

α_1, α_2 = coeficiente de transmissão de calor em cada lado da parede [W/m²·K]

d = espessura da parede [m]

λ = condutividade térmica da parede [W/m·K]

h = coeficiente total de transmissão de calor [W/m²·K]

A transmissão de calor em um trocador de calor é, em cada ponto, uma função da diferença da temperatura prevalecente e do coeficiente total de transferência de calor. Requer o uso de uma diferença de temperatura média logarítmica Θ_m em vez de um ΔT aritmético linear.

A diferença de temperatura média logarítmica é definida como a relação entre as diferenças de temperatura nos dois lados da conexão do trocador de calor, de acordo com a expressão:

$$\Theta_m = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\ln \frac{\Theta_1}{\Theta_2}}$$

Θ_m = diferença logarítmica de temperatura média [K]

1.3.4 Mudanças de estado

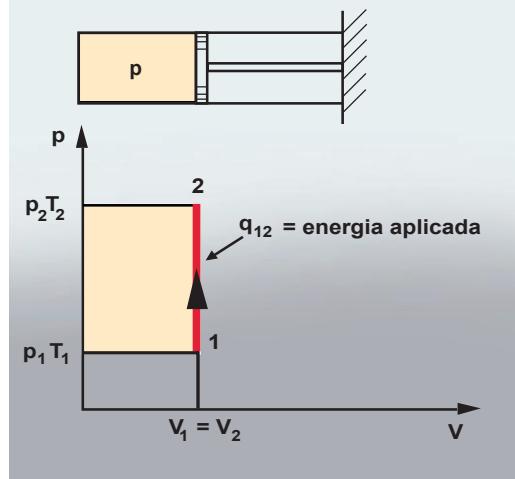
As alterações no estado de um gás podem ser seguidas de um ponto para outro em um diagrama p/V. Para casos reais, são necessários três eixos para as variáveis p, V e T. Com uma mudança de estado, somos movidos ao longo de uma curva tridimensional na superfície no espaço p, V e T.

No entanto, para simplificar, geralmente consideramos a projeção da curva em um dos três planos. Este é geralmente o plano p/V. Cinco diferentes mudanças de estado podem ser consideradas:

- processo isocórico (volume constante),
- processo isobárico (pressão constante),
- processo isotérmico (temperatura constante),
- processo isentrópico (sem troca de calor com o ambiente),
- processo politrópico (troca completa de calor com o ambiente).

1.3.4.1 Processo isocórico

1:7



Mudança isocórica de estado significa que a pressão muda, enquanto o volume é constante.

O aquecimento de um gás em um recipiente fechado é um exemplo do processo isocórico em volume constante.

$$Q = m \times c_V \times (T_2 - T_1)$$

Q = quantidade de calor [J]

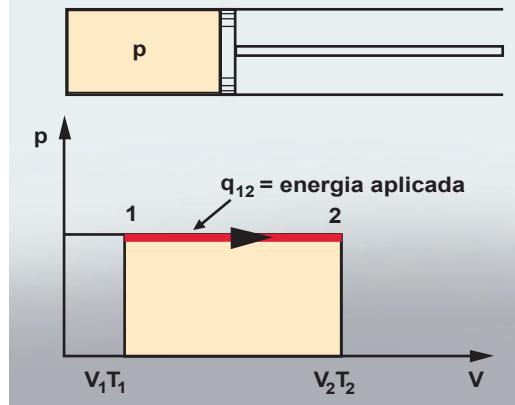
m = massa [kg]

c_V = calor específico a volume constante [J/kg·K]

T = temperatura absoluta [K]

1.3.4.2 Processo isobárico

1:8



Mudança isobárica de estado significa que o volume muda, enquanto a pressão é constante.

O aquecimento de um gás em um cilindro com uma carga constante no pistão é um exemplo de processo isobárico a pressão constante.

$$Q = m \times c_p \times (T_2 - T_1)$$

Q = quantidade de calor [J]

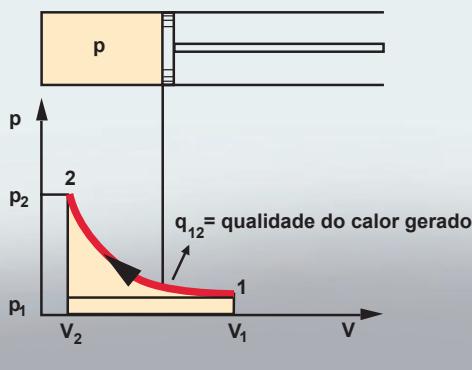
m = massa [kg]

c_p = calor específico a pressão constante
[J/kgxK]

T = temperatura absoluta [K]

1.3.4.3 Processo isotérmico

1:9



Mudança isotérmica de estado significa que a pressão e o volume é alterado enquanto a temperatura permanece constante.

Se o gás num cilindro for comprimido isotermicamente, uma quantidade de calor igual ao trabalho aplicado deve ser gradualmente removida. Isso não é prático, pois um processo tão lento não pode ocorrer.

$$Q = m \times R \times T \times \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$Q = p_1 \times V_1 \times \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Q = quantidade de calor [J]

m = massa [kg]

R = constante de gás individual [J/(kgxK)]

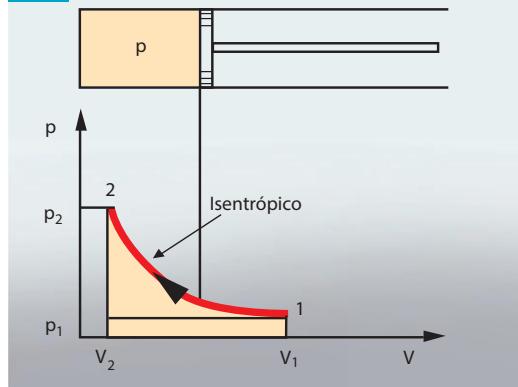
T = temperatura absoluta [K]

V = volume [m³]

p = pressão absoluta [Pa]

1.3.4.4 Processo isentrópico

1:10



Quando a entropia num gás que está sendo comprimido ou expandido é constante, nenhuma troca de calor com o ambiente ocorre. Essa mudança de estado segue a lei de Poisson.

No processo isentrópico, um gás é comprimido em um cilindro totalmente isolado, sem trocar calor com o ambiente. Também pode existir, se um gás é expandido através de um bocal de forma tão rápida, que nenhuma troca de calor possa ocorrer com o ambiente.

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa} \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

p = pressão absoluta [Pa]

V = volume [m³]

T = temperatura absoluta [K]

κ = C_p / C_v = expoente isentrópico

1.3.4.5 Processo politrópico

O processo isotérmico envolve total troca de calor com o entorno e o processo isentrópico não envolve nenhuma troca de calor. Na realidade, todos os processos ocorrem em algum lugar entre esses extremos: o processo politrópico. A expressão para esse processo é:

$$p \times V^n = \text{constante}$$

p = pressão absoluta [Pa]

V = volume [m³]

$n = 0$ (para processo isobárico)

$n = 1$ (para processo isotérmico)

$n = \kappa$ (para processo isentrópico)

$n = \infty$ (para processo isocórico)

11.3.5 Fluxo de gás através de um bocal

O fluxo de gás através de um bocal depende da taxa de pressão nos respectivos lados do bocal. Se a pressão após o bocal for reduzida, a vazão será maior. No entanto, apenas permanece assim até que a pressão atinja metade da pressão anterior ao bocal. Uma redução adicional da pressão após a abertura não gera aumento no fluxo.

Essa é a taxa de pressão crítica e depende do expoente isentrópico (κ) do gás específico. A taxa de pressão crítica também ocorre quando a velocidade do fluxo é igual a velocidade sônica na seção mais estreita do bocal.

O fluxo se torna supercrítico se a pressão após o bocal for reduzida ainda mais, abaixo do valor crítico. A relação para o fluxo através do bocal é:

$$\dot{Q} = \alpha \times \psi \times p_1 \times A \times \sqrt{\left(\frac{2}{R \times T_1}\right)}$$

Q = fluxo em massa [kg/s]

α = coeficiente do bocal

ψ = coeficiente do fluxo

A = área mínima [m²]

R = constante individual do gás [J/(kg·K)]

T_1 = temperatura absoluta antes do bocal [K]

p_1 = pressão absoluta antes do bocal [Pa]

1.3.6 Fluxo através de tubos

O número de Reynolds é uma relação adimensional entre a inércia e o atrito em um meio fluido:

$$Re = D \times w \times \frac{\rho}{\eta}$$

D = dimensão característica

(ex: diâmetro do tubo) [m]

w = velocidade média do fluxo [m/s]

ρ = densidade do meio fluente [kg/m³]

η = viscosidade dinâmica média [Paxs]

Em princípio, existem dois tipos de fluxo em um tubo.

Com $Re < 2000$, as forças viscosas dominam no meio e o fluxo se torna laminar. Isto significa que as diferentes camadas do meio se movem, uma em relação a outra, na ordem correta. A distribui-

ção de velocidade através das camadas laminares é geralmente de formato parabólico.

Com $Re \geq 4000$, as forças de inércia dominam o comportamento do meio que flui e o fluxo se torna turbulento, com as partículas se movendo aleatoriamente através dele. A distribuição de velocidade através de uma camada com fluxo turbulento torna-se difusa.

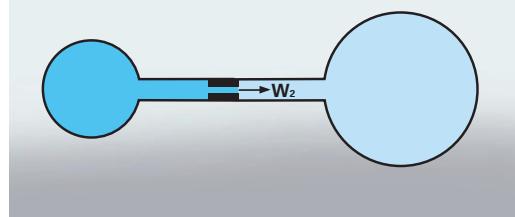
Na área crítica, entre $Re \leq 2000$ e $Re \geq 4000$, as condições de fluxo são indeterminadas, ou seja, laminar, turbulenta ou uma mistura dos dois. As condições dependem de fatores como a suavidade da superfície do tubo ou a presença de outros distúrbios.

Para iniciar um fluxo em um tubo é requerida uma diferença de pressão específica para superar o atrito no tubo e nos acoplamentos. O valor da diferença de pressão depende do diâmetro do tubo, o seu comprimento e forma, bem como a suavidade da superfície e o número de Reynolds.

1.3.7 Estrangulamento de fluxo

Quando um gás ideal flui através de uma restrição com pressão constante, antes e depois da restrição a temperatura permanece constante. No entanto, ocorre uma queda de pressão através da restrição, cuja causa é a energia interna sendo transformada em energia cinética. Esta é a razão pela qual a temperatura cai. Para gases reais, essa mudança de temperatura se torna permanente, mesmo que o conteúdo energético do gás permaneça constante. Isso é chamado de efeito Joule-Thomson. A mudança de temperatura é igual a mudança da pressão no

1:11



Quando um gás ideal flui através de uma pequena abertura entre dois grandes recipientes, a energia se torna constante e não ocorre troca de calor. No entanto, há uma queda de pressão com a passagem do gás através da restrição.

estrangulamento multiplicada pelo coeficiente de Joule-Thomson.

Se o meio fluente tiver uma temperatura suficientemente baixa ($\leq +329^{\circ}\text{C}$ para o ar), ocorrerá uma queda de temperatura com a aceleração através da restrição, mas se o fluido estiver mais quente, ocorrerá um aumento de temperatura. Essa condição é usada em várias aplicações técnicas, por exemplo, na tecnologia de refrigeração e na separação de gases.

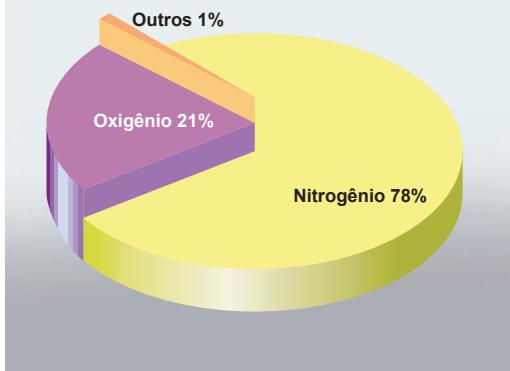
1.4 AR

1.4.1 Ar de modo geral

O ar é uma mistura de gases incolor, inodora e insípida. É uma mistura de muitos gases, mas é composta principalmente de oxigênio (21%) e nitrogênio (78%).

Essa composição é relativamente constante, desde o nível do mar até uma altitude de 25 quilômetros.

1:12



O ar é uma mistura de gases que consiste principalmente de oxigênio e nitrogênio. Apenas aprox. 1% é constituído por outros gases.

O ar não é uma substância química pura, mas é uma substância misturada mecanicamente. É por isso que pode ser separado em seus elementos constituintes, por exemplo, por resfriamento.

O ar atmosférico é sempre mais ou menos contaminado com partículas sólidas, por exemplo, poeira, areia, fuligem e cristais de sal. O grau de contaminação é maior nas áreas povoadas, e menor no campo e em altitudes mais elevadas.

1.4.2 Ar úmido

O ar pode ser considerado uma mistura de ar seco e vapor de água. O ar que contém vapor de água é chamado de ar úmido, mas a umidade do ar pode variar dentro de grandes limites. Os extremos são ar completamente seco e ar saturado com umidade. A pressão máxima de vapor de água que o ar pode suportar aumenta com o aumento da temperatura. Uma pressão máxima de vapor de água tem uma temperatura correspondente.

O ar geralmente não contém tanto vapor de água que a pressão máxima é atingida. A pressão relativa do vapor (também conhecida como umidade relativa) é um estado entre a pressão parcial real do vapor e a pressão saturada na mesma temperatura.

O ponto de orvalho é a temperatura na qual o ar está saturado com vapor de água. Depois disso, se a temperatura cair, a água condensa. Ponto de orvalho atmosférico é a temperatura na qual o vapor d'água começa a condensar a pressão atmosférica. O ponto de orvalho sob pressão é a temperatura equivalente com o aumento da pressão. A seguinte expressão se aplica:

$$(p - \varphi \times p_s) \times V = R_a \times m_a \times T$$

$$\varphi \times p_s \times V = R_v \times m_v \times T$$

p = pressão total absoluta [Pa]

p_s = pressão de saturação na temperatura efetiva [Pa]

φ = pressão relativa de vapor

V = volume total de ar úmido [m^3]

R_a = constante do gás para ar seco
= 287 J/kg×K

R_v = constante do gás para vapor de água
= 462 J/kg×K

m_a = massa do ar seco [kg]

m_v = massa do vapor de água [kg]

T = temperatura absoluta do ar úmido [K]

1.5 TIPOS DE COMPRESSORES

1.5.1 Dois princípios básicos

Existem dois princípios básicos para a compressão do ar (ou gás): compressão de deslocamento positivo e compressão dinâmica.

Compressores de deslocamento positivo incluem, por exemplo, compressores alternativos (pistão), compressores orbitais (scroll) e diferentes tipos de compressores rotativos (parafuso, virgula, palheta).

Na compressão de deslocamento positivo, o ar é aspirado para uma ou mais câmaras de compressão, que são fechadas a partir da entrada. Gradualmente, o volume de cada câmara diminui e o ar é comprimido internamente. Quando a pressão atinge o valor interno de projeto, uma porta ou válvula é aberta e o ar é descarregado no sistema de saída devido a redução contínua do volume da câmara de compressão.

Na compressão dinâmica, o ar é aspirado entre as pás de um impeller (impulsor) de compressão com rotação elevada e o acelera a alta velocidade. O gás é então descarregado através de um difusor, onde a energia cinética é transformada em pressão estática. A maioria dos compressores dinâmicos são turbocompressores com padrão de fluxo axial ou radial. Todos são projetados para grandes fluxos em volume.

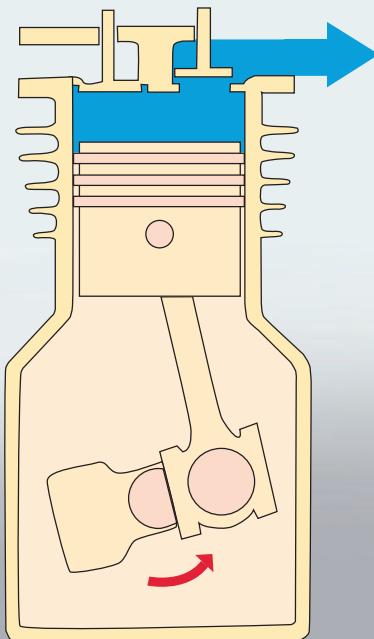
1.5.2 Compressores de deslocamento positivo

Uma bomba de bicicleta é a forma mais simples de um compressor de deslocamento positivo, onde o ar é aspirado para um cilindro e comprimido por um pistão em movimento.

O compressor de pistão possui o mesmo princípio operacional e utiliza um pistão cujo movimento para frente e para trás é realizado por uma biela e um eixo de manivela rotativo. Se apenas um lado do pistão é usado para compressão, isso é chamado de compressor de simples efeito. Se a parte superior e a parte inferior do pistão forem usadas, o compressor terá duplo efeito.

A razão de compressão é a relação entre a pressão absoluta nos lados de entrada e de saída. Portanto, uma máquina que aspira ar a pressão

1:13



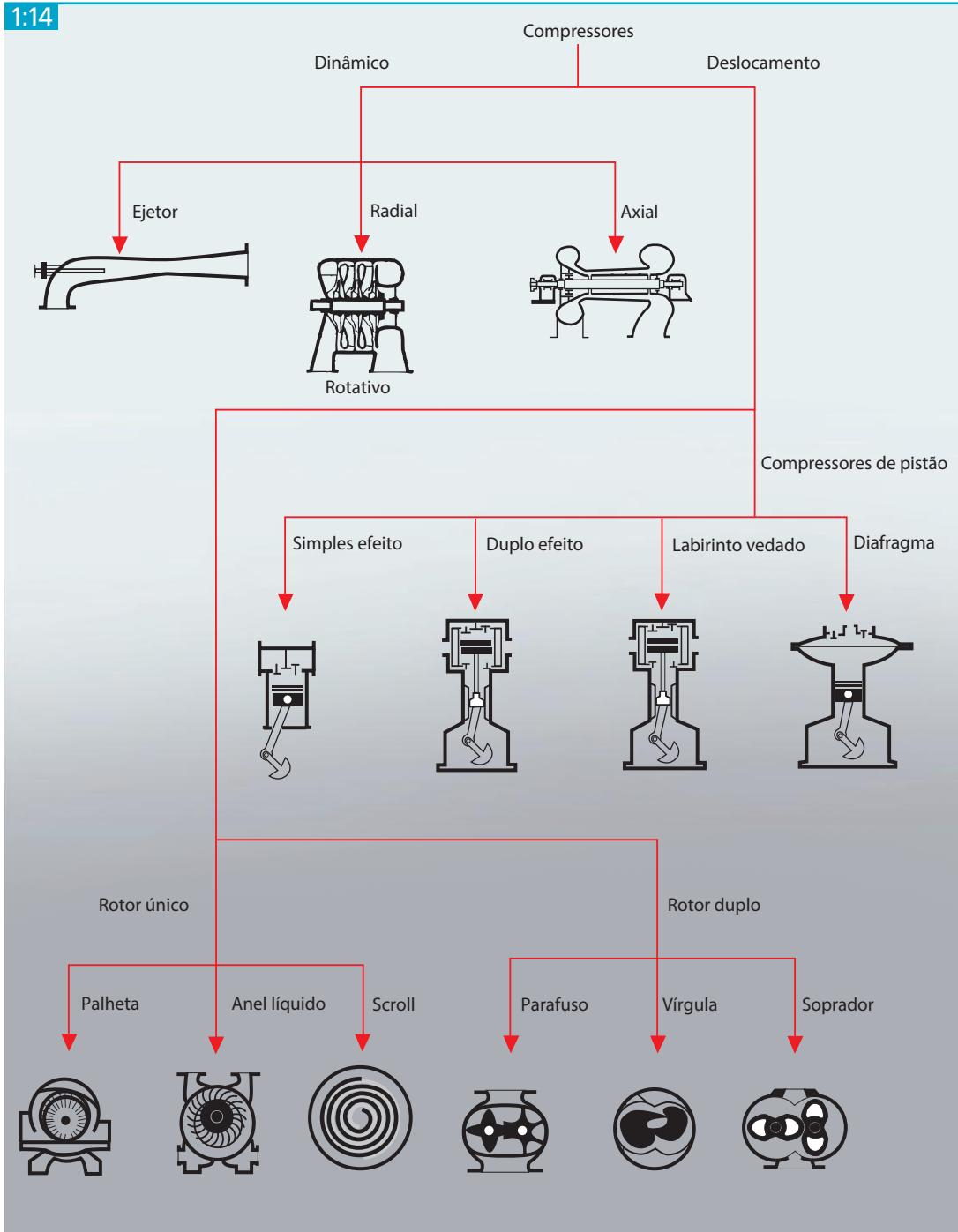
Compressor de pistão, de um estágio e de simples efeito.

atmosférica de 1 bar (a) e o comprime a 7 bar de sobrepressão funciona com uma relação de compressão de $(7 + 1) / 1 = 8$.

1.5.3 Diagrama para compressores de deslocamento

A Figura 1:15 mostra a relação pressão-volume de um compressor teórico e a Figura 1:16 mostra um diagrama mais realista para um compressor de pistão. O volume deslocado é o volume do cilindro que o pistão percorre durante o estágio de sucção. O volume de folga é o volume logo abaixo das válvulas de entrada, de saída e acima do pistão, o qual deve corresponder ao ponto de virada superior do pistão por razões mecânicas. A diferença entre o volume deslocado e o volume de sucção deve-se à expansão do ar restante no volume de folga antes do início da sucção. A diferença entre o diagrama p / V teórico e o diagrama real é devido ao projeto prático do compressor, por exemplo, um compressor de pistão. As válvulas nunca são completamente vedadas e sempre há um grau de vazamento entre a saia do pistão e a parede do cilindro. Além disso, as válvulas não podem abrir e fechar

1:14



Tipos de compressores mais comuns, divididos de acordo com seus princípios de funcionamento.

1:15



Isso ilustra como um compressor de pistão trabalha teoricamente com válvulas de ação automática. O diagrama p / V mostra o processo sem perdas, com enchi-
mento e esvaziamento completos do cilindro.

completamente sem uma defasagem mínima, o que resulta em uma queda de pressão quando o gás flui através dos canais. Devido a esta concep-
ção, o gás também é aquecido quando flui para dentro do cilindro.

Trabalho de compressão isotérmica:

$$W = p_1 \times V_1 \times \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

Trabalho de compressão isentrópica:

$$W = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \times (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

W = trabalho de compressão [J]

p₁ = pressão inicial [Pa]

V₁ = volume inicial [m³]

p₂ = pressão final [Pa]

K = expoente isentrópico: $K \approx 1,3 - 1,4$

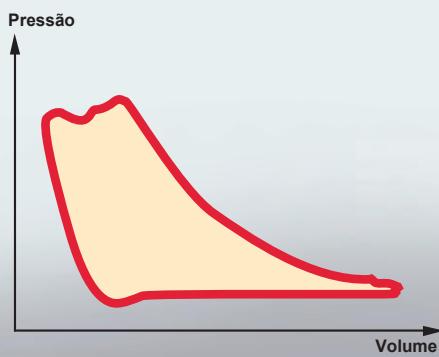
Essas relações mostram que é necessário mais trabalho para compressão isentrópica do que para compressão isotérmica.

1.5.4 Compressores dinâmicos

Em um compressor dinâmico, o aumento da pres-
são ocorre enquanto o gás flui. O gás é acelerado
a alta velocidade por meio das pás rotativas de
um impulsor. Quando o gás é forçado a desace-
lerar sob a expansão de um difusor, a velocidade
desse gás é subsequentemente transformada em
pressão estática.

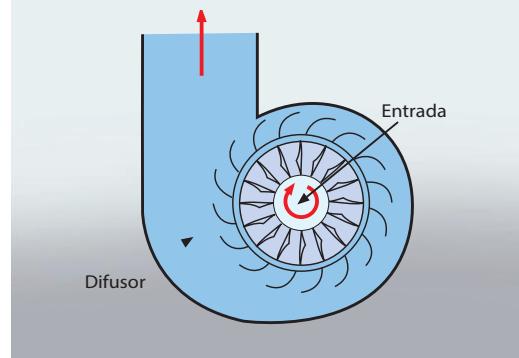
Dependendo da direção principal do fluxo de
gás, esses compressores são chamados de com-
pressores radiais ou axiais.

1:16



Isso ilustra um diagrama p / V mais real para um
compressor de pistão. A queda de pressão no lado de entra-
da e a sobrepressão no lado de descarga são minimiza-
das ao proporcionar uma área de válvula adequada.

1:17



Turbocompressor radial

Em comparação com os compressores de deslocamento, os compressores dinâmicos têm uma característica segundo a qual uma pequena alteração na pressão de trabalho resulta em uma grande alteração na vazão (veja a figura 1:19).

Cada velocidade do impulsor tem um limite de vazão superior e inferior. O limite superior significa que a velocidade do fluxo de gás atinge a velocidade de sônica. O limite inferior significa que a contra-pressão se torna maior que o aumento de pressão do compressor, o que significa fluxo de retorno para dentro do compressor. Por sua vez, isso resulta em pulsação, ruído e risco de danos mecânicos.

1.5.5 Compressão em vários estágios

Em teoria, o ar ou o gás podem ser comprimidos isentropicamente (a entropia constante) ou isotermicamente (a temperatura constante). Qualquer um dos processos pode fazer parte de um ciclo teoricamente reversível. Se o gás comprimido pudesse ser usado imediatamente em sua temperatura final após a compressão, o processo de compressão isentrópica teria certas vantagens. Na realidade, o ar ou o gás raramente são usados diretamente após a compressão e geralmente são resfriados a temperatura ambiente antes do uso. Consequentemente, o processo de compressão isotérmica é preferido, pois requer menos trabalho. Um procedimento prático e comum para realizar esse processo de compressão isotérmica envolve o resfriamento do gás durante a compressão.

Um procedimento prático e comum para realizar

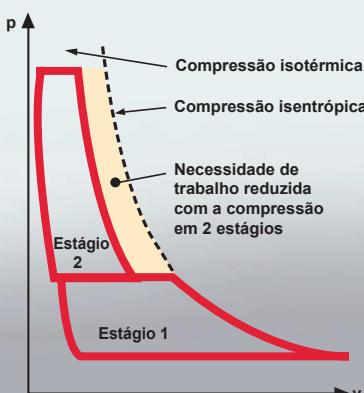
esse processo de compressão isotérmica envolve o resfriamento do gás durante a compressão. A uma pressão de trabalho manométrica de 7 bar, a compressão isentrópica teoricamente requer 37% mais energia do que a compressão isotérmica. Um método prático para reduzir o aquecimento do gás é dividir a compressão em várias etapas. O gás é resfriado após cada estágio antes de ser comprimido ainda mais até a pressão final. Isso também aumenta a eficiência energética, com o melhor resultado obtido quando cada estágio de compressão tem a mesma taxa de pressão. Ao aumentar o número de estágios de compressão, todo o processo se aproxima da compressão isotérmica. No entanto, há um limite econômico para o número de estágios que o projeto de uma instalação real pode usar.

1.5.6 Comparação: turbocompressor e deslocamento positivo

Com velocidade rotacional constante, a curva pressão / vazão de um turbocompressor difere significativamente de uma curva equivalente para um compressor de deslocamento positivo. O turbocompressor é uma máquina com vazão variável e característica de pressão variável. Por outro lado, o compressor de deslocamento é uma máquina com vazão constante e pressão variável.

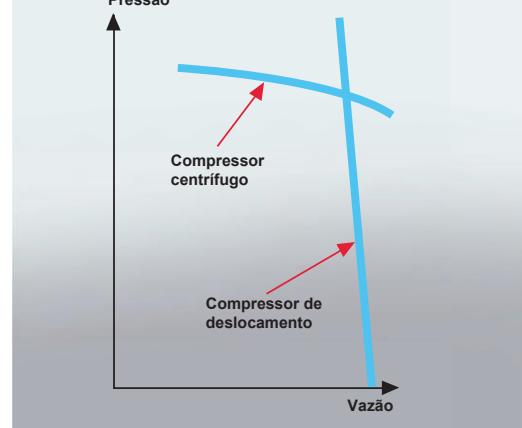
Um compressor de deslocamento fornece uma relação de compressão mais alta, mesmo em baixa velocidade. Os turbocompressores são projetados para grandes vazões de ar.

1:18



Dividindo a compressão em dois estágios, a área colorida representa o trabalho economizado.

1:19



Isso mostra as curvas de carga dos respectivos compressores centrífugos e de deslocamento quando a carga é alterada em uma velocidade constante.

1.6 ELETRICIDADE

1.6.1 Terminologia básica e definições

A eletricidade é o resultado da separação temporária de elétrons dos prótons, criando assim uma diferença de potencial elétrico (ou tensão elétrica) entre a área com excesso de elétrons e a área com falta de elétrons. Quando os elétrons encontram um caminho condutor de eletricidade para se mover, a corrente elétrica flui.

As primeiras aplicações elétricas utilizavam energia de corrente contínua (CC), em que a carga elétrica do fluxo de elétrons é unidirecional. O CC é produzido por baterias, células solares fotovoltaicas (PV) e geradores.

A corrente alternada que é usada, por exemplo, para alimentar escritórios e oficinas e para girar motores padrões de velocidade fixa, é gerada por um alternador. Periodicamente, a corrente altera a intensidade e a direção em um padrão senoidal suave. A tensão e a intensidade da corrente aumentam de zero para um valor máximo, depois caem para zero, mudam de direção, aumentam para um valor máximo na direção oposta e depois se tornam zero novamente. A corrente completou um período T , medido em segundos, no qual passou por todos os seus valores. A frequência é o inverso do período, indica o número de ciclos completos por segundo e é medido em Hertz.

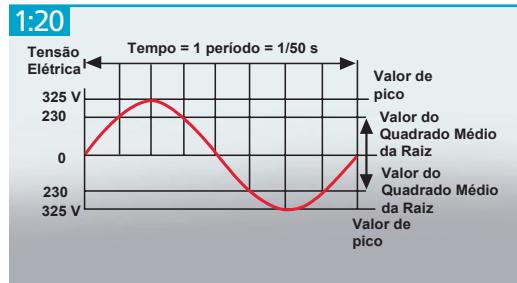
$$f = \frac{1}{T}$$

f = frequência Hz

T = tempo para um período [s]

As intensidades de corrente ou a tensão elétrica são geralmente indicadas pelo valor do quadrado médio da raiz (RMS) ao longo de um período. Com um padrão senoidal, a relação para o valor do quadrado médio da raiz da corrente e da tensão é:

$$\text{quadrado médio da raiz} = \frac{\text{valor de pico}}{\sqrt{2}}$$



Isso mostra um período de tensão senoidal (50 Hz).

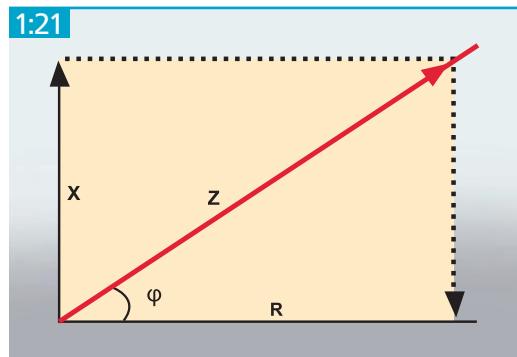
Formas de onda de corrente e tensão periódicas, mas não senoidais, nada tem a ver com ondas senoidais puras. Os exemplos simplificados são formas de onda quadradas, triangulares ou retangulares. Frequentemente, são derivadas de funções matemáticas e podem ser representadas por uma combinação de ondas senoidais puras de diferentes frequências, as vezes múltiplos da frequência mais baixa (chamada de fundamental).

corrente: $i(t) = I_0 + i_1(t) + i_2(t) + \dots + i_n(t) + \dots$

tensão: $v(t) = V_0 + v_1(t) + v_2(t) + \dots + v_n(t) + \dots$

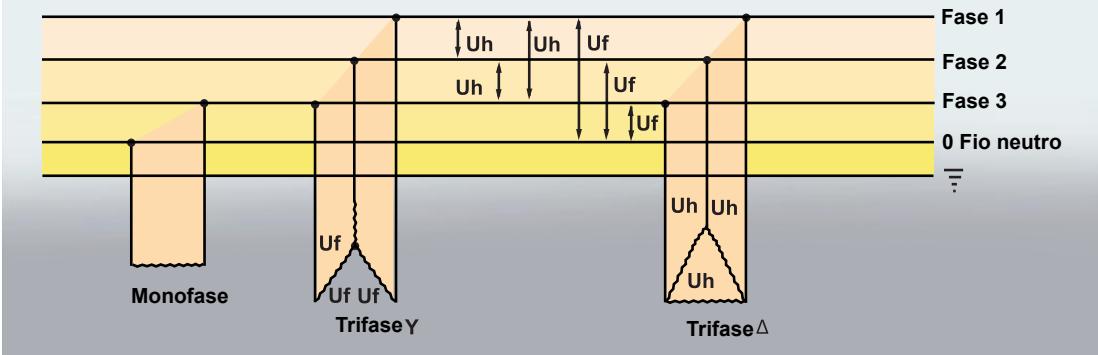
1.6.2 Lei de Ohm para corrente alternada

A corrente alternada quando passa através de uma bobina dá origem a um fluxo magnético. Esse fluxo altera a sua intensidade e a direção da mesma forma que a corrente elétrica. Quando o fluxo muda, uma fem (força eletromotriz) é gerada na bobina, de acordo com as leis da indução. Esta fem é contradirecionada para a tensão do polo conectado. Esse fenômeno é chamado de autoindução.



Relação entre Reatância (X) - Resistência (R) - Impedância (Z) - Deslocamento de fase (ϕ).

1:22



Isso ilustra as diferentes opções de conexão para sistema trifásico. A tensão entre os condutores bifásicos é chamada de tensão principal (U_h). A tensão entre o condutor de uma fase e o fio neutro é chamada de tensão de fase (U_f). Tensão de fase (fase + neutro) = tensão de linha/principal (fase + fase) / raiz de 3.

A autoindução em uma unidade de corrente alternada gera, em parte, deslocamento de fase entre a corrente e a tensão e, em parte, uma queda de tensão indutiva. A resistência da unidade a corrente alternada torna-se aparentemente maior que a calculada ou medida com corrente direta.

O deslocamento de fase entre a corrente e a tensão é representado pelo ângulo ϕ . A resistência indutiva (chamada reatância) é representada por X . A resistência é representada por R . A resistência aparente em uma unidade ou condutor é representada por Z .

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Z = impedância (Ohm) [Ω]

R = resistência [Ω]

X = reatância [Ω]

Lei do Ohm para corrente alternada:

$$U = I \times Z$$

U = tensão elétrica [V]

I = corrente [A]

Z = impedância [Ω]

1.6.3 Sistema trifásico

A potência de uma única fase de corrente alternada flutua. Para uso doméstico, isso realmente não apresenta um problema. No entanto, para

a operação de motores elétricos, é aconselhável usar uma corrente que produza energia mais constante. Isso é obtido usando três linhas de energia separadas, com corrente alternada, fluindo em paralelo, mas com cada corrente de fase deslocada de 1/3 de ciclo em relação a outras fases.

A corrente alternada trifásica é produzida na central de energia elétrica por um gerador com três enrolamentos separados. A aplicação monofásica pode ser conectada entre a fase e o zero. As aplicações trifásicas podem ser conectadas usando todas as três fases de duas maneiras, em configurações em estrela (Y) ou em triângulo (Δ). Com a conexão em estrela, existe uma tensão de fase entre as tomadas. Com a conexão triângulo, uma tensão principal fica entre as tomadas.

Os compressores industriais fizeram parte das primeiras máquinas industriais a serem equipadas com inversores de velocidade variável (VSD), também chamados de inversores de frequência variável, para controlar a velocidade de rotação e o torque dos motores de indução em CA, controlando a frequência das linhas de energia elétrica do motor. O projeto mais comum converte as três fases da energia de entrada em CA em energia de CC, usando uma ponte retificadora. Essa energia em CC é convertida em energia de CA quase senoidal usando um circuito de comutação do inversor (atualmente, comutadores semicondutores de energia do tipo IGBT) e técnicas de modulação por largura de pulso (PWM).

1.6.4 Potência

A potência ativa P (em Watts) é a potência útil que pode ser usada no trabalho. Um wattímetro mede apenas o componente da corrente que está em fase com a tensão. Esta é a corrente que flui através da resistência no circuito.

A energia reativa Q (V.Ar) é a energia "inútil" ou "fora de fase" ou "fantasma" e não pode ser usada para o trabalho. No entanto, é útil para fornecer o campo de magnetização necessário para o motor.

A energia aparente S (V.A) é a energia que deve ser consumida pela fonte de alimentação para obter acesso a energia ativa. Inclui a potência ativa e reativa e quaisquer perdas de calor do sistema de distribuição elétrica.

$$P = U \times I \times \cos\varphi$$

$$Q = U \times I \times \sin\varphi$$

$$S = U \times I$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

U = tensão [V]

I = corrente [A]

φ = ângulo de fase

Para as configurações trifásicas estrela e triângulo, a potência ativa é:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi$$

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin\varphi$$

$$S = U \times I$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

A relação entre potência ativa, reativa e aparente é geralmente ilustrada por um triângulo de potência. O ângulo de fase expressa o grau em que a corrente e a tensão estão fora de fase. Uma quantidade conhecida como fator de potência (PF) é igual a $\cos\varphi$.

Muitas concessionárias de energia aplicam uma penalidade a seus consumidores por uso da energia com Fator de Potência baixo e atrasado. Isso ocorre porque os equipamentos de distribuição, transmissão e geração de energia elétrica devem ser substancialmente superdimensionados para acomodar a energia aparente (soma da energia ativa e reativa e das perdas de calor), enquanto que os consumidores são cobrados com base no consumo de kWh (kilowatt hora) registrando apenas a energia ativa.

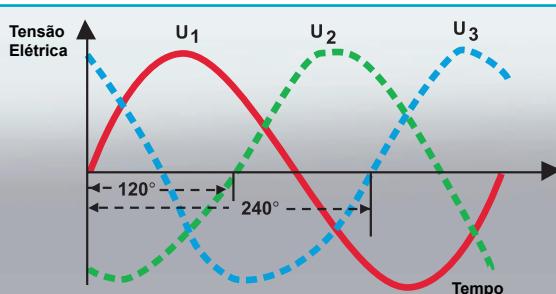
As melhorias do FP geralmente resultam em substancial economia de custos. O FP pode ser melhorado reduzindo a potência reativa com:

- Utilização de equipamentos com alto FP: reatores de iluminação
- Utilização de motores síncronos operados com os melhores FP e com carga constante
- Usando capacitores de melhoria do FP

1.6.5 O motor elétrico

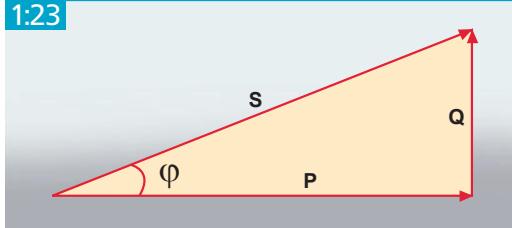
O motor elétrico mais comum é o motor de indução trifásico em gaiola de esquilo. Este tipo de motor é usado em todos os tipos de indústrias. É silencioso e confiável e, portanto, faz parte da maioria dos sistemas, incluindo compressores. O motor elétrico consiste em duas partes principais, o estator fixo e o rotor. O estator produz um campo magnético rotativo e o rotor converte essa energia em movimento, isto é, energia mecânica.

1:24



O deslocamento entre os enrolamentos dos geradores fornece uma curva de tensão senoidal no sistema. O valor máximo é deslocado no mesmo intervalo que os enrolamentos do gerador.

1:23



Isso ilustra a relação entre potência aparente (**S**), potência reativa (**Q**) e potência ativa (**P**). O ângulo ϕ entre **S** e **P** determina o fator de potência $\cos(\phi)$.

O estator está conectado a rede elétrica trifásica. A corrente nos enrolamentos do estator gera um campo de força magnético rotativo, que induz correntes no rotor e gera um campo magnético lá também. A interação entre os campos magnéticos do estator e do rotor cria o torque de rotação, o que, por sua vez, faz o eixo do rotor girar.

1.6.5.1 Velocidade de rotação

Se o eixo do motor de indução girasse na mesma velocidade do que o campo magnético, a corrente induzida no rotor seria zero. No entanto, devendo a várias perdas, por exemplo, nos rolamentos, isso é impossível de acontecer e a velocidade é sempre aprox. 1-5% abaixo da velocidade síncrona do campo magnético (chamada de "escorregamento"). (Os motores de ímã permanente não produzem nenhum escorregamento).

$$n = \frac{120 \times f}{p}$$

n = velocidade síncrona

[rotações ou giros/min]

f = frequência de alimentação do motor
[Hz]

p = número de polos por fase (pari)

1.6.5.2 Eficiência

A conversão de energia em um motor não ocorre sem perdas. Essas perdas são o resultado, entre outras coisas, de perdas resistivas, de ventilação, de magnetização e de atrito.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

η = eficiência

P₂ = potência declarada, potência no eixo [W]

P₁ = potência elétrica aplicada no motor [W]

P₂ é sempre a potência informada na placa de dados do motor.

1.6.5.3 Classe de isolamento

O material de isolamento nos enrolamentos do motor é dividido em classes de isolamento, de acordo com a IEC 60085, uma norma publicada pela Comissão Eletrotécnica Internacional. A letra correspondente a temperatura, que é o limite superior da área de aplicação de isolamento, designa cada classe.

Se o limite superior for excedido em 10 °C por um período prolongado, a vida útil do isolamento será reduzida em cerca de metade.

Classe de isolamento	B	F	H
Temp. max. do enrolamento (°C)	130	155	180
Temperatura ambiente (°C)	40	40	40
Aumento da temperatura (°C)	80	105	125
Margem térmica (°C)	10	10	15

1.6.5.4 Classes de proteção

As classes de proteção, de acordo com a IEC 60034-5, especificam como o motor é protegido contra contato e água. Estes são indicados com as letras IP e dois dígitos. O primeiro dígito indica a proteção contra contato e penetração por um objeto sólido. O segundo dígito indica a proteção contra a água. Por exemplo, IP23 representa: (2) proteção contra objetos sólidos maiores que 12 mm, (3) proteção contra pulverizações diretas de água até 60° da vertical. IP 54: (5) proteção contra poeira, (4) proteção contra água pulverizada de todas as direções. IP 55: (5) proteção contra poeira, (5) proteção contra jatos de água de baixa pressão de todas as direções.

1.6.5.5 Métodos de resfriamento

Os métodos de resfriamento de acordo com a IEC 60034-6 especificam como o motor é resfriado. Isso é designado com as letras IC seguidas por uma série de dígitos que representam o tipo de resfriamento (não ventilado, ventilado, resfriado forçado) e o modo de operação de resfriamento (resfriamento interno, resfriamento de superfície, resfriamento de circuito fechado, resfriamento de líquidos etc.).

1.6.5.6 Método de instalação

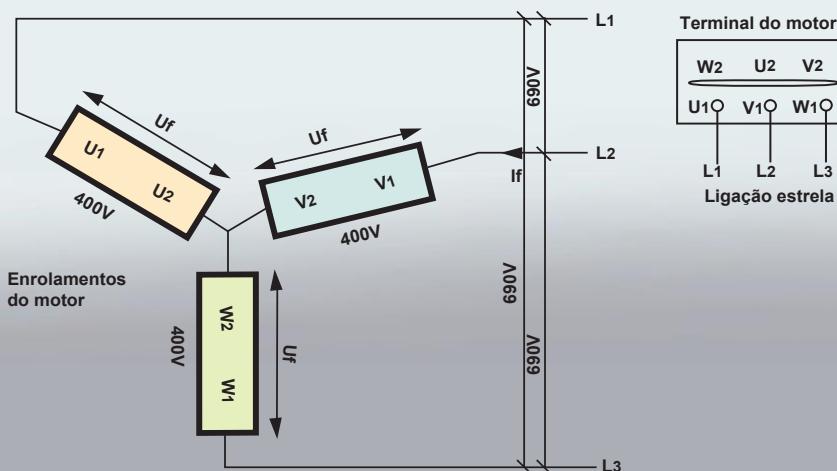
O método de instalação indica, de acordo com a IEC 60034-7, como o motor deve ser instalado. Isso é designado pelas letras IM e quatro dígitos. Por exemplo, IM 1001 representa: dois rolamentos, um eixo com uma extremidade livre do mancal e um corpo do estator com pés. IM 3001: dois mancais, um eixo com uma extremidade livre do mancal, um corpo do estator sem pés e um flange grande com orifícios de fixação simples.

1.6.5.7 Conexões estrela (Y) e triângulo (Δ)

Um motor elétrico trifásico pode ser conectado de duas maneiras: estrela (Y) ou triângulo (Δ). As fases do enrolamento em um motor trifásico são marcadas com U, V e W (U1-U2; V1-V2; W1-W2). Os padrões nos Estados Unidos fazem referência a T1, T2, T3, T4, T5, T6.

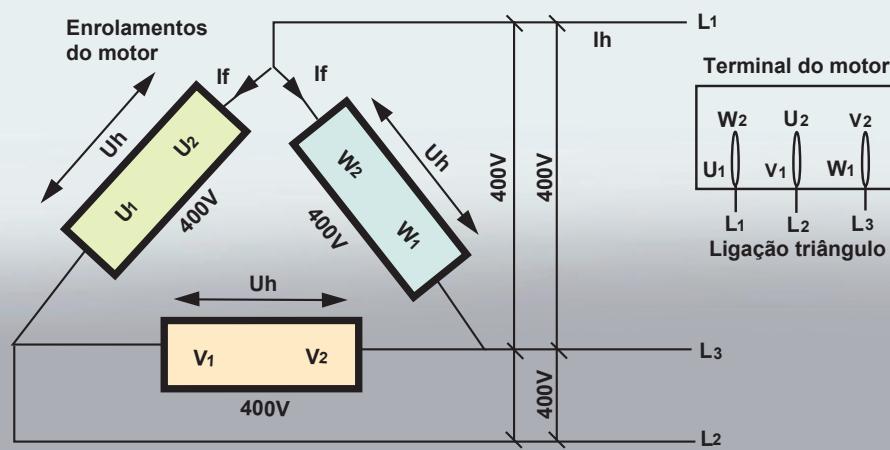
Com a conexão em estrela (Y), as "extremidades" das fases do enrolamento do motor são

1:25



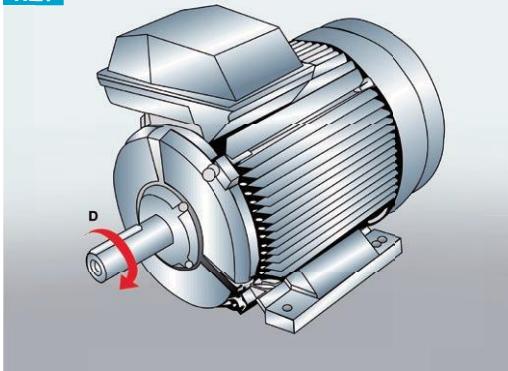
Isso ilustra os enrolamentos do motor conectados em configuração estrela e como as faixas de conexão são colocadas no terminal do motor com esta conexão. O exemplo mostra a conexão com uma fonte de 690V.

1:26



Isso ilustra os enrolamentos do motor conectados em configuração triângulo e como as faixas de conexão são colocadas no terminal do motor conectado em triângulo. O exemplo mostra a conexão com uma fonte de 400V.

1:27



A fonte de alimentação é conectada aos terminais de um motor trifásico marcados com U, V e W. A sequência de fases é L1, L2 e L3. Isso significa que o motor girará no sentido horário, olhando pelo lado "D" na extremidade do acionamento. Para fazer o motor girar no sentido anti-horário, dois dos três condutores conectados à chave de partida ou ao motor são comutados. Verifique o funcionamento da ventoinha de resfriamento quando rodar no sentido anti-horário.

unidas para formar um ponto zero, que se parece com uma estrela (Y).

Uma tensão de fase (tensão de fase = tensão de linha/principal / $\sqrt{3}$; por exemplo, 400V = 690 / $\sqrt{3}$) ficará nos enrolamentos. A corrente I_h em direção ao ponto zero se torna uma corrente de fase e, assim, uma corrente de fase fluirá $I_f = I_h$ através dos enrolamentos.

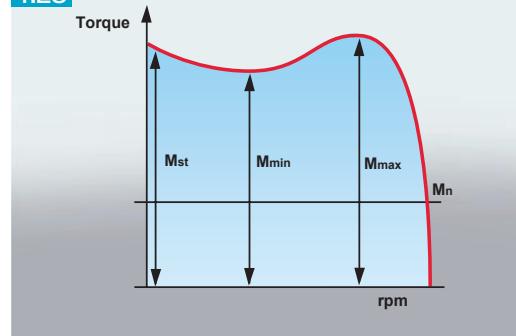
Com a conexão triângulo (Δ), o começo e o fim são unidos entre as diferentes fases, que formam um triângulo (Δ). Como resultado, haverá uma tensão de linha/principal nos enrolamentos. A corrente I_h no motor é a corrente de linha/principal e esta será dividida entre os enrolamentos para fornecer uma corrente de fase através deles, $I_h / \sqrt{3} = I_f$. O mesmo motor pode ser ligado com uma conexão em estrela de 690 V ou em triângulo de 400 V. Nos dois casos, a tensão nos enrolamentos será de 400 V. A corrente no motor será menor com uma conexão em estrela de 690 V do que com uma conexão triângulo de 400 V. A relação entre os níveis correntes é $\sqrt{3}$.

A placa do motor pode, por exemplo, indicar 690/400 V. Isso significa que a conexão em estrela é destinada a tensão mais alta e a conexão triângulo a mais baixa. A corrente, que também pode ser indicada na placa, mostra o valor mais baixo para o motor conectado em estrela e o valor mais alto para o motor conectado em triângulo.

1.6.5.8 Torque

O torque de rotação de um motor elétrico é uma identificação da capacidade de rotação do rotor. Cada motor possui um torque máximo. Uma carga acima desse torque significa que o motor não tem capacidade de girar. Com uma carga normal, o motor trabalha significativamente abaixo do seu torque máximo; no entanto, a sequência de partidas envolve uma carga extra. As características do motor são geralmente apresentadas em uma curva de torque.

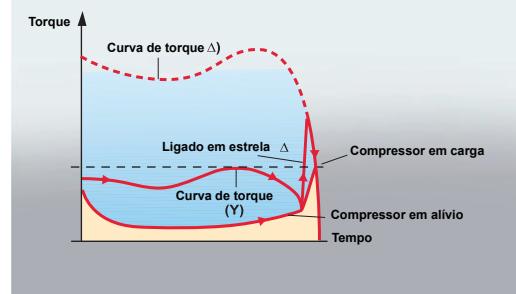
1:28



Curva de torque para um motor de indução de gaiola de esquilo. Quando o motor arranca, o torque é alto.

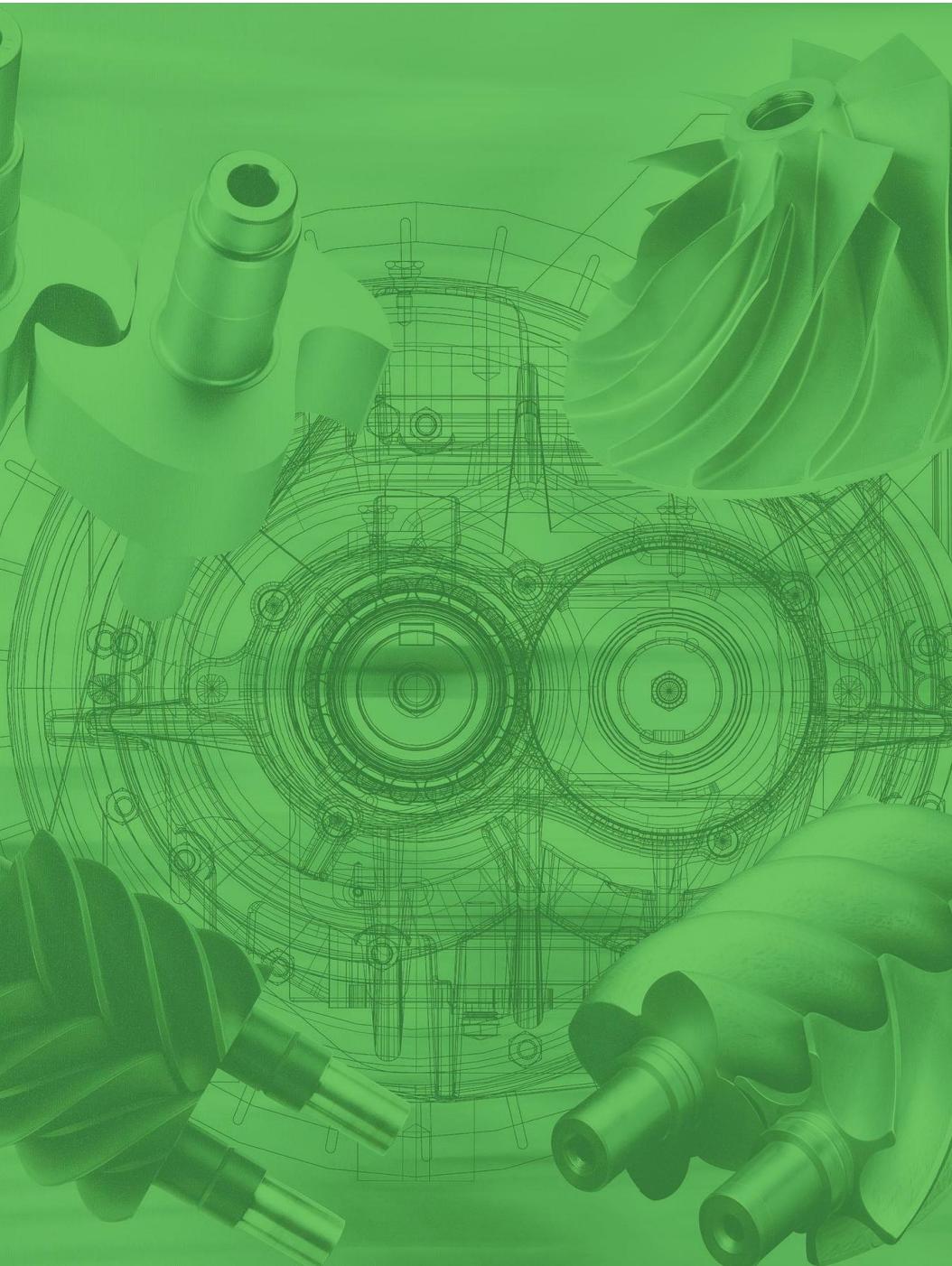
M_{st} = torque de partida, M_{\max} = torque máximo ("torque de corte"), M_{\min} = torque mínimo ("torque de sela"), M_n = torque nominal.

1:29



A curva estrela/triângulo iniciou o torque do motor de indução combinado com uma curva de demanda de torque para um compressor de parafuso. O compressor está em alívio (em vazio) durante a operação em estrela. Quando a velocidade atingir aprox. 90-95% da velocidade nominal, o motor é comutado para o modo triângulo, o torque aumenta, o compressor entra em carga e encontra o seu ponto de trabalho.

2 COMPRESSORES E EQUIPAMENTOS AUXILIARES



2.1 COMPRESSORES DE DESLOCAMENTO

2.1.1 Compressores de deslocamento

Um compressor de deslocamento envolve um volume de gás ou de ar e, em seguida, aumenta a pressão, reduzindo o volume fechado através do deslocamento de um ou mais componentes móveis.

2.1.2 Compressores de pistão

O compressor de pistão é o mais antigo e mais comum de todos os compressores industriais. Está disponível nas versões de simples ou duplo efeito, com lubrificação a óleo ou sem óleo, com várias quantidades de cilindros em diferentes configurações. Com exceção de compressores muito pequenos com cilindros verticais, a configuração em V é a mais comum para compressores pequenos.

Os compressores de grande porte e de duplo

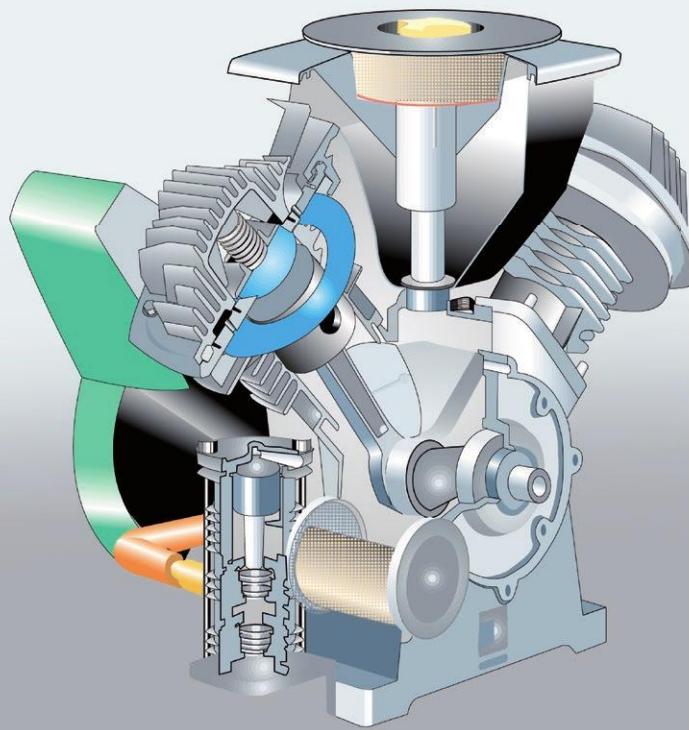
efeito, as configurações em L com um cilindro vertical de baixa pressão e um cilindro horizontal de alta pressão oferecem imensos benefícios e tornou-se o projeto mais comum.

Os compressores lubrificados a óleo normalmente trabalham com lubrificação por respingo ou lubrificação por pressão. A maioria dos compressores possui válvulas de ação automática. A válvula de ação automática abre e fecha através do efeito da diferença de pressão nos dois lados do disco da válvula.

2.1.3 Compressores de pistão isentos de óleo

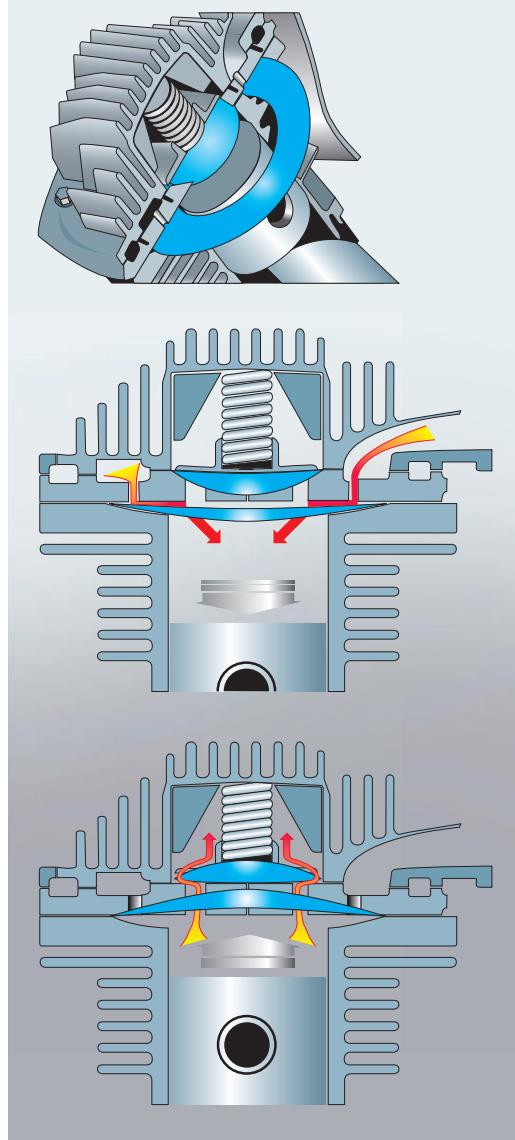
Os compressores de pistão isentos de óleo têm anéis de pistão feitos de PTFE ou de carbono e, alternativamente, as paredes do pistão e do cilindro podem ser perfiladas (dentadas) como nos compressores de labirinto. Máquinas maiores são equipadas com uma cruzeta e vedações nos pinos, além de uma peça intermediária ventilada para impedir que o óleo seja transferido do cárter e para dentro da câmara de compressão. Compressores menores geralmente têm o cárter com rolamentos com vedação permanente.

2:1



Compressor de pistão

2:2

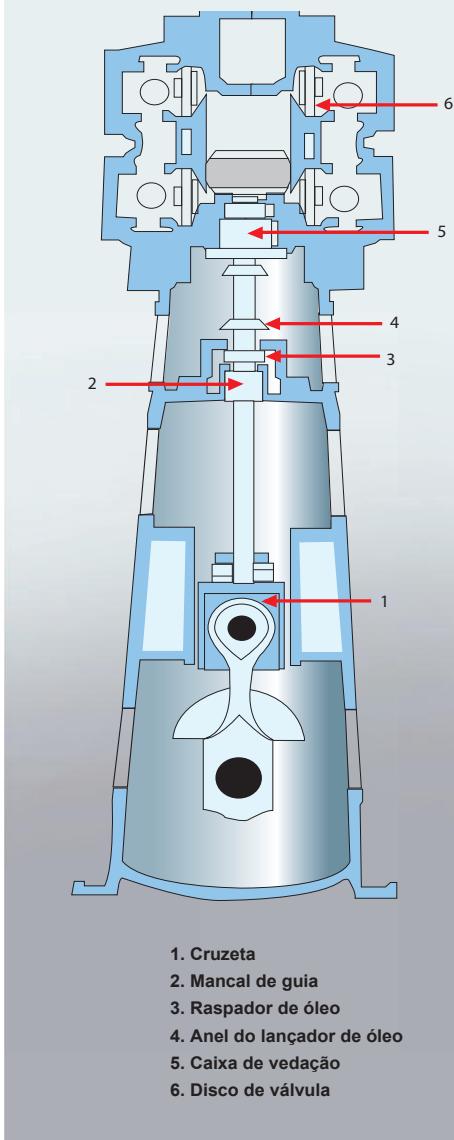


Compressor de pistão com sistema de válvulas composto por dois discos de válvula de aço inoxidável.

Quando o pistão se move para baixo e aspira o ar para dentro do cilindro, o disco maior flexiona para baixo, permitindo a passagem do ar.

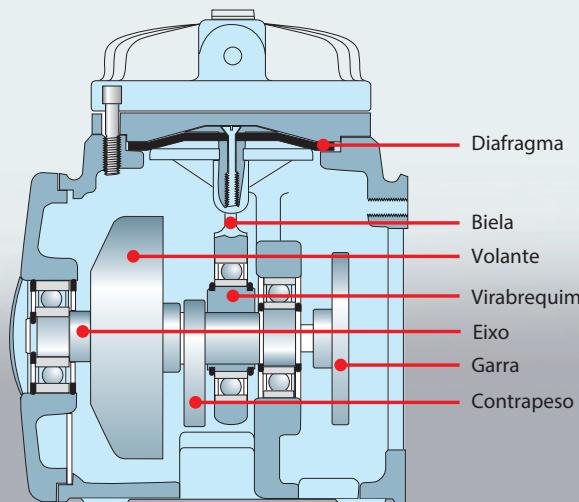
Quando o pistão se move para cima, o disco grande flexiona para cima e fecha contra o assento. A função de flexionar do disco pequeno permite que o ar comprimido seja forçado através do orifício na sede da válvula.

2:3



Compressor de pistão isento de óleo de duplo efeito e vedação de labirinto com cruzeta.

2:4



Compressor de diafragma mecânico, no qual um eixo de manivela convencional transfere o movimento alternativo através de uma biela para o diafragma.

2.1.4 Compressores de diafragma

Os compressores de diafragma formam outro grupo. Seu diafragma é acionado mecanicamente ou hidráulicamente. Os compressores de diafragma mecânicos são usados para uma pequena vazão e baixa pressão ou como bombas de vácuo. Os compressores de diafragma hidráulico são usados para aplicações de alta pressão.

2.1.5 Compressores de parafuso duplo

O princípio para um compressor de deslocamento rotativo em forma de parafuso duplo foi desenvolvido na década de 1930, quando era necessário um compressor rotativo com alta vazão e fluxo estável em condições variáveis de pressão.

As partes principais do elemento de parafuso duplo são os rotores macho e fêmea, que giram em direções opostas, enquanto o volume entre eles e o alojamento diminui. Cada elemento do parafuso possui uma relação de compressão fixa embutida que depende do seu comprimento, do passo do parafuso e da forma da abertura de descarga. Para obter a máxima eficiência, a relação de compressão interna deve ser adaptada a pressão de trabalho necessária.

O compressor de parafuso geralmente não é equipado com válvulas e não possui forças mecânicas que causam desequilíbrio. Isso significa que ele pode trabalhar com alta velocidade do eixo e pode combinar uma grande vazão com pequenas dimensões externas.

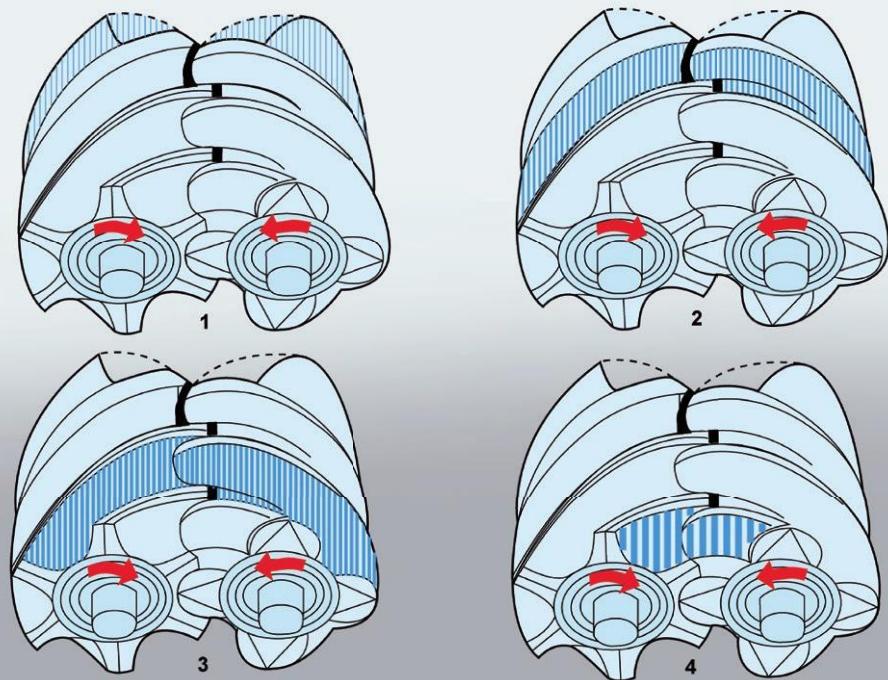
Uma força de atuação axial, que depende da diferença de pressão entre a entrada e a saída, deve ser superada pelos mancais.

2.1.5.1 Compressores de parafuso isentos

Os primeiros compressores de parafuso isentos tinham um perfil de rotor simétrico e não usavam nenhum líquido de refrigeração dentro da câmara de compressão. Estes foram chamados compressores de parafuso isentos de óleo ou secos. Os compressores de parafuso modernos, de alta velocidade e isentos de óleo têm perfis de parafuso assimétricos, resultando em uma melhoria significativa da eficiência energética, devido a redução de vazamentos internos.

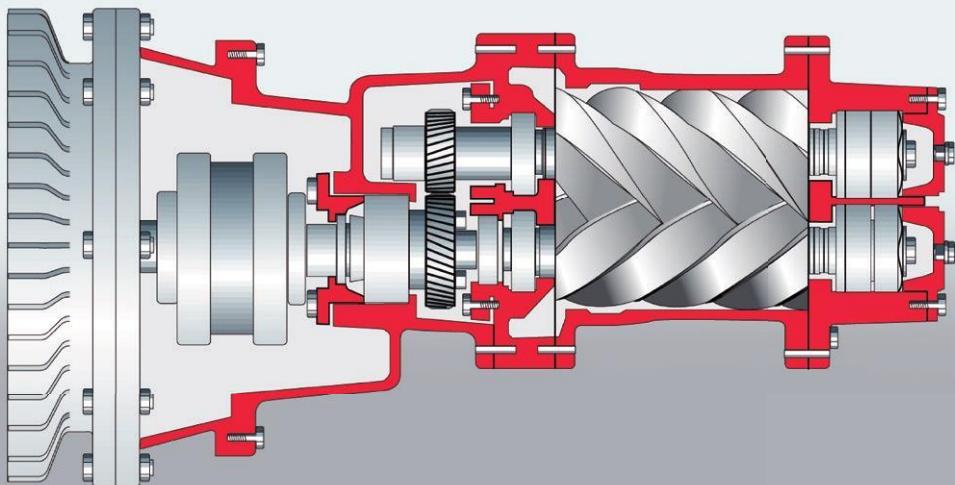
As engrenagens externas costumam ser usadas para sincronizar a posição dos rotores com rotação contrária. Como os rotores não entram em contato um com o outro e nem com a carcaça do compressor, nenhuma lubrificação é necessária dentro da câmara de compressão. Consequentemente, o ar comprimido é completamente isento de óleo. Os rotores e a caixa são fabricados com a máxima precisão para minimizar vazamentos desde o lado da pressão para a entrada. A relação de compressão incorporada é limitada pela diferença de temperatura entre a entrada e a descarga. É por isso que os compressores de parafuso isentos de óleo são frequentemente construídos com vários estágios e resfriamento entre esses estágios para atingir pressões mais altas.

2:5



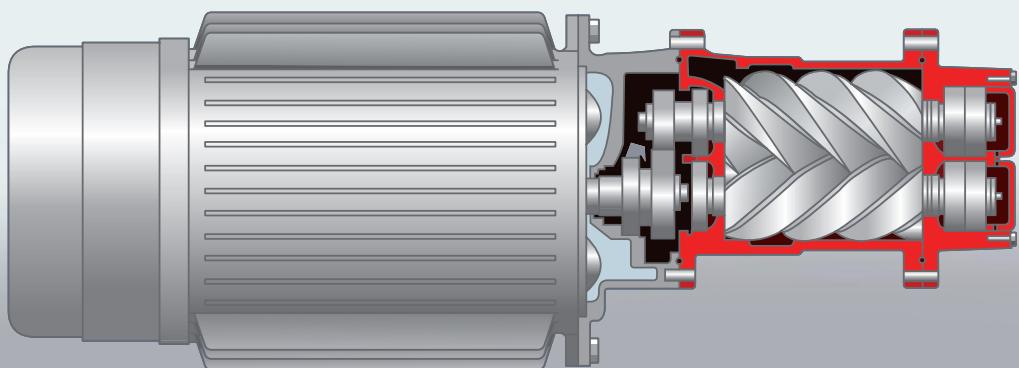
Isso ilustra a compressão de um compressor de parafuso duplo. Figura 1: o ar preenche o espaço entre os rotores; Fig. 2-4: gradualmente o espaço fechado diminui e a pressão aumenta.

2:6



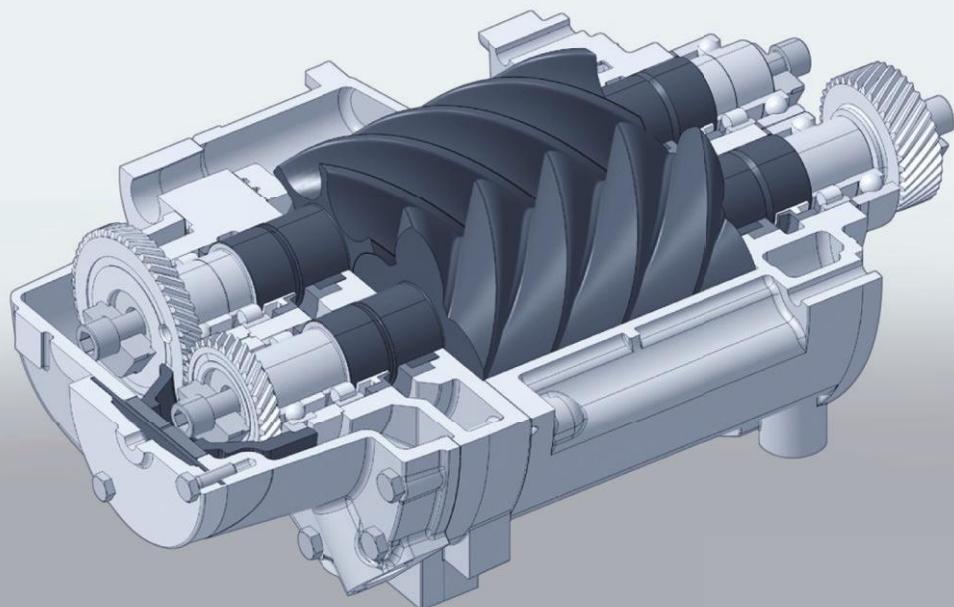
Elemento e funcionamento típicos de compressor de parafuso lubrificado a óleo.

2:7



Um moderno compressor de parafuso lubrificado a óleo com acionamento integrado

2:8



Estágio de compressor de parafuso isento de óleo, com carcaça do rotor resfriada a água, vedações de ar e vedações de óleo nas duas extremidades e um conjunto de engrenagens de sincronização para manter as folgas do rotor muito pequenas.

2.1.5.2 Compressores de parafuso com injeção de líquido

Nos compressores de parafuso injetados com líquido, um líquido é injetado na câmara de compressão e frequentemente nos mancais do compressor. Sua função é resfriar e lubrificar as partes móveis do elemento compressor, resfriar o ar sendo comprimido internamente e reduzir o vazamento de retorno para a entrada. Hoje, o óleo é o líquido injetado mais comumente usado devido as suas boas propriedades de lubrificação e vedação; no entanto, outros líquidos também são usados, por exemplo, água ou polímeros. Os elementos do compressor de parafuso injetado a líquido podem ser fabricados para altas relações de compressão, com um estágio de compressão que é geralmente suficiente para pressões de até 14 bar e mesmo 17 bar, embora com maior custo devido a eficiência energética reduzida.

2.1.6 Compressores vírgula

O elemento de compressão em um compressor de vírgula consiste em dois rotores que giram em direções opostas dentro de uma câmara de compressão.

O processo de compressão consiste na entrada, compressão e saída. Durante a fase de admissão, o ar é aspirado para a câmara de compressão até os rotores bloquearem a entrada. Durante a fase de compressão, o ar aspirado é comprimido na câmara de compressão, que diminui a medida que os rotores giram.

A porta de saída é bloqueada durante a compressão por um dos rotores, enquanto a entrada está aberta para aspirar novo ar na seção oposta da câmara de compressão.

2:9

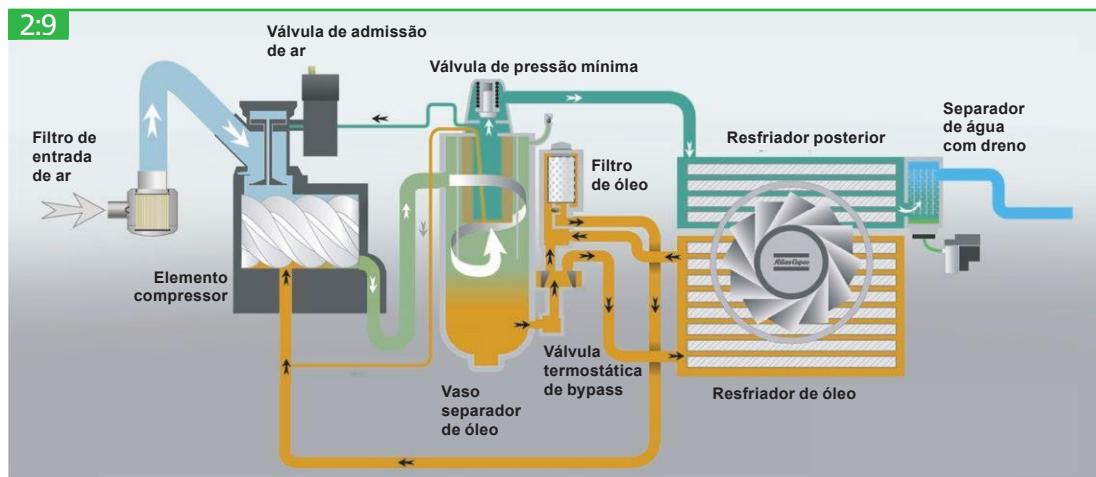


Diagrama de fluxo do compressor de parafuso com injeção de óleo

2:10

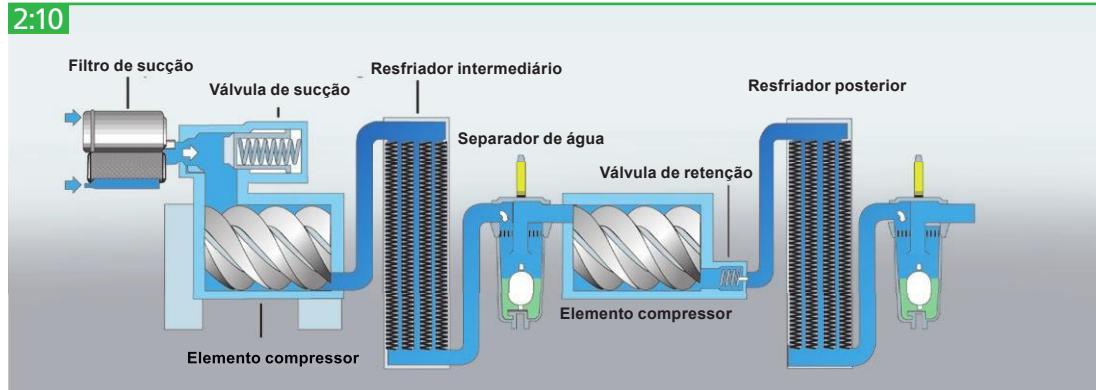
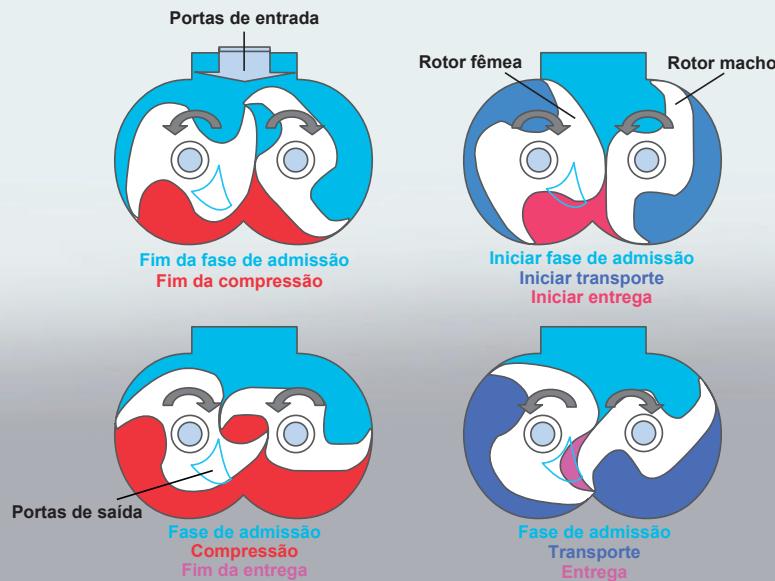


Diagrama de fluxo do compressor de parafuso isento de óleo.

2:11



Princípio de compressão do compressor de vírgula

A descarga ocorre quando um dos rotores abre a porta de saída e o ar comprimido é forçado a sair da câmara de compressão.

Ambos os rotores são sincronizados através de um conjunto de rodas dentadas. A máxima relação de compressão obtida por um compressor de vírgula isentos de óleo é limitada pela diferença de temperatura entre a entrada e a descarga. Consequentemente, vários estágios com resfriamento intermediário são necessários para pressões mais altas.

2.1.7 Compressores scroll

Um compressor scroll é do tipo de deslocamento em órbita isento de óleo (geralmente), isto

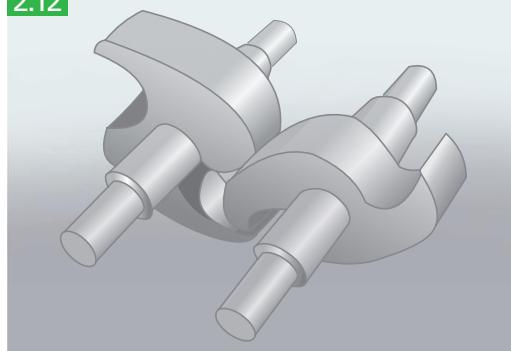
é, comprime uma quantidade específica de ar em um volume continuamente decrescente. O elemento compressor consiste em uma espiral estator fixada em um alojamento e uma espiral orbital excêntrica acionada por motor. As espirais são montadas com deslocamento de fase de 180° para formar bolsas de ar com volume que varia gradualmente.

Isso fornece estabilidade radial aos elementos scroll. O vazamento é minimizado porque a diferença de pressão nos bolsões de ar é menor do que a diferença de pressão entre a entrada e a saída.

A espiral em órbita é acionada por um eixo de manivela de curso curto e corre excentricamente ao redor do centro da espiral fixa. A entrada está situada na parte superior do alojamento do elemento.

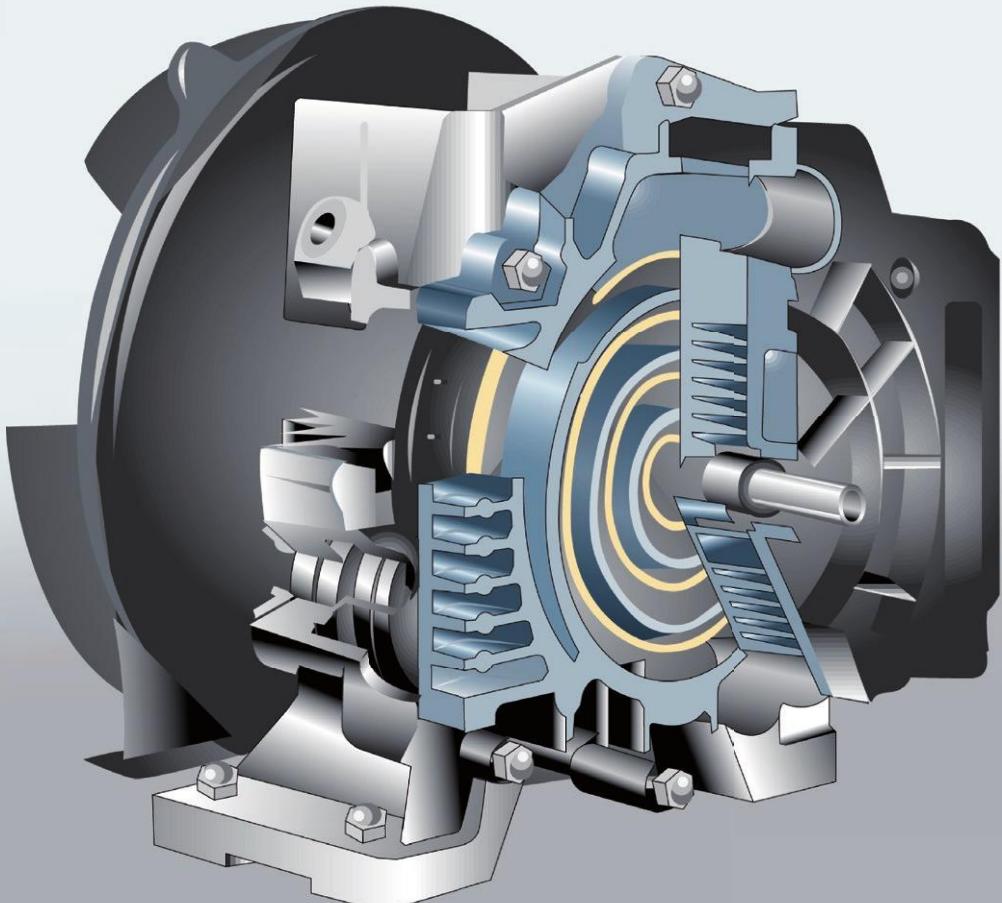
Quando a espiral em órbita se move, o ar é aspirado e capturado em uma das bolsas de ar, onde é comprimido gradualmente enquanto se move em direção ao centro, onde a porta de saída e uma válvula de retenção estão localizadas. O ciclo de compressão continua por 2,5 voltas, o que praticamente fornece fluxo de ar constante e sem pulsações. O processo é relativamente silencioso e livre de vibração, pois o elemento tem praticamente nenhuma variação de torque em comparação com um compressor de pistão, por exemplo.

2:12



Conjunto de rotores de um compressor de vírgula duplos.

2:13



Seção transversal do compressor scroll

2:14



Princípio de compressão de um compressor scroll

2.1.8 Compressores de palhetas

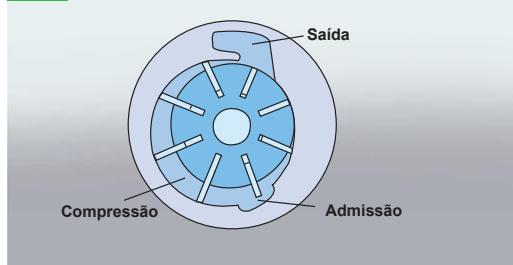
O princípio de operação de um compressor de palhetas é o mesmo de muitos motores por expansão de ar comprimido. As palhetas são geralmente fabricadas com ligas fundidas especiais e a maioria dos compressores de palhetas é lubrificada a óleo.

Um rotor com palhetas radiais móveis em forma de lâmina é montado excentricamente em uma carcaça do estator. Quando gira, as palhetas são pressionadas contra as paredes do estator por força centrífuga. O ar é aspirado quando a distância entre o rotor e o estator aumenta. O ar é capturado em diferentes bolsos de ar do compressor, que diminuem de volume com a rotação. O ar é descarregado quando as palhetas passam pela porta de saída.

2.1.9 Sopradores roots

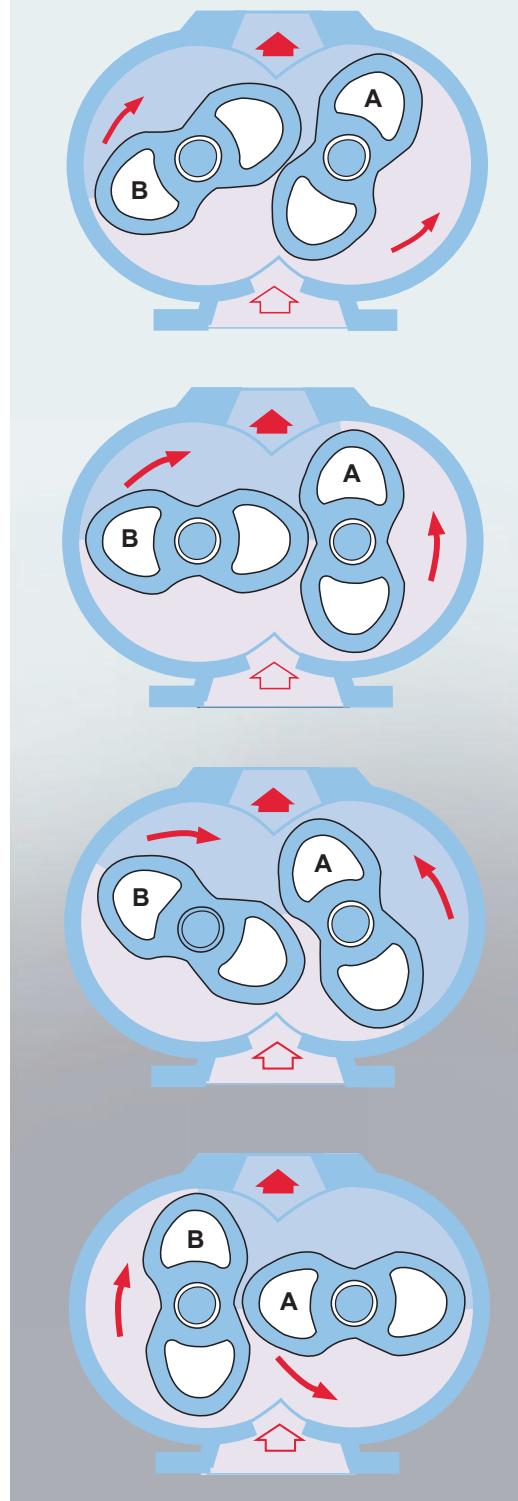
Um soprador Roots é um compressor de deslocamento sem válvula, sem compressão interna. Quando a câmara de compressão entra em contato com a porta de saída, o ar comprimido volta para o alojamento do lado da pressão. Posteriormente, uma compressão adicional ocorre quando o volume da câmara de compressão diminui ainda mais com a rotação contínua. Consequentemente, a compressão tem lugar contra a contrapressão total, o que resulta em baixa eficiência e alto nível de ruído.

2:15



Dois rotores com rotação contrária, idênticos, geralmente simétricos, trabalham em um alojamento e são sincronizados por meio de um conjunto de rodas dentadas. Os sopradores geralmente são resfriados a ar e isentos de óleo. Sua baixa eficiência limita esses sopradores a aplicações de pressão muito baixa e compressão em um único estágio, mesmo se houver versões de dois e três estágios. Os sopradores roots são fre-

2:16



Princípio de compressão de um soprador roots

quentemente usados como bombas de vácuo e para transporte pneumático.

2.2 COMPRESSORES DINÂMICOS

2.2.1 Compressores dinâmicos em geral

Os compressores dinâmicos estão disponíveis nos modelos axial e radial. Eles são frequentemente chamados de turbocompressores. Aqueles com design radial são chamados de compressores centrífugos. Um compressor dinâmico trabalha a uma pressão constante, ao contrário de, por exemplo, um compressor de deslocamento, que trabalha com um fluxo constante. O desempenho de um compressor dinâmico é afetado por condições externas: por exemplo, uma alteração na temperatura de entrada resulta em alteração na capacidade.

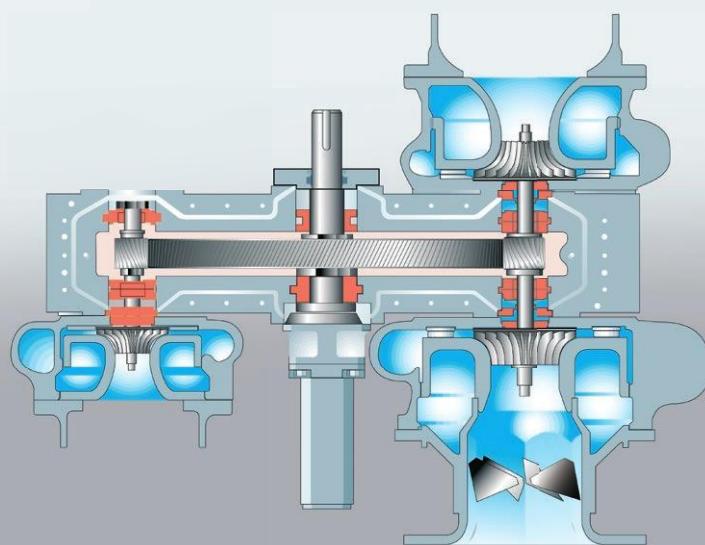
2.2.2 Compressores centrífugos

Um compressor centrífugo é caracterizado por seu fluxo de descarga radial. O ar é aspirado para o centro de um impeller rotativo com pás radiais e é empurrado para fora em direção ao perímetro do rotor pelas forças centrífugas. O movimento radial do ar resulta simultaneamen-

te num aumento de pressão e geração de energia cinética. Antes de o ar ser levado ao centro do impeller do próximo estágio do compressor, ele passa por um difusor e uma voluta, onde a energia cinética é convertida em pressão.

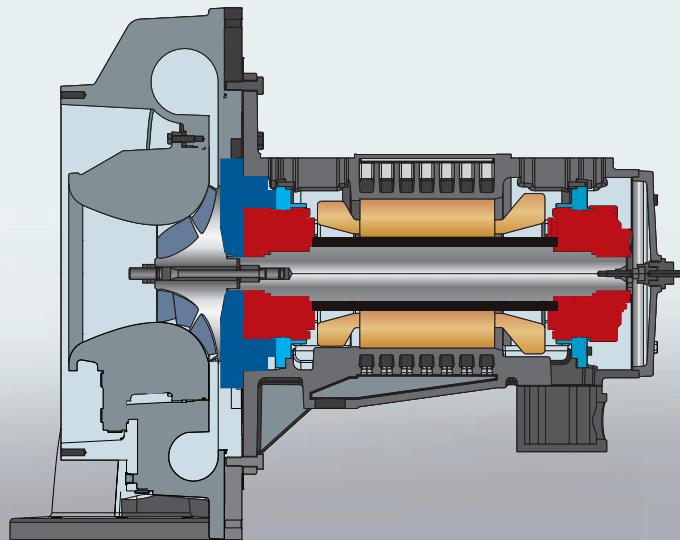
Cada estágio assume parte do aumento geral da pressão da unidade compressor. Em empresas de máquinas industriais, a relação de compressão máxima de um estágio de um compressor centrífugo geralmente não é superior a 3. Taxas de compressão mais altas reduzem a eficiência do estágio. Aplicações de estágio único de baixa pressão são usadas, por exemplo, em estações de tratamento de águas residuais. Aplicações em vários estágios permitem fazer inter-resfriamento entre eles para reduzir o consumo de energia. Vários estágios podem ser organizados em série em um único eixo de baixa velocidade. Esse conceito é frequentemente usado na indústria de petróleo e gás, ou de processo. A relação de compressão por estágio é baixa, mas um grande número de estágios e/ou vários conjuntos de compressores em série são usados para atingir a pressão de saída desejada. Para aplicações de compressão de ar, uma caixa de engrenagens de alta velocidade é integrada aos estágios do compressor para girar os impellers por meio de pinhões de alta velocidade. O impeller pode ter um design aberto ou fechado. O design aberto é mais comumente usado para aplicações de ar de alta velocidade. O impeller é normalmente feito de liga de aço inoxidável especial ou de alumínio. A velocidade do eixo do impel-

2:17



Compressor centrífugo de engrenagem integral, com três estágios.

2:18



Compressor centrífugo moderno de alta velocidade e acionamento direto.

ler é muito alta em comparação com a de outros tipos de compressor. Velocidades de 15.000 a 100.000 rpm são comuns.

Isso significa que o mancal no eixo ou no pinhão do compressor de alta velocidade costume ser de filme de óleo simples ao invés de rolamentos de rolos.

Como alternativa, mancais de filme pneumático ou rolamentos magnéticos ativos podem ser usados para uma máquina totalmente isenta de óleo. Dois impellers são montados em cada extremidade do mesmo eixo para neutralizar as cargas axiais causadas pelas diferenças de pressão. Normalmente, 2 ou 3 estágios com resfriadores intermediários são usados para aplicações padrões de ar comprimido.

Numa configuração moderna de compressor de ar centrífugo, motores elétricos de velocidade muito alta são usados para acionar os impellers diretamente. Essa tecnologia cria um compressor

compacto, sem caixa de engrenagens e sistema de lubrificação a óleo, tornando-o um projeto de compressor totalmente isento de óleo.

Cada compressor centrífugo deve ser vedado de maneira adequada para reduzir o vazamento ao longo do eixo que passa através da carcaça do compressor.

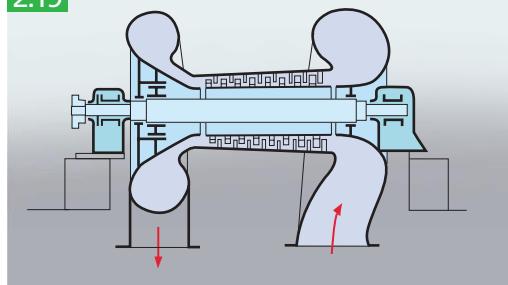
Muitos tipos de vedantes são usados e os mais avançados podem ser encontrados em compressores de alta velocidade destinados a altas pressões. Os tipos mais comuns são vedações de labirinto, vedações de anel ou vedações de folga controlada, (selos de grafite, usualmente) e selos mecânicos.

2.2.3 Compressores axiais

O compressor axial tem fluxo axial, pelo qual o ar ou o gás passa ao longo do eixo do compressor através de fileiras de pás rotativas e estacionárias. Dessa maneira, a velocidade do ar aumenta gradualmente ao mesmo tempo em que as pás estacionárias convertem a energia cinética em pressão. Geralmente, um tambor de equilíbrio é embutido no compressor para contrabalançar o impulso axial.

Os compressores axiais são geralmente menores e mais leves do que os compressores centrífugos equivalentes e normalmente operam em velocidades mais altas. Eles são usados para vazões de volume alto e constante, a uma pressão relativamente moderada, por exemplo, em sistemas de ventila-

2:19



Compressor axial

ção. Devido a alta velocidade de rotação, eles são acoplados especialmente a turbinas a gás para geração de eletricidade e propulsão de aeronaves.

2.3 OUTROS COMPRESSORES

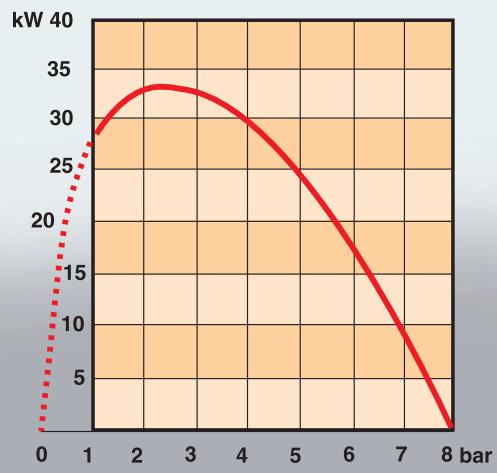
2.3.1 Bombas de vácuo

Vácuo significa uma pressão menor do que a pressão atmosférica. Uma bomba de vácuo é um compressor que comprime o vácuo a pressões mais altas, geralmente a pressão atmosférica. Uma característica típica de uma bomba de vácuo é que ela trabalha com uma relação de compressão muito alta. Isso explica por que máquinas com vários estágios são usadas com frequência. Os compressores de ar de vários estágios também podem ser usados para vácuo dentro da faixa de pressão de 1 bar (a) e 0,1 bar (a).

2.3.2 Compressores booster

Um compressor booster comprime o ar comprimido a uma pressão muito maior. Pode ser usado para compensar a queda de pressão em tubulações longas ou para aplicações nas quais é necessária uma pressão mais alta para um subprocesso. Os compressores booster podem ser de um único estágio ou de múltiplos, podem ser do tipo dinâmico ou de deslocamento, mas os compressores de pistão são os mais comuns. A potência

2:21



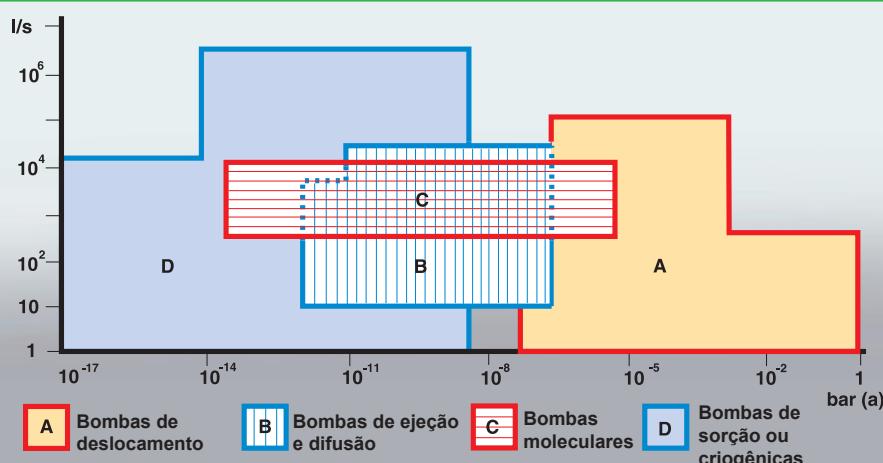
Potência adiabática requerida para um compressor booster com pressão final absoluta de 8 bar (a).

requerida para um compressor booster aumenta a medida que a taxa de compressão aumenta, enquanto o fluxo de massa diminui. A curva de consumo de energia em função da pressão de entrada tem a mesma forma geral que a curva de uma bomba de vácuo.

2.3.3 Intensificadores de pressão

Os intensificadores de pressão são uma versão de compressores auxiliares, acionados pelo próprio meio - ar comprimido (chamado de propulsor). Eles podem aumentar a pressão em um meio para aplicações especiais: para testes de válvulas

2:20

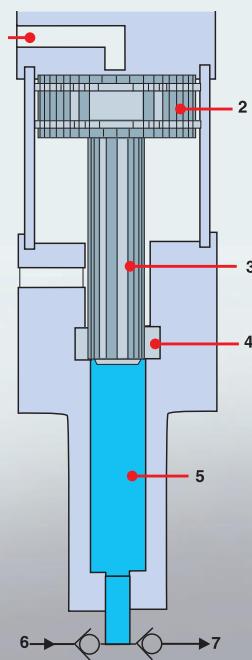


Faixa de trabalho para alguns tipos de bombas de vácuo

em laboratório, tubos e mangueiras. Uma pressão de 7 bar pode ser amplificada em um único estágio para 200 bar ou até 1700 bar em equipamentos de várias estágios. O intensificador de pressão é disponível apenas para fluxos muito pequenos.

Quando o propulsor flui, o pistão de baixa pressão é pressionado para baixo e força o meio na câmara de compressão de alta pressão para fora, em alta pressão. O intensificador pode funcionar em um processo de ciclo, até um nível de pressão predefinido. Todos os gases inertes podem ser comprimidos dessa maneira. O ar também pode ser comprimido em um intensificador de pressão, mas deve ser completamente isento de óleo para evitar a autoignição.

2.22



1. Propulsor
2. Pistão de baixa pressão
3. Pistão de alta pressão
4. Vedação
5. Câmara de compressão
6. Admissão
7. Saída

Seção transversal de um intensificador de pressão de estágio único.

2.4 TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO

2.4.1 Secagem de ar comprimido

Todo o ar atmosférico contém vapor de água: mais a altas temperaturas e menos a baixas temperaturas. Quando o ar é comprimido, a concentração de água aumenta. Por exemplo, um compressor com pressão de trabalho de 7 bar e capacidade de 200 l/s que comprime o ar a 20°C com uma umidade relativa de 80% libera 10 litros/hora de água na linha de ar comprimido. Para evitar problemas e perturbações devido a precipitação de água nos tubos e nos equipamentos conectados, o ar comprimido deve ser seco. Isso ocorre usando um equipamento de resfriamento posterior e secagem.

O termo "ponto de orvalho na pressão" (PDP) é usado para descrever o conteúdo de água no ar comprimido. É a temperatura na qual o vapor de água condensa na pressão de trabalho atual. Baixos valores de PDP indicam pequenas quantidades de vapor de água no ar comprimido.

É importante lembrar que o ponto de orvalho atmosférico não pode ser relacionado ao PDP ao comparar diferentes secadores. Por exemplo, um PDP de +2°C a 7 bar é equivalente a -23°C na pressão atmosférica. Usar um filtro para remover a umidade (para abaixar o ponto de orvalho) não funciona. Isso ocorre porque um resfriamento adicional leva a precipitação contínua da água de condensação. Você pode selecionar o tipo principal de equipamento de secagem com base no ponto de orvalho na pressão. Ao considerar o custo, quanto menor for o ponto de orvalho necessário, maior será o investimento e os custos operacionais para a secagem do ar.

Existem cinco técnicas para remover a umidade do ar comprimido: resfriamento mais separação, sobrepressão, membranas, secagem por absorção e adsorção.

2.4.1.1 Resfriador posterior

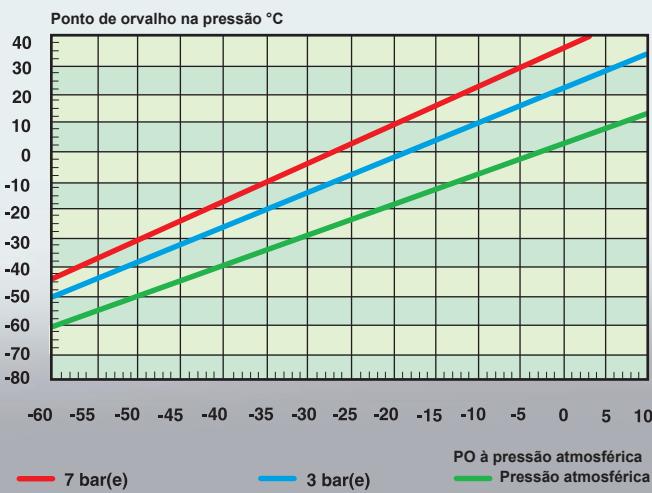
O resfriador posterior é um trocador de calor que resfria o ar comprimido quente para precipitar a água, que de outra forma seria condens-

2:23



Ao comprimir o ar a 20°C, um compressor que fornece 200 litros/segundo de ar também fornece aprox. 10 litros/hora de água. Problemas devido à precipitação de água nos tubos e equipamentos são evitados pelo uso de equipamentos de pós-resfriamento e secagem.

2:24



Relação entre ponto de orvalho e ponto de orvalho na pressão.

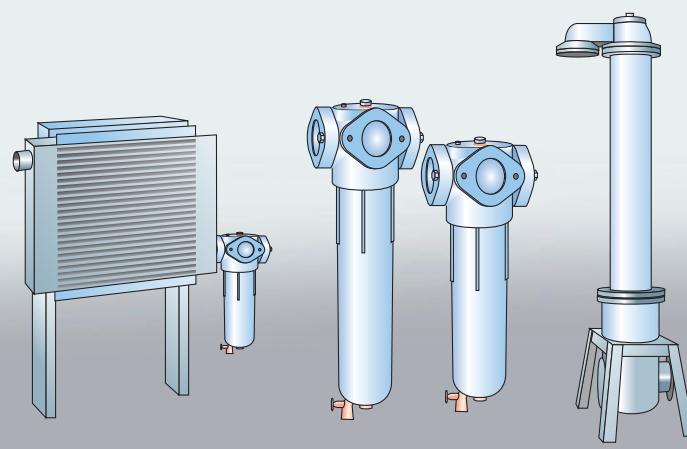
sada no sistema de tubulação. É resfriado a água ou a ar, geralmente é equipado com um separador de água com drenagem automática e deve ser colocado próximo ao compressor.

Aproximadamente 80-90% da água de condensação precipitada é coletada no separador de água do resfriador posterior. É comum a temperatura do ar comprimido, após passar pelo resfriador posterior, ser de aprox. 10°C acima da temperatura do líquido de resfriamento. Entretanto, esse valor pode variar dependendo do tipo de resfriador. O resfriador posterior é usado em praticamente todas as instalações estacionárias. Na maioria dos casos, um resfriador posterior é incorporado aos compressores modernos.

2.4.1.2 Secador por refrigeração

A secagem por refrigeração significa que o ar comprimido é resfriado, o que permite que uma grande quantidade de água se condense e se separe. Após o resfriamento e a condensação, o ar comprimido é reaquecido a temperatura ambiente, para que não ocorra condensação na parte externa do sistema de tubulação. Essa troca de calor entre o ar comprimido de entrada e de saída também reduz a temperatura do ar comprimido recebido e, como tal, reduz a capacidade de refrigeração necessária do circuito de refrigerante. O resfriamento do ar comprimido ocorre através de um sistema de refrigerante fechado. A operação excelente do compressor de refrigeração, por meio de algoritmos de controle inteligentes, pode reduzir significativamente o

2:25



Diferentes resfriadores posteriores e separadores de água. Os separadores de água podem trabalhar com a separação por ciclone ou separação por mudanças de direção e velocidade

consumo de energia dos secadores por refrigeração modernos. Os secadores por refrigeração são usados para pontos de orvalho entre + 2°C e + 10°C e têm um limite de temperatura mais baixo, que é o ponto de congelamento da água condensada. Esses secadores estão disponíveis como máquinas independentes ou como um módulo de secagem integrado dentro do compressor. Este último tem a vantagem de ter uma área ocupada pequena e garantir desempenho ideal para atender a capacidade específica do compressor de ar.

Os secadores por refrigeração modernos usam gases refrigerantes com baixo potencial de aquecimento global (GWP), o que significa que se esses gases refrigerantes forem liberados acidentalmente na atmosfera, eles contribuirão menos para o aquecimento global. Os refrigerantes futuros terão um valor GWP ainda mais baixo, conforme ditado pela legislação ambiental.

2.4.1.3 Sobrecompressão

A sobrecompressão é talvez o método mais fácil para secar o ar comprimido.

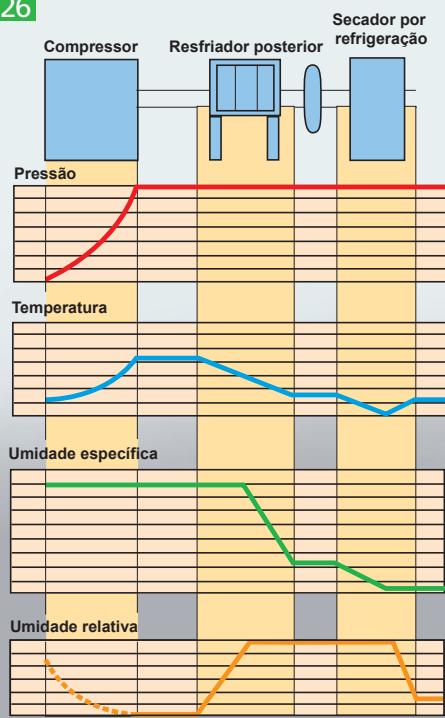
Inicialmente o ar é comprimido a uma pressão mais alta do que a pressão de trabalho pretendida, o que significa que a concentração de vapor de água aumenta. Depois disso, o ar é resfriado e a água é separada como resultado. Finalmente, é permitido que o ar se expanda para a pressão de trabalho requerida e é atingido um PDP mais baixo.

No entanto, esse método é adequado apenas para vazões de ar muito pequenas, devido ao seu alto consumo de energia.

2.4.1.4 Secador por absorção

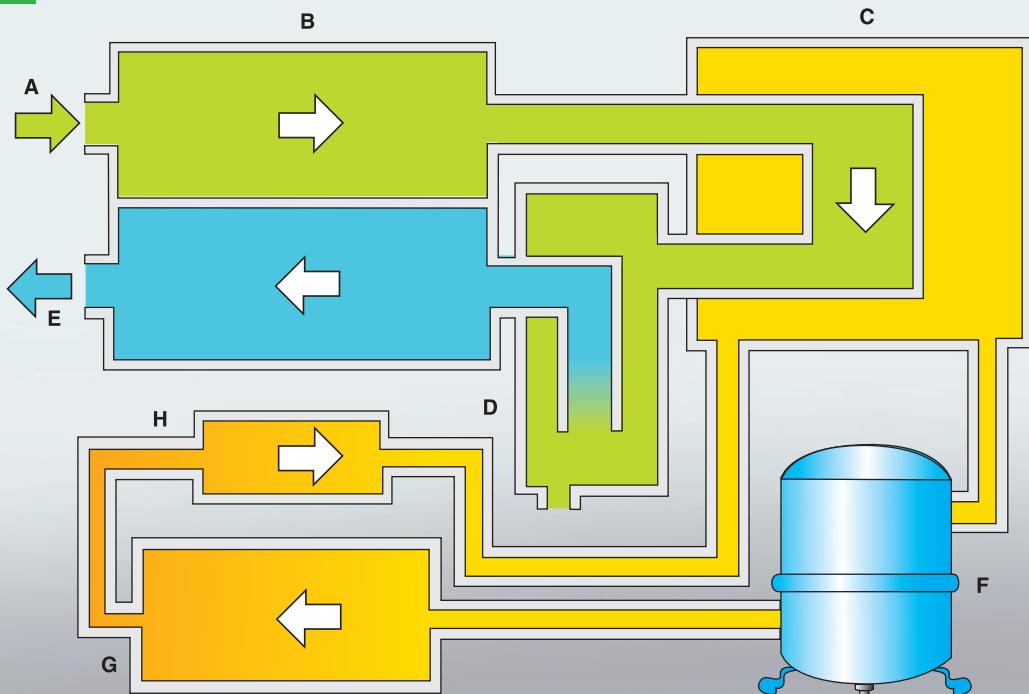
A secagem por absorção é um processo químico no qual o vapor de água é ligado ao material de absorção.

2:26



Alterações típicas de parâmetros como compressão, pós-resfriamento e secagem por refrigeração.

2:27



- A Entrada de ar comprimido
- B Trocador de calor ar/ar
- C Trocador de calor ar/líquido de refrigeração
- D Separador de água

- E Ar comprimido seco
- F Compressor
- G Condensador
- H Válvula de expansão

Princípio operacional de um secador por refrigeração

O material de absorção pode ser sólido ou líquido. O cloreto de sódio e o ácido sulfúrico são frequentemente usados, o que significa que a possibilidade de corrosão deve ser levada em consideração. Este método é incomum e envolve alto consumo de materiais absorventes. O ponto de orvalho é reduzido apenas em uma extensão limitada.

2.4.1.5 Secador por adsorção

O princípio geral de funcionamento dos secadores por adsorção é simples: o ar úmido flui sobre o material higroscópico (os materiais típicos usados são sílica gel, peneiras moleculares, alumina ativada) e, portanto, é seco.

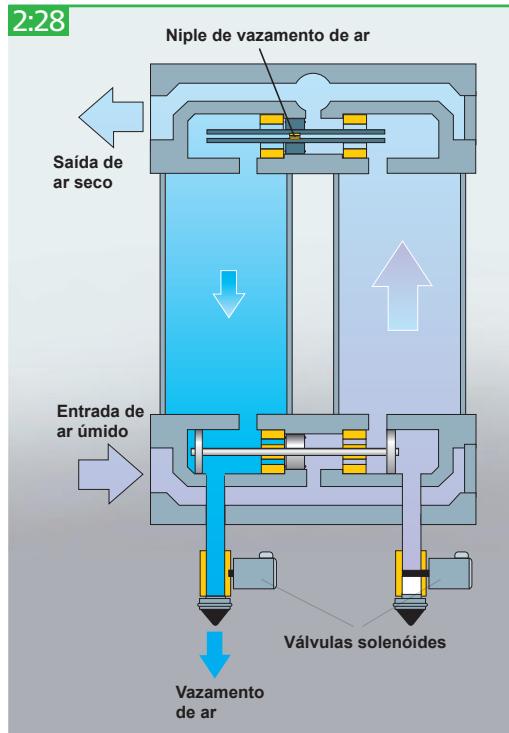
A passagem de vapor de água do ar comprimido úmido para o material higroscópico ou "dessecante" faz com que o dessecante seja gradualmente saturado com água adsorvida. Portanto, o dessecante precisa ser regenerado

regularmente para recuperar a sua capacidade de secagem. Os secadores de adsorção são tipicamente construídos com dois vasos de secagem para esse fim: o primeiro vaso seca o ar comprimido recebido enquanto o segundo está sendo regenerado. Cada vaso ("torre") alterna tarefas quando a outra torre é completamente regenerada. O PDP típico que pode ser alcançado é de -40°C, o que torna esses secadores adequados para fornecer ar muito seco para aplicações mais críticas.

Existem 4 maneiras diferentes de regenerar o dessecante, e o método usado determina o tipo de secador por adsorção. Tipos mais eficientes em termos de energia são geralmente mais complexos e, portanto, mais caros.

- 1) Secadores por adsorção regenerados por purga (também chamados de "secadores do tipo

2:28



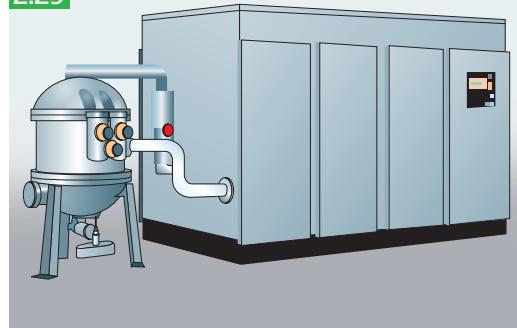
Secador de adsorção regenerada por purga (também chamado de "secador do tipo sem aquecimento").

sem aquecimento"). Esses secadores são mais adequados para vazões menores de ar. O processo de regeneração ocorre com a ajuda de ar comprimido expandido ("purgado") e requer aprox. 15–20% da capacidade nominal do secador a pressão de trabalho de 7 bar (e).

2) Secadores regenerados por purga aquecida. Esses secadores aquecem o ar de purga expandido por meio de um aquecedor de ar elétrico e, portanto, limitam o fluxo de purga necessário em cerca de 8%. Esse tipo consome 25% menos energia do que os secadores do tipo sem aquecimento.

3) Secadores regenerados por soprador. O ar ambiente é soprado sobre um aquecedor elétrico e colocado em contato com o dessecante úmido para regenerá-lo. Com este tipo de secador, nenhum ar comprimido é usado para regenerar o material dessecante. Portanto, o consumo de energia é 40% menor do que nos secadores do tipo sem aquecimento.

2:29



Compressor de parafuso isento de óleo com um secador por adsorção modelo MD.

4) Secadores “calor da compressão” (secadores “HOC”).

Nos secadores HOC, o dessecante é regenerado usando o calor disponível do compressor. Em vez de retirar o calor do ar comprimido em um resfriador posterior, o ar quente é usado para regenerar o dessecante.

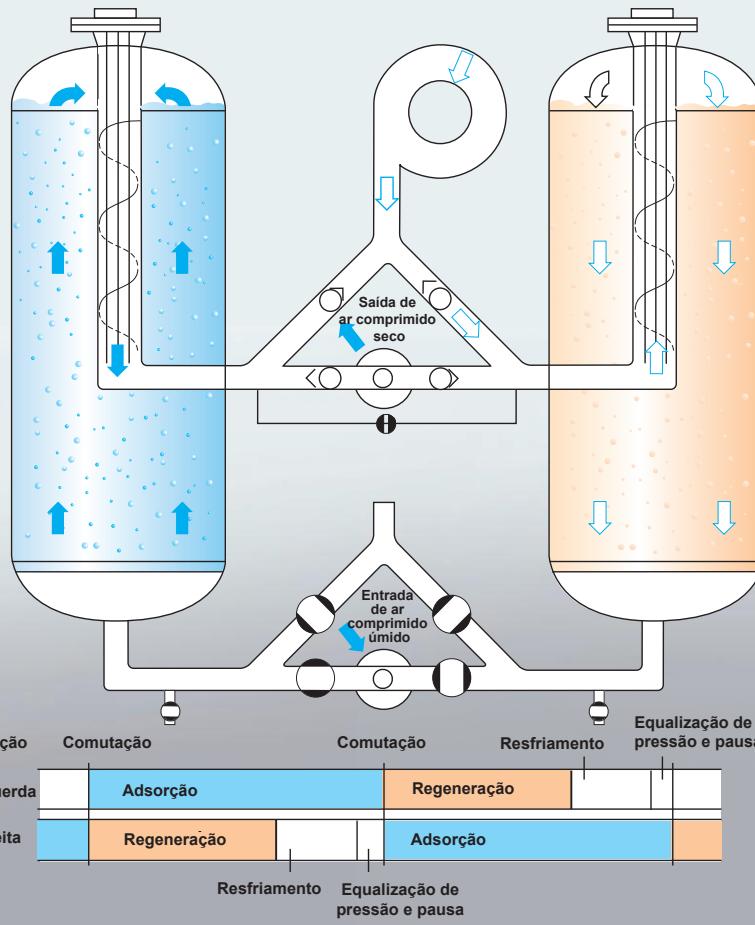
Esse tipo de secador pode fornecer um PDP típico de -20°C, sem a adição de energia. Um PDP mais baixo também pode ser obtido adicionando aquecedores extras.

A separação e a drenagem garantidas da água de condensação sempre devem ser organizadas antes da secagem por adsorção. Se o ar comprimido tiver sido produzido usando compressores lubrificados a óleo, um filtro de separação de óleo também deve ser instalado a montante do equipamento de secagem. Na maioria dos casos, é necessário um filtro de partículas após a secagem por adsorção.

Os secadores HOC podem ser usados apenas com compressores isentos de óleo, pois produzem calor a temperaturas suficientemente altas para a regeneração do secador.

Um tipo especial de secador HOC é o secador de adsorção de tambor rotativo. Esse tipo de secador possui um tambor rotativo cheio de dessecante, do qual um setor (um quarto) é regenerado por meio de um fluxo parcial de ar comprimido quente (a 130–200°C) proveniente do compressor. O ar regenerado é posteriormente resfriado, a condensação é drenada e o ar é retornado através de um dispositivo ejetor para o fluxo principal de ar comprimido. O restante da superfície do tambor (três quartos)

2:30



Secador regenerado por ventilador. A torre esquerda está secando o ar comprimido enquanto a torre direita está se regenerando. Após o resfriamento e a equalização da pressão, as torres são comutadas automaticamente.

usado para secar o ar comprimido proveniente do resfriador posterior do compressor.

O secador HOC evita a perda de ar comprimido e o requisito de energia é limitado para o necessário em girar o tambor. Por exemplo, um secador com capacidade de 1000 l/s consome apenas 120 W de energia elétrica. Além disso, nenhum ar comprimido é perdido e não são necessários nem filtros de óleo e nem filtros de partículas.

2.4.1.6 Secadores de membrana

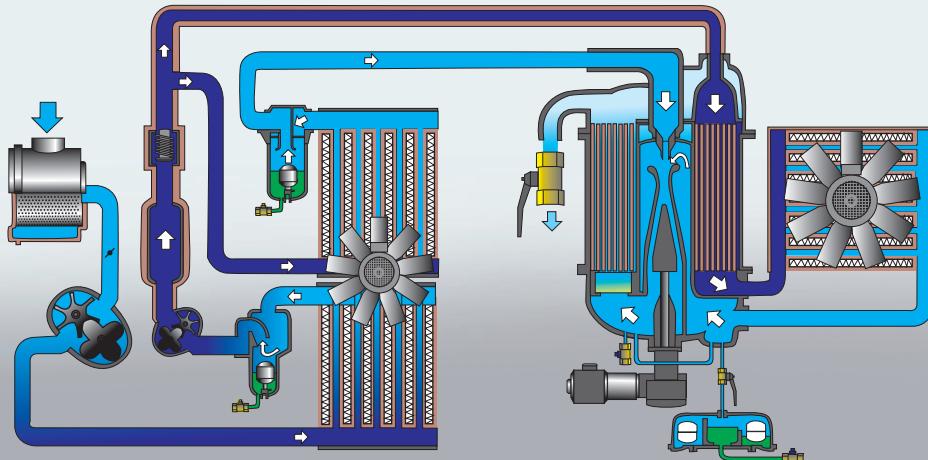
Os secadores de membrana usam o processo de permeação seletiva dos componentes do gás no ar. O secador é um cilindro que abriga milhares de pequenas fibras ocas de polímeros com um revestimento interno. Essas fibras têm permea-

ção seletiva para a remoção do vapor de água. A medida que o ar comprimido filtrado e úmido entra no cilindro, o revestimento da membrana permite que o vapor de água atravesse a parede dessa membrana e se acumule entre as fibras, enquanto o ar seco continua através das fibras do cilindro quase na mesma pressão que o ar úmido que entrou. A água permeada é ventilada para a atmosfera fora do cilindro.

A permeação ou separação é causada pela diferença na pressão parcial do gás entre o interior e o exterior da fibra oca.

Os secadores de membrana são simples de operar, silenciosos durante o funcionamento, sem

2:31



Secador do tipo Calor da Compressão (HOC) - modelo MD com tambor rotativo

partes móveis, baixo consumo de energia e requisitos mínimos de serviço (principalmente filtros a montante do secador).

Além de remover a água, a separação dos componentes do gás também pode ser obtida com uma membrana, dependendo das características do material da fibra. A separação de diferentes gases é obtida por diferenças no tamanho molecular e na solubilidade do gás na membrana.

Gases de menor tamanho molecular têm maior difusão e podem ser adequadamente separados por diferenças de mobilidade. Como tal, membranas específicas podem ser usadas para produzir geradores de nitrogênio, por exemplo.

2.4.2 Filtros

Em um fluxo de ar, as partículas que passam através de um filtro podem ser removidas de várias maneiras diferentes. Se as partículas forem maiores do que as aberturas entre o material do filtro, elas serão separadas mecanicamente

("peneiramento"). Isso geralmente se aplica a partículas maiores do que 1 mm.

A este respeito, a eficiência do filtro aumenta com o material de filtragem mais rígido, consistindo de fibras mais finas.

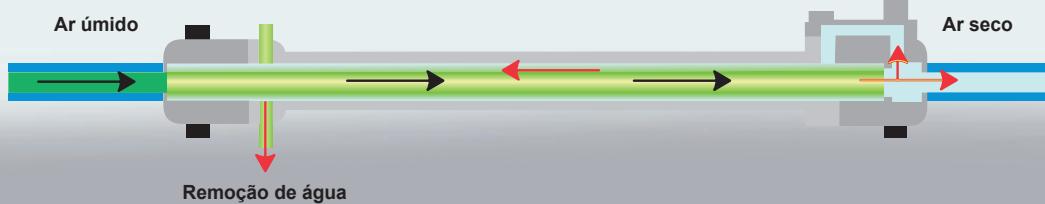
Partículas menores do que 1 mm são coletadas no material da fibra por 3 mecanismos físicos: impactação inercial, interceptação e difusão.

A impactação ocorre para partículas relativamente grandes e/ou para altas velocidades do gás. Devido a grande inércia da partícula pesada, ela não segue as linhas de fluxo, mas viaja para frente e colide com a fibra. Esse mecanismo ocorre principalmente para partículas acima de 1 μm e se torna cada vez mais importante com o aumento do tamanho das partículas.

A interceptação ocorre quando uma partícula segue a linha da corrente, mas o raio da partícula é maior que a distância entre a linha da corrente e o perímetro da fibra.

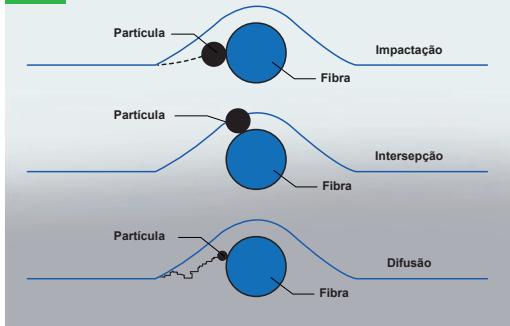
A deposição de partículas devido a difusão ocorre quando uma partícula muito pequena não

2:32



Princípio de trabalho dos secadores de membrana

2:33



Mecanismos de colisão de partículas em filtros.

segue as linhas de fluxo, mas se move aleatoriamente através do fluxo devido ao movimento browniano. Torna-se cada vez mais importante com o menor tamanho da partícula e a menor velocidade do ar.

A capacidade de separação de partículas de um filtro é resultado das subcapacidades combinadas (para os diferentes tamanhos de partícula), conforme estabelecido acima. Na realidade, cada filtro é um compromisso, pois nenhum filtro é eficiente em toda a faixa de tamanho de partículas. Mesmo o efeito da velocidade de fluxo na capacidade de separação para diferentes tamanhos de partículas não é um fator decisivo. Geralmente, partículas entre 0,1 µm e 0,2 µm são as mais difíceis de separar (Tamanho de Par-

tícula Mais Penetrante).

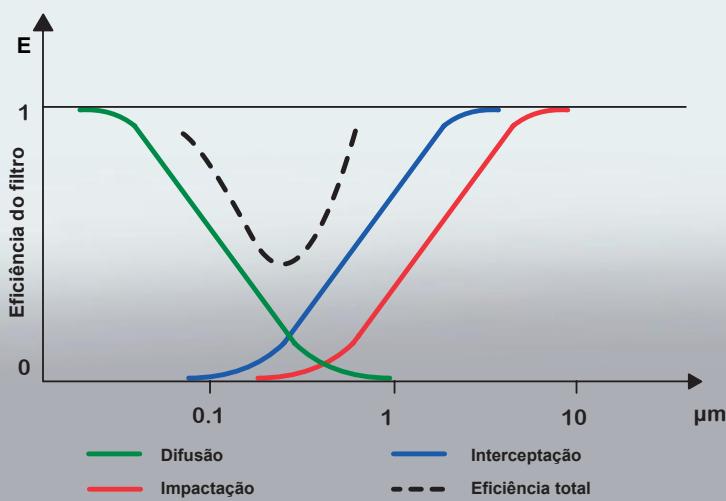
Como afirmado acima, a eficiência total de captação de um filtro de coalescência pode ser atribuída a uma combinação de todos estes mecanismos que ocorrem. Obviamente, a importância de cada mecanismo, o tamanho das partículas e o valor da eficiência total dependem fortemente da distribuição do tamanho das partículas no aerossol, da velocidade do ar e da distribuição dos diâmetros da fibra no meio filtrante.

O óleo e a água em forma de aerossol se comportam de maneira semelhante a outras partículas e também podem ser separados usando um filtro coalescente. No filtro, esses aerossóis líquidos coalescem em gotículas maiores que afundam no fundo do filtro devido a força da gravidade.

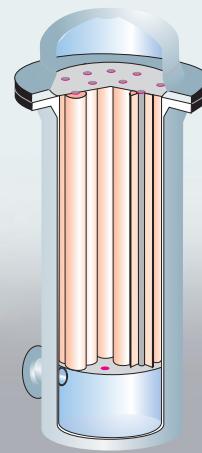
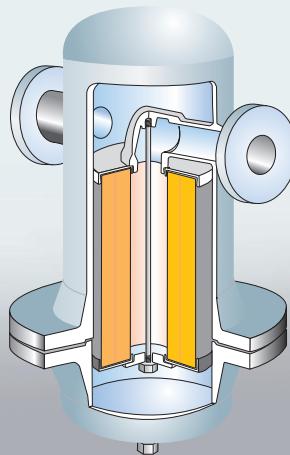
O filtro pode separar o óleo em aerossol e na forma líquida. Entretanto, o óleo na forma líquida, devido a alta concentração própria, resultará numa grande queda de pressão e transferência de óleo. Se o óleo na forma de vapor precisar ser separado, o filtro deve conter um material de adsorção adequado, geralmente carvão ativado (consulte também a seção 3.2.5).

Toda a filtragem resulta inevitavelmente em queda de pressão, que é uma perda de energia no sistema de ar comprimido. Filtros mais finos, com uma estrutura mais apertada, causam uma queda de pressão mais alta e podem entupir mais rapidamente, o que exige substituição

2:34



A eficiência do filtro em função do tamanho das partículas



Isto é como o filtro de partículas deve parecer na realidade. Uma grande carcaça e uma grande área do filtro significam baixa velocidade do ar, menor queda de pressão e uma vida útil mais longa.

mais frequente do filtro e, portanto, custos de manutenção mais altos.

A qualidade do ar em relação a quantidade de partículas e a presença de água e óleo é definida na ISO 8573-1, o padrão da indústria para a pureza do ar (consulte a seção 3.2). Para eliminar o risco de contaminação do ar em um processo crítico, recomenda-se que seja usado apenas o ar comprimido classificado como Classe 0.

Além disso, os filtros devem ser dimensionados para que não apenas manejam o fluxo nominal adequadamente, mas que também tenham um limite de capacidade maior para compensar alguma queda de pressão provocada por certas quantidades de bloqueios.

Um filtro para remover óleo, água e partículas de pó

disponíveis, dependendo do tipo do compressor, variações viáveis de pressão, variações de consumo de ar e perdas de energia aceitáveis.

O consumo de energia representa aproximadamente 80% do custo total do ciclo de vida do ar comprimido, o que significa que a escolha de um sistema de regulagem deve ser feita com cuidado. Isso se deve principalmente a diferenças significativas de desempenho em termos gerais dos tipos ou fabricantes de compressores. Em um cenário ideal, a capacidade total do compressor pode corresponder exatamente ao seu consumo de ar, por exemplo, escolhendo cuidadosamente a relação de transmissão da caixa de velocidades (isso é algo frequentemente usado em aplicações de processo).

Várias aplicações são auto regulaveis, ou seja, o aumento da pressão cria um percentual de fluxo aumentado e, como resultado, sistemas estáveis. Exemplos incluem sistemas de transporte pneumático, prevenção de gelo, sistemas de resfriamento, etc. No entanto, na maioria das aplicações, a vazão deve ser regulada. Isso geralmente é realizado usando equipamento de regulagem integrado ao compressor. Existem dois grupos principais de sistemas de regulagem:

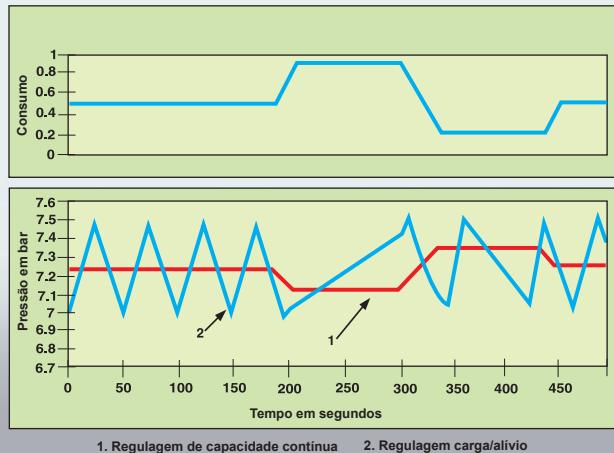
1. A regulagem contínua da vazão envolve, de acordo com as variações de pressão, o controle contínuo do motor de acionamento ou da vál-

2.5 SISTEMAS DE CONTROLE E REGULAGEM

2.5.1 Regulagem em geral

Frequentemente, as aplicações exigem pressão constante no sistema de ar comprimido. Isso, por sua vez, exige que o fluxo de ar comprimido que vem da central do compressor seja regulado. Existem vários métodos de regulagem de fluxo

2:36



vula de entrada. Os resultados normalmente são pequenas variações de pressão (0,1 a 0,5 bar), dependendo de amplificação do sistema de regulagem e da respectiva velocidade de regulagem.

2. A regulagem carga/alívio é o método mais comum e envolve a aceitação de variações de pressão um pouco maiores entre dois valores-limite. Isso ocorre interrompendo completamente a vazão na pressão mais alta (alívio) e retomando a vazão (carga) quando a pressão cai para o valor limite mais baixo. As variações de pressão dependem do número permitido de ciclos de carga/alívio por unidade de tempo, mas normalmente estão dentro da faixa de 0,3 a 1 bar.

2.5.2 Princípios de regulagem para compressores de deslocamento

2.5.2.1 Alívio de pressão

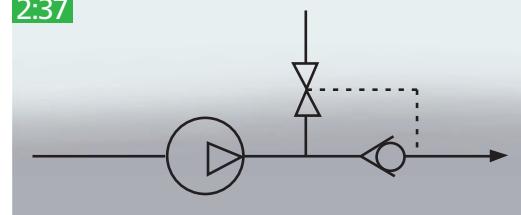
O método original para regular os compressores era usar uma válvula de alívio de pressão para liberar o excesso de pressão de ar na atmosfera. A válvula em seu design mais simples pode ser carregada por mola, e a tensão da mola determina a pressão final.

Frequentemente é utilizada uma servo válvula controlada por um regulador. A pressão pode ser facilmente controlada e a válvula também pode atuar como uma válvula de alívio ao partir um compressor sob pressão. O alívio de pressão cria

uma necessidade significativa de energia, pois o compressor deve trabalhar continuamente em contrapressão total.

Uma variante usada em compressores menores é descarregar o compressor abrindo completamente a válvula para que o compressor trabalhe contra a pressão atmosférica. O consumo de energia é significativamente menor usando esse método de variante.

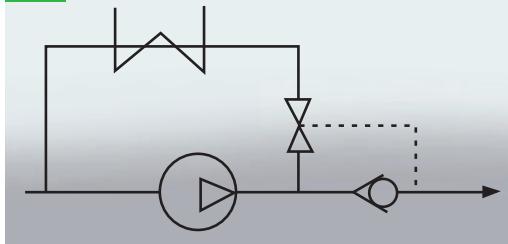
2:37



2.5.2.2 Bypass

A regulagem de bypass tem a mesma função que o alívio de pressão, em princípio. A diferença está no fato de que o ar de alívio de pressão em bypass é resfriado e retornado à entrada do compressor. Esse método é frequentemente usado em compressores de processo, onde gás é inadequado ou muito valioso para ser liberado na atmosfera.

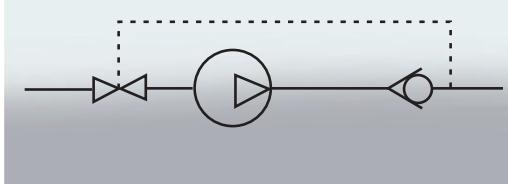
2:38



2.5.2.3 Estrangulando a entrada

O estrangulamento é um método simples para reduzir a vazão, aumentando a diferencial de pressão no compressor, de acordo com a subpressão induzida na entrada. Este método é, no entanto, limitado a uma pequena faixa de regulagem. Os compressores com injeção de líquido, que podem superar um diferencial de pressão tão alto, podem ser regulados em até 10% da capacidade máxima. O método de estrangulamento cria uma energia requerida relativamente alta, devido ao alto diferencial de pressão.

2:39



2.5.2.4 Alívio de pressão com estrangulamento na entrada

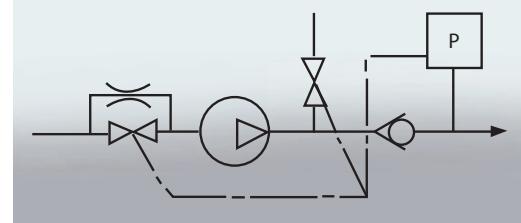
Este é o método de regulagem mais comum atualmente em uso. Combina uma faixa máxima de regulagem (0-100%) com baixo consumo de energia: apenas 15 a 30% da carga total com o compressor em alívio (vazão zero). A válvula de entrada é fechada, mas com uma pequena abertura usada ao mesmo tempo, uma válvula de alívio se abre e libera o ar do compressor.

O elemento compressor, portanto, trabalha com um vácuo na entrada e baixa contrapressão.

É importante que o alívio de pressão seja realizado rapidamente e que o volume de ar liberado seja limitado, a fim de evitar perdas desnecessárias durante a transição de regime em carga para o em alívio. O sistema exige um volume de ar de amortecimento (reservatório de ar), cujo

tamanho é função de diferença desejada entre os limites de pressão de carga e de alívio e pelo número permitido de ciclos de carga/alívio por hora.

2:40

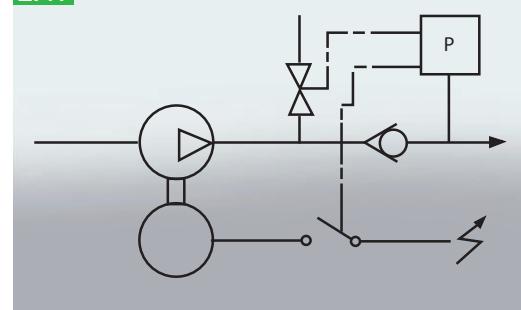


2.5.2.5 Partida/parada

Compressores abaixo de 5 a 10 kW são geralmente controlados desligando completamente o motor elétrico quando a pressão atinge um valor superior e religando-o quando a pressão cai abaixo do valor inferior. Esse método exige um grande volume de amortecimento do sistema ou uma grande diferença de pressão entre os limites superior e inferior, para minimizar o calor gerado no motor elétrico.

Este método de regulagem é eficiente em termos de energia e eficaz, desde que o número de partidas do motor elétrico seja mantido baixo.

2:41



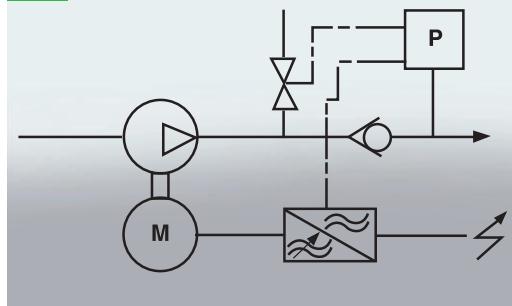
2.5.2.6 Regulagem da velocidade

Motor de combustão interna, turbina a gás ou motor elétrico controlado pela frequência controlam a velocidade do compressor e, consequentemente, a vazão. É um método eficiente para manter uma pressão constante de descarga e menor consumo de energia.

A faixa de regulagem varia de acordo com o tipo de compressor e é maior no caso de compressor com injeção de líquido.

Frequentemente, a regulagem da velocidade é combinada com partida-parada em baixos níveis de carga e pressão em alívio quando parado.

2.42



2.5.2.7 Porta de descarga variável

A vazão dos compressores de parafuso pode ser regulada movendo a posição da porta de descarga para o alojamento, na direção longitudinal dos rotores, em direção a entrada. No entanto, esse método gera alto consumo de energia e é bastante incomum.

2.5.2.8 Alívio na válvula de sucção

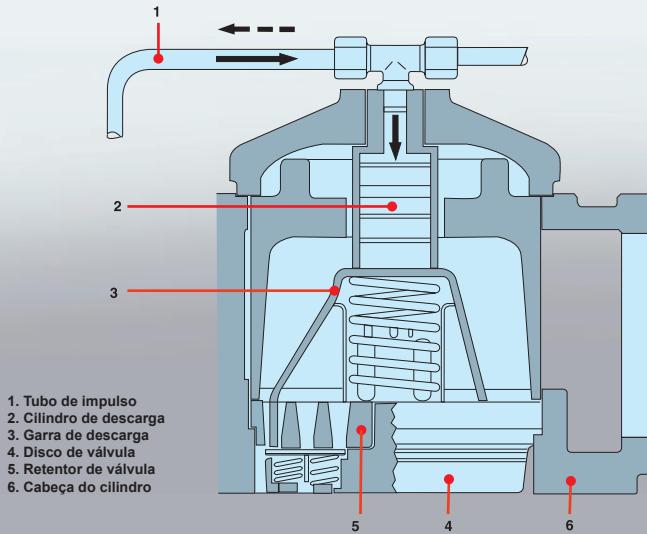
Os compressores de pistão podem ser efetivamente regulados forçando mecanicamente as válvulas de entrada para a posição aberta. Como resultado, o ar é bombeado para fora e para dentro do cilindro com perda de energia mínima, geralmente inferior a 10% da potência total do eixo.

Os compressores de pistão de duplo efeito geralmente fornecem descarregamento de vários estágios, pelo qual um cilindro de cada vez é descarregado para corresponder melhor a vazão a demanda. Um método ímpar usado para compressores de processo é permitir que a válvula de entrada seja aberta durante uma parte menor ou maior do curso do pistão para fornecer controle de vazão quase contínuo.

2.5.2.9 Carga – alívio – parada

Este é o método de regulagem mais comum usado para compressores com capacidade superior a 5 kW e combina uma ampla faixa de regulagem com baixas perdas. Na prática, é uma combinação do método de partida/parada e diferentes sistemas de descarga. Para informações adicionais, consulte 2.5.4.2.

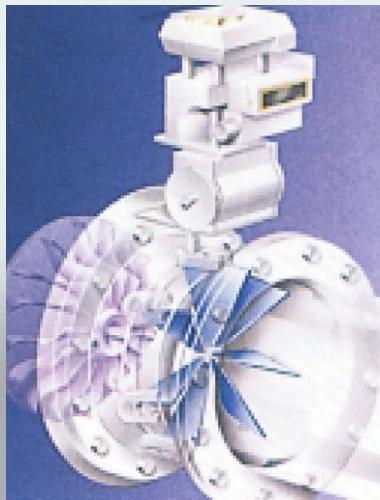
2.43



Dispositivo de descarga de um compressor de pistão.

2.5.3 Princípios de regulagem para compressores dinâmicos

2:44



2.5.3.1 Regulagem na entrada

Regulando a entrada:

A entrada pode ser regulada em um compressor dinâmico para reduzir continuamente a capacidade do compressor. A vazão mínima é determinada quando a relação de compressão atinge o limite da bomba e a máquina fica instável (surge). A faixa de regulagem é determinada pelo projeto da máquina (por exemplo, o número de estágios e o projeto do impeller), mas também em grande parte por fatores externos, como contrapressão, temperatura de sucção e temperatura do líquido de resfriamento. A vazão mínima geralmente varia entre 60% e 85% da vazão máxima.

Palhetas de guia de entrada (IGV):

As palhetas são dispostas como lâminas radiais na entrada e fazem com que o gás aspirado gire enquanto o fluxo é acelerado. O método tem o mesmo impacto que a aceleração, mas oferece uma maior faixa de regulagem e apresenta uma melhor utilização da energia. A regulagem de 50 a 70% do fluxo de projeto é um valor típico. Existe também a possibilidade de aumentar um pouco a capacidade e a pressão do compressor até certo ponto, girando as palhetas na direção oposta. Isso, no entanto, pode prejudicar o desempenho.

2.5.3.2 Regulagem de saída

Palhetas de guia de saída variáveis (difusor):

Para melhorar ainda mais a faixa de regulagem, o fluxo no difusor do estágio do compressor também pode ser controlado. É comum a regulagem de até 30% com a pressão sendo mantida. O uso é limitado em compressores de estágio único, devido a complexidade e o aumento de custos.

Alívio de pressão:

O método original para regular os compressores dinâmicos era usar uma válvula de alívio de pressão ou uma válvula de sopro (blow-off) para liberar o excesso de ar comprimido para a atmosfera. Em princípio, esse método funciona de maneira idêntica a do alívio de pressão em um compressor de deslocamento.

2.5.3.3 Carga – alívio – parada

Os métodos de regulagem mencionados anteriormente podem ser combinados para controlar a unidade do compressor. Dois modos são comumente usados:

- Modulação:

O excesso de fluxo é liberado para a atmosfera (ou na entrada), mas o consumo de energia é inalterado.

- Auto dual:

A redução da vazão da unidade será limitada a redução da válvula de admissão e/ou das palhetas de guia de saída para fluxos abaixo do limite da redução. O sistema de regulagem fecha totalmente a válvula de entrada ao mesmo tempo em que a saída do compressor é aberta na atmosfera (compare com o compressor de deslocamento). A potência de descarga ainda é relativamente alta, representando 20% da carga total, dependendo do projeto do impeller etc.

2.5.3.4 Regulagem de velocidade

A regulagem da velocidade tem um efeito semelhante ao uso de palhetas de guia de entrada. O fluxo pode variar com a pressão constante dentro da faixa de abertura (turndown) do compressor. Em potências mais altas, a variação de velocidade é menos vantajosa, devido ao alto custo da instalação necessária do acionador.

2.5.4 Controle e monitoramento

2.5.4.1 Geral

Os princípios de regulagem para diferentes compressores são abordados nas seções 2.5.2 e 2.5.3. O controle de compressores de acordo com esses princípios requer um sistema de regulagem que possa ser usado para um compressor individual ou para uma instalação inteira do compressor.

Os sistemas de regulagem estão se tornando mais avançados e o desenvolvimento acelerado oferece uma variedade de novas soluções. Os sistemas de relés foram substituídos por equipamentos programáveis (PLC), que agora estão sendo substituídos por sistemas adaptados ao produto, com base em microcomputadores. Esses projetos geralmente visam otimizar operações e custos.

Esta seção apresenta alguns dos sistemas de controle e monitoramento para os tipos mais comuns de compressores.

2.5.4.2 Carga – alívio – parada

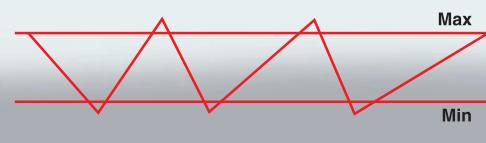
Os princípios de regulagem mais comuns para os compressores de deslocamento são "produzem ar" / "não produzem ar" (carga/alívio) (ver 2.5.2.4 e 2.5.2.5.).

Quando o ar é necessário, um sinal é enviado para uma válvula solenoide que guia a válvula de entrada do compressor para a posição totalmente aberta. A válvula fica totalmente aberta (carga) ou totalmente fechada (alívio); não há posição intermediária. O controle tradicional, agora comum em compressores menores, usa um pressostato que é colocado no sistema de ar comprimido que possui dois valores selecionáveis: um para a pressão mínima (com carga) e outro para a pressão máxima (sem carga). O compressor funcionará dentro dos limites dos valores definidos, por exemplo, dentro

de um intervalo de 0,5 bar. Se a necessidade de ar é muito pequena, o compressor funciona predominantemente no modo sem carga (alívio).

A duração do período de inatividade é limitada por um timer (definido, por exemplo, para 20 minutos). Quando o período de tempo definido termina, o compressor para e não inicia novamente até que a pressão caia para o valor mínimo. A

2:45

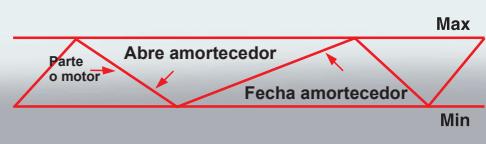


Faixa de pressão, Min – Max, dentro da qual o compressor opera: "Min" = carga, "Max" = sem carga (alívio).

desvantagem desse método é que ele oferece regulagem lenta.

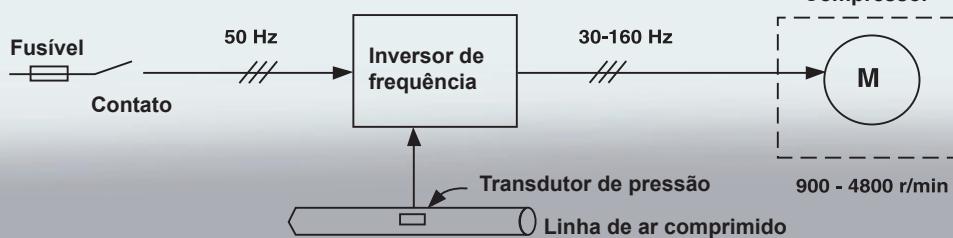
Uma evolução adicional para este sistema tradicional é substituir o pressostato por um transdutor de pressão analógico e um sistema de regulagem eletrônica rápida. Juntamente com o sistema de regulagem, o transdutor analógico pode detectar a rapidez com que a pressão no sistema muda. O sistema liga o motor e controla a abertura e o fechamento do amortecedor no momento certo. Este método oferece regulagem rápida e precisa dentro da faixa de $\pm 0,2$ bar.

2:46



Um sistema de regulagem avançado pode enviar sinais para o motor, chave de partida e regulador "no momento certo".

2:47



Um sistema com compressor controlado por velocidade.

Se o ar não for utilizado, a pressão permanecerá constante e o compressor funcionará no modo sem carga (alívio). A duração do período em alívio é controlada pelo número máximo de partidas que o motor elétrico pode suportar sem ficar muito quente e pela estratégia geral de custos operacionais, pois o sistema pode analisar tendências no consumo de ar e, assim, decidir se deve parar o motor ou continuar em alívio.

2.5.4.3 Controle de velocidade

Compressores com uma fonte de energia e com velocidade controlada eletronicamente oferecem uma ótima oportunidade de manter o ar comprimido constante dentro de uma faixa de pressão muito pequena.

Um inversor de frequência, que regula a velocidade de um motor de indução convencional, é um exemplo dessa solução. A capacidade do compressor pode ser adaptada às necessidades precisas de ar, medindo continuamente e com precisão a pressão do sistema e, em seguida, permitindo que os sinais de pressão controlem o inversor de frequência do motor e, consequentemente, a velocidade do motor. A pressão dentro do sistema pode ser mantida dentro da faixa de $\pm 0,1$ bar.

2.5.5 Monitoramento de dados

Todos os compressores estão equipados com algum tipo de equipamento de monitoramento para proteger o próprio compressor e impedir o tempo de inatividade da produção. O transdutor é usado para detectar a condição atual da instalação. As informações dos transdutores são processadas pelo sistema de monitoramento, que emite um sinal para um atuador, por exemplo.

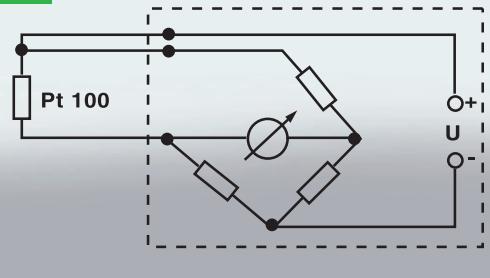
Um transdutor para medir a pressão ou a temperatura geralmente consiste de um sensor e um conversor de medição. O sensor detecta a quantidade a ser medida.

O conversor de medição converte o sinal de saída do sensor em um sinal elétrico apropriado que pode ser processado pelo sistema de controle.

2.5.5.1 Medição de temperatura

O termômetro de resistência é normalmente usado para medir a temperatura. Possui um resistor de metal como transdutor, cuja resistência aumenta conforme a temperatura aumenta. A mudança na resistência é medida e convertida em um sinal de 4-20 mA.

2:48



Exemplo de conexão de 3 fios usando um termômetro de resistência de 100Ω . O termômetro de resistência e os conectores estão conectados em uma ponte.

O termômetro de resistência mais comum é o Pt100.

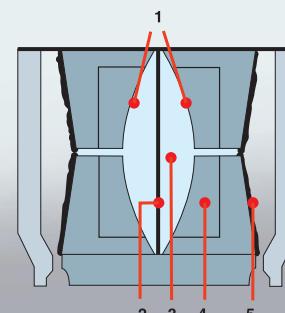
A resistência nominal a $0^\circ C$ é de 100Ω .

O termistor é um semicondutor cuja resistência muda com a temperatura. Pode ser usado como um controlador de temperatura, por exemplo, em um motor elétrico. O PTC, coeficiente de temperatura positiva, é o tipo de termistor mais comum. O PTC tem uma mudança insignificante na resistência com o aumento da temperatura até um ponto de referência, onde a resistência aumenta com um salto. O PTC está conectado a um controlador, que detecta esse "salto de resistência" e emite um sinal para parar o motor, por exemplo.

2.5.5.2 Medição de pressão

Para medir a pressão é utilizado um instrumento sensor de pressão, por exemplo, um diafragma

2:49

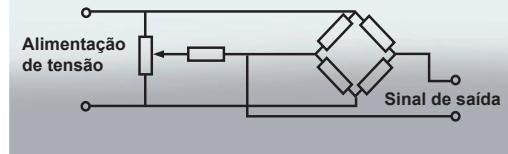


Exemplo de um sistema capacitivo para medição de pressão

ma. O sinal mecânico do diafragma é então convertido em um sinal elétrico, 4-20 mA ou 0-5 V. A conversão de um sinal mecânico para um sinal elétrico pode ocorrer em diferentes sistemas de medição. Em um sistema capacitivo, a pressão é transferida para um diafragma. A posição do diafragma de medição é detectada por uma placa de capacitor e é convertida, em um conversor de medição, em tensão direta ou corrente direta que é proporcional a pressão.

O sistema de medição resistiva consiste de um aferidor de tensão ligado em ponte e conectado ao diafragma. Quando o diafragma é exposto a pressão, uma baixa tensão (mV) é recebida. Isso é amplificado para um nível adequado. O sistema piezoelettrico é baseado em cristais específicos (por exemplo, quartzo) que geram cargas elétricas em suas superfícies. As cargas são proporcionais a força (pressão) na superfície.

2:50



Conexão em ponte com medidores de tensão

2.5.5.3 Monitoramento

O equipamento de monitoramento é adaptado ao tipo de compressor. Isso envolve necessariamente uma grande variedade de equipamentos para todos os tipos de compressores. Um pequeno compressor de pistão é equipado apenas com um corte de sobrecarga convencional para o motor, enquanto um compressor de parafuso grande pode ter vários cortes/transdutores para sobrecarga, temperatura e pressão, etc.

Em máquinas menores e mais básicas, o equipamento de controle desliga o compressor e a máquina não pode reiniciar quando um corte

2:51



Um painel de monitoramento, amigável ao usuário, exibe todos os parâmetros operacionais necessários.

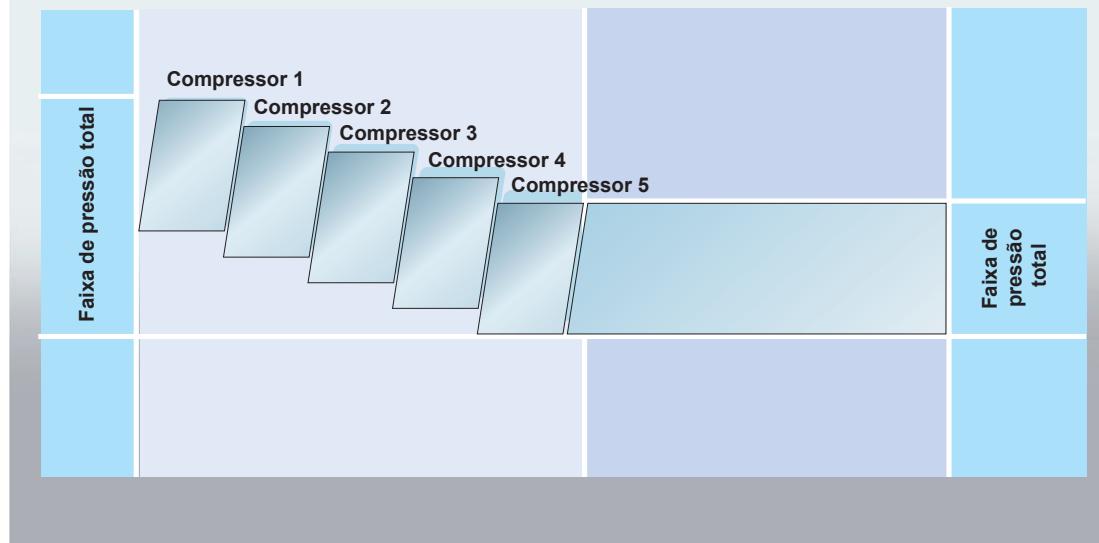


Ilustração da faixa de pressão para cinco compressores controlados por pressostatos convencionais (campo esquerdo) e as mesmas máquinas controladas por um sistema de regulagem (campo direito).

indica um valor de alarme. Uma lâmpada de aviso pode, em alguns casos, indicar a causa do alarme. As operações do compressor podem ser seguidas em um painel de controle para compressores mais avançados, por exemplo, lendo diretamente a pressão, a temperatura e o status. Se um valor do transdutor se aproximar de um limite de alarme, o equipamento de monitoramento emitirá um aviso. As medidas podem ser tomadas antes que o compressor seja desligado. Se o compressor for desligado por um alarme, a reinicialização do compressor será bloqueada até que a falha seja corrigida ou o compressor seja redefinido manualmente.

A solução de problemas é facilitada significativamente em compressores equipados com uma memória na qual são registrados os dados de temperatura, pressão e status operacional. A capacidade da memória pode cobrir as últimas 24 horas. Esse recurso permite que as tendências do último dia sejam analisadas e que a solução lógica de problemas seja usada para identificar rapidamente o motivo do tempo de inatividade.

2.5.6 Sistema de controle abrangente

Compressores que fazem parte de um sistema composto por várias máquinas devem ter operações coordenadas.

Existem muitos fatores que tornam um sistema de controle abrangente vantajoso.

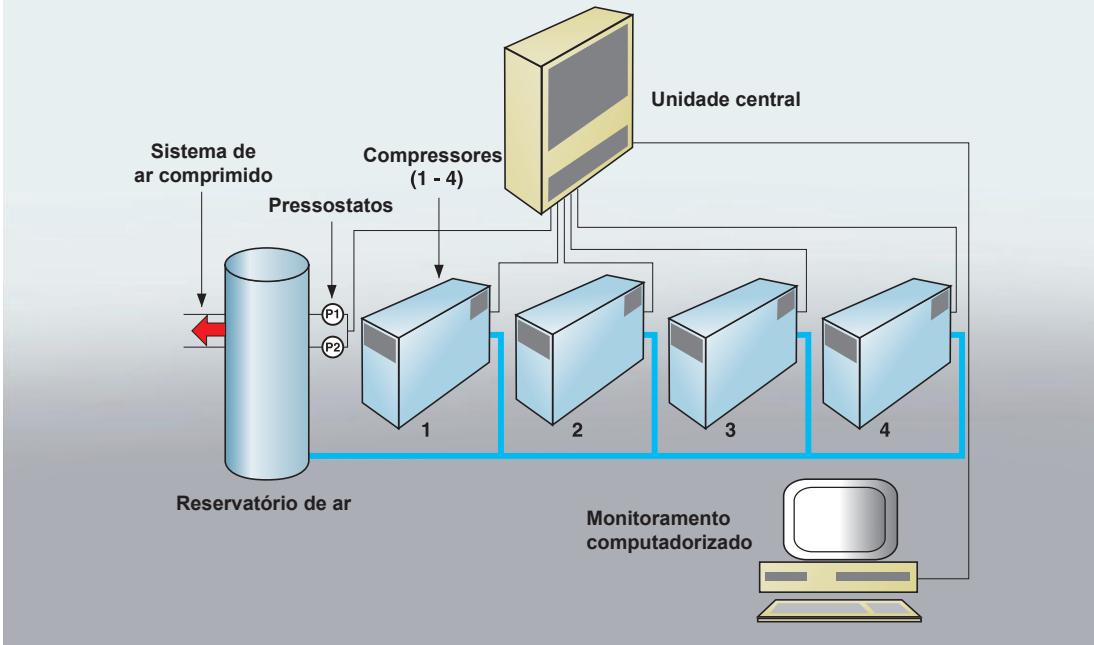
A divisão do tempo de operação entre as máquinas reduz o risco de paradas inesperadas. A manutenção do compressor também é mais fácil de planejar. Máquinas em espera podem ser conectadas se algo ocorrer durante as operações.

2.5.6.1 Seletor de sequência de partida

A forma mais simples e mais comum de sistema de controle principal é o seletor de sequência de partida, que é comumente usado e testado. Este seletor divide igualmente os tempos de operação e inicia a partida entre os compressores conectados. A sequência de início pode ser ativada manual ou automaticamente, seguindo um cronograma. Este seletor básico usa um transdutor de pressão on/off, com um transdutor por compressor, como uma solução simples e prática.

A desvantagem é que existem etapas relativamente grandes entre os diferentes níveis de carga e descarga do compressor. Isso resulta em faixas de pressão relativamente amplas (o intervalo entre os níveis máximo e mínimo) para a instalação. Portanto, esse tipo de seletor não deve ser usado para controlar mais de 2 a 3 compressores. Um tipo mais avançado de seletor de sequência de partida possui o mesmo tipo de controle de

2:53



Instalação de compressor controlado centralmente.

sequência, mas com apenas um transdutor de pressão analógico posicionado centralmente. Esse seletor consegue manter a faixa total de pressão da instalação entre alguns décimos de um bar e, como resultado, pode controlar de 2 a 7 máquinas. Um seletor de sequência de partida desse tipo, que seleciona as máquinas em sequências fixas, não leva em conta a capacidade dos compressores. Todos os compressores conectados devem ter aproximadamente o mesmo tamanho.

2.5.7 Controle central

O controle central associado aos compressores geralmente significa sistemas de controle relativamente inteligentes. A demanda básica é ser capaz de manter uma pressão predeterminada dentro de limites rígidos e fornecer operação econômica para a instalação.

Para isso, o sistema deve ser capaz de prever o que acontecerá no sistema e, ao mesmo tempo, detectar a carga no compressor.

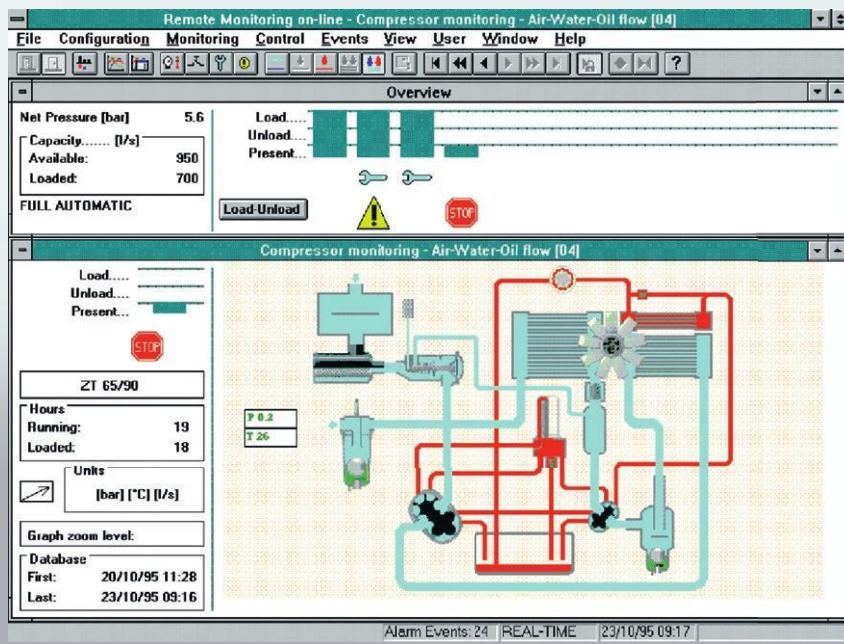
O sistema detecta a rapidez com que a pressão muda nos dois sentidos (ou seja, a variação da pressão com o tempo). Usando esses valores, o sistema pode executar cálculos que possibilitam prever a demanda de ar e, por exemplo, aliviar/

carregar ou partir/parar as máquinas. Em uma instalação corretamente dimensionada, a flutuação de pressão será mantida dentro de $\pm 0,2$ bar. Se compressores de diferentes capacidades compõem o sistema, é extremamente importante para a eficiência operacional que o sistema de controle central selecione o compressor ou a combinação de compressores mais econômica. O ideal é que os compressores funcionem continuamente em carga, minimizando assim os períodos de inatividade e proporcionando uma economia ideal. Outra vantagem de um sistema de controle abrangente é que geralmente é possível conectar máquinas mais antigas a esses sistemas e, portanto, modernizar toda a instalação de compressores de maneira relativamente fácil. As operações se tornam mais econômicas e a disponibilidade é aumentada.

2.5.8 Monitoramento remoto

Em várias instalações de compressores, pode ser necessário monitorar e controlar as operações do compressor a partir de um local remoto. Em instalações menores, é bastante fácil conectar ao compressor um alarme, indicador de operação, etc. Também é geralmente possível executar a partida e a parada remota.

254



Uma exibição geral com monitoramento remoto. A seção superior mostra o status da instalação. Três máquinas em operação, uma parada. Na seção inferior, os detalhes do compressor 4 são mostrados, entre outros, fluxograma para o ar comprimido, água de resfriamento e óleo, bem como dados prevalecentes do compressor.

Em instalações maiores, onde está em jogo um investimento financeiro significativo, o monitoramento central é deseável com frequência. Ele deve consistir de equipamento que fornece uma visão geral contínua do sistema e que também fornece acesso a máquinas individuais, a fim de controlar detalhes como pressão do resfriador intermediário, temperatura do óleo, etc.

O sistema de monitoramento também deve ter uma memória para produzir um log do que ocorreu nas últimas 24 horas.

O log é usado para traçar curvas de tendência, que servem para identificar facilmente os valores que tendem a se desviar do padrão. As curvas podem formar a base para operações contínuas ou para planejar uma parada do sistema. O sistema frequentemente apresenta relatórios de status de instalação do compressor em diferentes níveis, desde uma visão geral total até o status detalhado de máquinas individuais.

255

Faixa de pressão	Pressão (bar man.)	Área de aplicação
Pequena	7 - 8,6	Trabalho por empreitada
Média	10 - 14	Estabilização do solo
Alta	17 - 20	Perfuração e Industrial
Muito alta	25 - 35	Perfuração de poços de água e geotérmica
Ultra alta	35 - 350	Perfuração profunda (óleo, gás, mineral, geotérmica) Serviços de poços e oleodutos, geração de nitrogênio

Faixas de pressão disponíveis e aplicações correspondentes de compressores móveis.



Compressor móvel moderno para trabalho por contrato de trabalho.

2.6 COMPRESSORES MÓVEIS

2.6.1 Geral

Quase todos os compressores móveis são compressores de parafuso injetados a óleo movidos a motor a diesel. As vezes, compressores móveis muito pequenos e muito grandes são oferecidos com motores elétricos. Os compressores móveis isentos de óleo são produzidos apenas pelos principais fabricantes do mundo, para serviços de manutenção na indústria de processos, serviços públicos e indústria offshore.

Considerando que os compressores móveis foram inicialmente utilizados em canteiros de obras e para perfuração off-road, agora estão sendo usados em muitas outras aplicações e processos: reparo de estradas, trabalhos em tubulações, reforço de rochas, jateamento, operações de recuperação, etc. Geralmente, os compressores móveis são embalados como instalações de ar comprimido independentes, com equipamento de tratamento de ar integrado opcional (resfriador posterior, separador de água, filtros finos, reaquecedor, lubrificador, etc.), bem como

equipamento auxiliar opcional (gerador de energia elétrica de 5 a 10 KVA, 230V / 400V, auxiliares de partida a frio, dispositivos antirroubo, chassi a prova de derramamento de óleo, etc). Existem geradores móveis de energia elétrica movidos a diesel, construídos em gabinetes semelhantes aos compressores móveis, para maiores requisitos de energia.

2.6.2 Nível de ruído e emissões de escape

Os projetos modernos de compressores a diesel fornecem níveis de ruído muito baixos, como resultado de uma ampla legislação, incluindo a Diretiva da UE 2000/14 / EC, que regula as emissões de ruído de máquinas usadas ao ar livre. Portanto, essas máquinas podem ser usadas sem afetar negativamente as áreas povoadas e as áreas próximas a hospitais, etc. A cabine silenciosa é geralmente uma construção de aço de parede única, embora recentemente tenham sido introduzidas cabines de aço de parede dupla e de polietileno durável, contendo defletor especial e quantidades substanciais de espuma absorvente de som.

Nas duas décadas passadas, a economia de combustível melhorou substancialmente com a introdução de elementos compressores de parafuso muito eficientes e embalagem eficiente. Isso tem

sido especialmente valioso para a perfuração de poços de água, que é uma tarefa que exige que o compressor trabalhe intensivamente por um longo período de tempo.

Além disso, os compressores modernos podem ser equipados com hardware e software de otimização da economia de combustível que são muito superiores aos sistemas pneumáticos convencionais de controle de motores/compressores, por exemplo, FuelXpert e DrillAirXpert.

Desde a introdução da legislação específica sobre emissões de escape em 1997 nos Estados Unidos, Europa e outros países, os motores a diesel que atendem aos mais recentes requisitos de emissão de gases de escape estão sendo escolhidos com mais frequência: o EURO III será introduzido entre 2006-2013, o EURO IV a partir de 2014 em diante. e o US nível 4 entre 2008 e 2015.

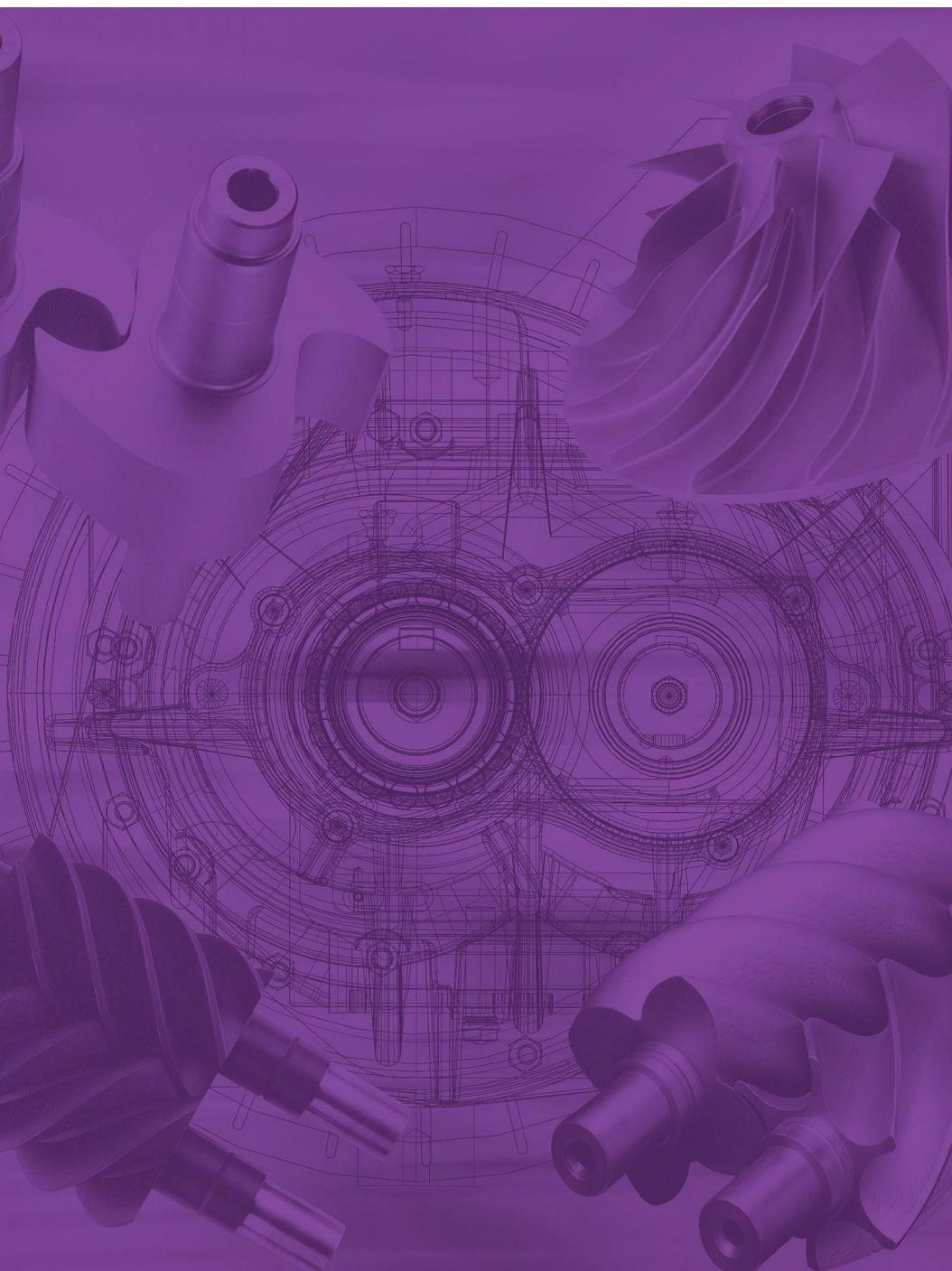
2.6.3 Flexibilidade operacional

Enquanto os compressores industriais estacionários são instalados fixos para atender a apenas uma ou poucas aplicações em um sistema comum de distribuição de ar comprimido, os compressores móveis modernos devem demonstrar alta flexibilidade operacional geral para atender a uma infinidade de aplicações em diferentes ambientes, com base nas temperaturas do ambiente, níveis de umidade e pressões de trabalho, altitudes e perfis de ciclo de carga. Outros requisitos relativos aos compressores móveis incluem alta confiabilidade operacional, boas características de serviço, pequeno impacto ambiental resultante de baixos níveis de ruído e de níveis regulados na emissão de escape, dimensões compactas e baixo peso total.

A operação em climas com umidade média a alta, especialmente quando o perfil de carga/alívio contém ciclos de carga a alta pressão ou longos períodos de operação em alívio, fará com que parte do conteúdo de água da atmosfera se condense no interior do circuito de óleo do compressor. Isso tem um impacto negativo nos componentes do compressor lubrificado, bem como no próprio óleo. Com apenas 1% de água no óleo, a vida útil dos rolamentos será reduzida em 40%. Os compressores móveis mais modernos podem ser equipados com um sistema eletrônico de controle de temperatura do óleo para proteger a vida útil do compressor.

3

DIMENSIONAMENTO E MANUTENÇÃO DE INSTALAÇÃO DE COMPRESSOES



3.1 DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÃO DE COMPRESSORES

3.1.1 Geral

É necessário tomar várias decisões ao dimensionar uma instalação de ar comprimido para atender as necessidades do usuário, proporcionar economia operacional máxima e estar preparado para expansão futura.

A base são as aplicações ou processos que usarão o ar comprimido. Portanto, eles devem ser mapeados como ponto de partida para todas as outras atividades de dimensionamento.

As áreas que devem ser examinadas incluem o cálculo ou a avaliação da necessidade de ar e a capacidade de reserva, além do espaço para expansão futura. A pressão de trabalho é um fator crítico, pois isso afeta significativamente o consumo de energia. As vezes, pode ser econômico usar compressores diferentes para diferentes faixas de pressão.

A qualidade do ar comprimido não é apenas uma questão de teor de água, mas também se tornou uma questão ambiental. O odor e o teor de microrganismos são fatores importantes que podem afetar a qualidade do produto, rejeições, ambiente de trabalho e ambiente externo. A questão de saber se a instalação do compressor deve ser centralizada ou descentralizada pode afetar o requisito de espaço e, talvez, os planos de expansão futuros. Do ponto de vista financeiro e ecológico, está se tornando cada vez mais

importante investigar as possibilidades de recuperar energia em um estágio inicial para rápido retorno do investimento.

É importante analisar esses tipos de problemas com relação aos requisitos atuais e futuros. Somente após isso será possível projetar uma instalação que ofereça flexibilidade suficiente.

3.1.1.1 Cálculo da pressão de trabalho

Os equipamentos que consomem ar comprimido em uma instalação determinam a pressão de trabalho necessária. A pressão de trabalho correta não depende apenas do compressor, mas também do projeto do sistema de ar comprimido e suas tubulações, válvulas, secadores de ar comprimido, filtros, etc.

Diferentes tipos de equipamentos podem exigir pressões diferentes dentro do mesmo sistema. Normalmente, a pressão mais alta determina a pressão necessária da instalação e em outros equipamentos serão instaladas válvulas redutoras de pressão no ponto de consumo. Em casos mais extremos, o método pode ser antieconômico e pode ser necessário ter um compressor em separado para necessidades especiais.

Também devemos ter em mente que a queda de pressão aumenta rapidamente a medida que o consumo de ar aumenta. Sendo prevista uma mudança no consumo, faz sentido econômico adaptar a instalação a essas condições.

Filtros e filtros de pó especiais têm uma baixa perda de carga inicial, mas tornam-se obstruídos ao longo do tempo e são substituídos na queda de pressão que for recomendada.

Este fator entrará no cálculo. A regulagem de vazão do compressor também causa variações de pressão e, portanto, também deve ser incluída na avaliação. O uso do exemplo seguinte pode ser apropriado para executar os cálculos:

3:1

Equipamento conectado	Consumo nominal de ar	Fator de utilização max/min	Requisito total de ar max/min
Ferramentas, total			
Linhos de produção, total			
Linhos de processo, total			

O consumo de ar para equipamentos conectados é obtido a partir de catálogos de ferramentas e dados de equipamentos de produção. Ao avaliar os fatores de utilização individuais, é possível determinar o limite superior e inferior para a demanda geral de ar.

Descrição	Perda de pressão (bar)
Usuário final	6
Filtro final	0,1-0,5
Sistema de tubulação	0,2
Filtro de poeira	0,1-0,5
Secador	0,1
Faixa de regulagem do compressor	0,5
Pressão máxima de trabalho do compressor	7,0-7,8

É principalmente a aplicação nos pontos finais de consumo, juntamente com a queda de pressão entre o compressor e estes pontos de demanda, que determina a pressão que o compressor terá de fornecer. A pressão de trabalho pode ser determinada adicionando a perda de pressão ao sistema, conforme mostrado no exemplo acima.

3.1.1.2 Cálculo da necessidade de ar

O requisito nominal de ar comprimido é determinado pelos consumidores individuais de ar. Isso é calculado com a soma do consumo de ar para todas as ferramentas, máquinas e processos que serão conectados e estimando o fator de utilização individual por experiência. Adições de vazamento, desgaste e futuras mudanças na necessidade de ar também devem ser levados em consideração desde o início.

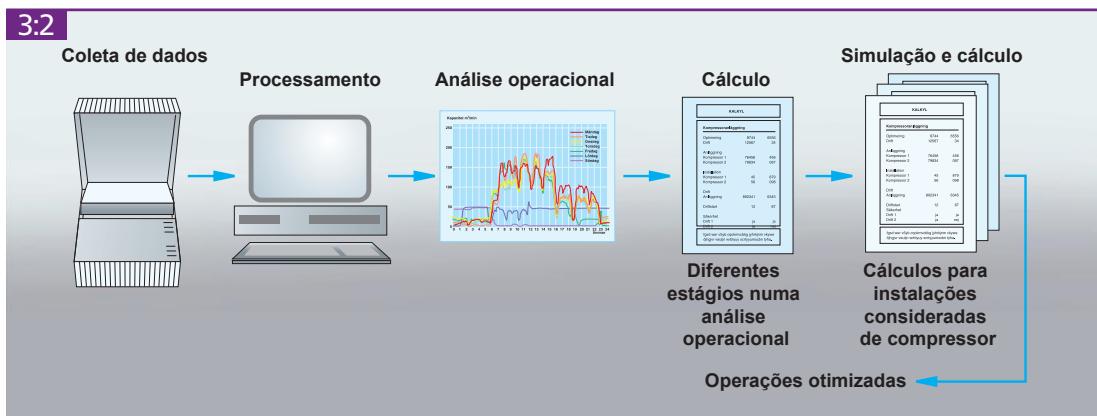
Um método simples para estimar o consumo atual e o futuro de ar é compilar a necessidade de ar para o equipamento conectado e o fator de utilização.

Esse tipo de cálculo requer uma lista de máquinas e seus respectivos dados de consumo de ar e fatores de utilização esperados. Se os dados não estiverem à disposição para o fator de utilização ou consumo de ar, poderão ser utilizados valores padrões de tabelas. O fator de utilização de ferramentas pode ser difícil de estimar, portanto, os valores de cálculo devem ser comparados com o consumo medido em aplicações semelhantes.

Por exemplo, grandes consumidores movidos a ar, como trituradores e máquinas de jateamento de areia, são usados com frequência por longos períodos (de 3 a 10 minutos) em operação contínua, apesar de seu baixo fator de utilização geral. Isso não pode realmente ser caracterizado como operação intermitente, e é necessário estimar quantas máquinas serão usadas simultaneamente para estimar o consumo total de ar.

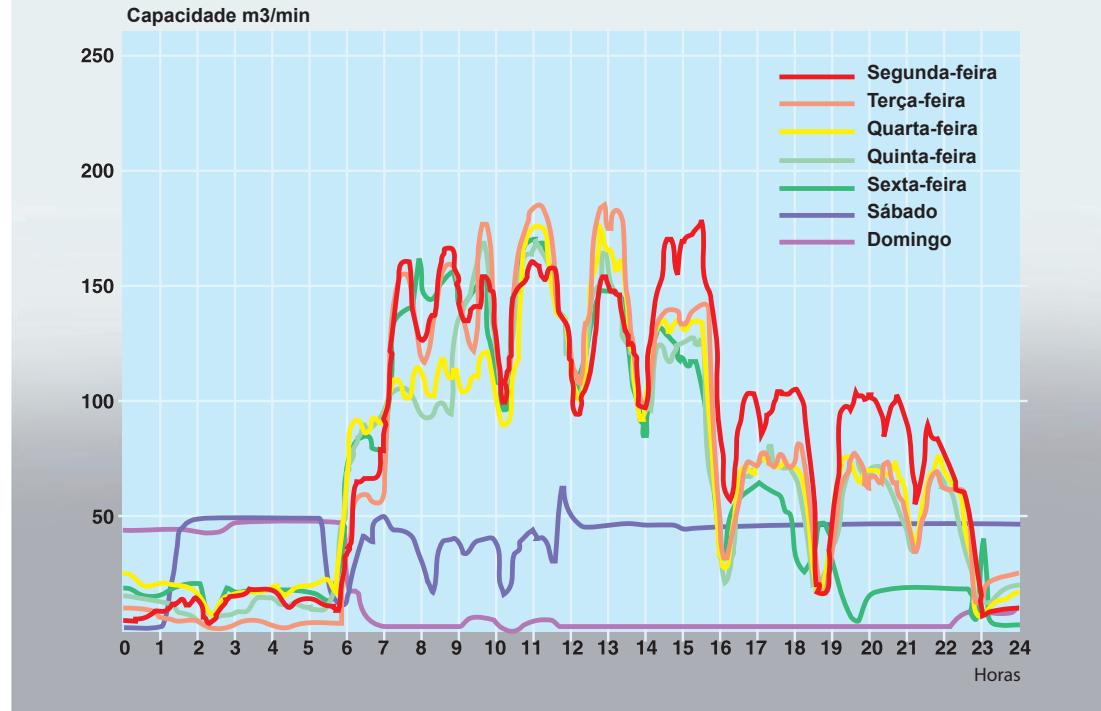
A capacidade do compressor é essencialmente determinada pelo consumo nominal total de ar comprimido. A vazão em descarga livre efetiva dos compressores deve cobrir essa necessidade de consumo de ar. A capacidade de reserva calculada é determinada principalmente pelo custo da produção perdida devido a uma potencial falha de ar comprimido.

O número de compressores e respectivos tamanhos é determinado principalmente pelo grau necessário de flexibilidade, sistema de controle e eficiência energética. Em uma instalação em que apenas um compressor fornece ar comprimido (devido a restrições de custo), o sistema pode ser preparado para a conexão rápida de um compressor portátil como parte da manutenção. Um compressor mais antigo usado como fonte de reserva pode ser usado como energia de reserva barata.



Método de análise operacional

3.3



Durante uma análise de operação, a produção de ar comprimido é medida continuamente por uma semana inteira.

3.1.1.3 Medição da necessidade de ar

Uma análise operacional fornece os principais fatores sobre o consumo de ar comprimido e forma a base para avaliar a quantidade ideal a ser produzido. A maioria das empresas industriais está em constante evolução e isso significa que suas necessidades de ar comprimido também mudam. Assim, é importante que o suprimento de ar comprimido se baseie nas condições atuais vigentes, e uma margem apropriada para expansão seja incorporada a instalação.

Uma análise operacional consiste na medição dos dados operacionais, que possivelmente são complementados com a inspeção de uma instalação de ar comprimido existente por um período de tempo adequado. Essa análise deve cobrir pelo menos uma semana de operações e o período de medição deve ser selecionado com cuidado para permitir que ele represente um caso típico e forneça dados relevantes. Os dados armazenados também oferecem uma oportunidade para simular diferentes medidas e alterações nas operações do compressor e analisar o impacto na economia geral da instalação.

Fatores como tempos de carga e de alívio também entram na avaliação total das operações do compressor. Eles fornecem a base para avaliar o fator de carga e a necessidade de ar comprimido, distribuídos por um dia ou uma semana de trabalho. Consequentemente, o fator de carga não pode ser lido apenas no horímetro do compressor.

Uma análise operacional também fornece base para potencial recuperação de energia. Frequentemente, mais de 90% da energia fornecida pode ser recuperada. Além disso, a análise pode fornecer respostas relacionadas ao dimensionamento, bem como ao método operacional para instalação. Por exemplo, a pressão de trabalho geralmente pode ser reduzida em determinados momentos e o sistema de controle pode ser modificado para melhorar o uso do compressor com alterações na produção. Também é fundamentalmente importante verificar se há vazamentos.

Para a produção de pequenas quantidades de ar durante a noite e nos finais de semana, você deve considerar se vale a pena instalar um compressor menor para atender a esse requisito.

3:4

Diâmetro do furo mm	1	3	5	10
Vazamento, (l/s) a 6 bar	1	10	27	105
Perda de potência, kW no compressor	0,3	3,1	8,3	33

Mesmo pequenos vazamentos podem causar grandes custos e tempo de inatividade.

3.1.2 Centralização ou descentralização

3.1.2.1 Geral

Existem vários fatores que influenciam na escolha entre um compressor grande centralizado ou vários compressores pequenos descentralizados para atender a um determinado consumo de ar comprimido. Os fatores que são levados em consideração incluem o custo de uma paralisação da produção, disponibilidade garantida de energia elétrica, variações de carga, custos para o sistema de ar comprimido e o espaço disponível.

3.1.2.2 Instalação centralizada do compressor

Uma instalação centralizada de compressor é, em muitos casos, a solução para a escolha, pois é mais barato operar e manter do que vários compressores distribuídos localmente. As unidades compressoras podem ser interconectadas com eficiência, resultando em menor consumo de energia. Uma instalação central também envolve custos mais baixos de monitoramento e manutenção, além de melhores oportunidades para recuperar energia. A área geral do piso necessária para a instalação do compressor também é minimizada. Filtros, resfriadores e outros equipamentos auxiliares e a entrada de ar comum podem ser dimensionados de maneira ideal. As medidas para redução de ruído também serão mais fáceis de ajustar.

Um sistema que compreende vários compressores de tamanhos diferentes em uma instalação central pode ser controlado por sequência para melhorar a eficiência. Um compressor de grande pode ter mais dificuldade em atender grandes

variações na necessidade de ar comprimido sem perder a eficiência.

Por exemplo, sistemas com um compressor grande geralmente são complementados com um compressor menor para uso durante períodos como o turno da noite ou nos fins de semana.

Outro fator que vale a pena considerar é o impacto que a partida de um grande motor elétrico tem sobre a fonte de alimentação.

3.1.2.3 Instalação descentralizada do compressor

Um sistema com vários compressores descentralizados também pode ser a escolha preferida para certas aplicações. Envolve um sistema de distribuição de ar comprimido menor e mais simples. Uma desvantagem dos compressores descentralizados reside na dificuldade de regular o suprimento de ar comprimido entre eles e em manter uma capacidade de reserva. Compressores modernos, com equipamentos de condicionamento do ar comprimido totalmente integrados (secadores, filtros, etc.) e com sistemas de silenciamento com alto desempenho, podem ser instalados no local de trabalho, reduzindo assim os custos de distribuição do ar comprimido e eliminando a necessidade de um prédio separado ou de uma extensão para uma sala de compressor separada.

Compressores descentralizados podem ser utilizados para manter a pressão em sistema com grande queda de pressão em processos intermediários que puxam temporariamente muito ar. Uma alternativa com picos extremamente curtos de consumo de ar é resolver o problema posicionando amortecedores (reservatório de ar) em locais estratégicos.

Uma unidade ou edifício, normalmente disponível numa planta e que é o único consumidor de ar comprimido durante períodos específicos, pode ser separado e fornecido com seu próprio compressor descentralizado. A vantagem desse layout é que ele evita "alimentar" qualquer vazamento na parte restante do sistema e que o compressor localizado pode ser adaptado aos consumos menores.

3.1.3 Dimensionamento em grande altitude

3.1.3.1 Geral

Tanto a pressão ambiente quanto a temperatura diminuem com a altitude acima do nível do mar.

3:5

Pressão atmosférica

Altitude acima/abaixo do nível do mar	Pressão bar (a)	Temperatura
-1000	1.138	21.5
-800	1.109	20.2
-600	1.080	18.9
-400	1.062	17.6
-200	1.038	16.3
0	1.013	15.0
200	0.989	13.7
400	0.966	12.4
600	0.943	11.1
800	0.921	9.8
1000	0.899	8.5
1200	0.877	7.2
1400	0.856	5.9
1600	0.835	4.6
1800	0.815	3.3
2000	0.795	2.0
2200	0.775	0.7
2400	0.756	-0.6
2600	0.737	-1.9
2800	0.719	-3.2
3000	0.701	-4.5
3200	0.683	-5.8
3400	0.666	-7.1
3600	0.649	-8.4
3800	0.633	-9.7
4000	0.616	-11.0
5000	0.540	-17.5
6000	0.472	-24.0
7000	0.411	-30.5
8000	0.356	-37.0

A tabela mostra a pressão e a temperatura padronizadas em diferentes altitudes. A pressão também depende do clima e varia aprox. $\pm 5\%$, enquanto as variações de temperatura dependentes da estação local podem ser consideráveis.

Essa pressão de entrada mais baixa afeta a relação de compressão, tanto para os compressores quanto para os equipamentos conectados, o que, na prática, significa um impacto no consumo de energia e no ar. Ao mesmo tempo, as alterações devido à altitude mais alta também afetarão a potência nominal disponível de motores elétricos e de combustão.

A maneira pela qual as condições ambientais influenciam a aplicação do consumidor final também deve ser levada em consideração. É necessária uma vazão em massa específica (de processo) ou uma vazão em volume? Foi relação de compressão, a pressão absoluta ou a pressão manométrica usada para dimensionar? A temperatura do ar comprimido é importante?

Todas essas considerações criam condições diferentes para dimensionar uma instalação de ar comprimido numa altitude elevada e podem ser bastante complexas de calcular. Se algo não estiver claro ou tiver alguma dúvida, o instalador deve sempre entrar em contato com o fabricante do equipamento.

3.1.3.2 O efeito em um compressor

Para escolher o compressor correto, onde as condições ambientais diferem das indicadas na folha de dados, os seguintes fatores devem ser levados em consideração:

- Altura acima do nível do mar ou pressão ambiente
- Temperatura ambiente
- Umidade
- Temperatura do líquido de resfriamento
- Tipo de compressor
- Fonte de energia

Esses fatores afetam principalmente o seguinte:

3:6

		Redução por aumento de 1000 metros de altitude	
Tipo de compressor		Descarga livre efetiva de ar FAD %	Vazão de ar em massa % Vazão de ar normal %
Compressor de parafuso isento de óleo de 1 estágio		0.3	11
Compressor de parafuso isento de óleo de 2 estágios		0.2	11
Compressor de parafuso com óleo injetado de 1 estágio		0.5	12
Compressor de pistão de 1 estágio		5	17
Compressor de pistão de 2 estágios		2	13
Compressor centrífugo de múltiplos estágios		0.4	12

Efeito de altitude no compressor a 7 bar (e) de pressão de trabalho e temperatura ambiente constante. Lembre-se de que cada tipo de compressor possui uma relação de compressão máxima que não pode ser excedida.

3:7

Altitude acima do nível do mar, metros	Temperatura ambiente °C					
	<30	30-40	45	50	55	60
1000	107	100	96	92	87	82
1500	104	97	93	89	84	79
2000	100	94	90	86	82	77
2500	96	90	86	83	78	74
3000	92	86	82	79	75	70
3500	88	82	79	75	71	67
4000	82	77	74	71	67	63

Carga permitida em % da potência nominal do motor elétrico.

- Pressão máxima de trabalho
- Capacidade
- Consumo de energia
- Requisito de resfriamento

O fator mais importante são as variações de pressão de admissão na altitude. Um compressor tem a relação de compressão de 8,0 ao nível do mar e esta será de 11,1 a uma altitude de 3.000 metros (desde que a pressão operacional da aplicação não seja alterada). Isso afeta a eficiência e, consequentemente, o consumo de energia. O valor da alteração depende do tipo de compressor e do projeto, conforme detalhado na Figura 3: 6. A temperatura ambiente, a umidade e a temperatura do líquido de resfriamento interagem e afetam o desempenho em diferentes graus nos compressores de estágio único ou de multiestágios, compressores dinâmicos ou compressores de deslocamento.

3.1.3.3 Fonte de alimentação

3.1.3.3.1 Dimensionamento de motores elétricos

O resfriamento é prejudicado nos motores elétricos pelo ar de baixa densidade em grandes altitudes. Os motores padrões devem poder trabalhar até 1.000 m com uma temperatura ambiente de 40°C, sem influência nos dados nominais. Em maiores altitudes, a Tabela 3: 7 é usada como um

guia para a redução do desempenho do motor padrão. Observe que, para alguns tipos de compressor, o desempenho do motor elétrico é prejudicado mais do que a potência necessária no eixo do compressor em grandes altitudes.

Portanto, operar um compressor padrão em grandes altitudes requer a diminuição da pressão de trabalho ou a instalação de um motor de maiores dimensões.

3.1.3.3.2 Dimensionamento de motores de combustão interna (CI)

Redução na pressão ambiente, aumento na temperatura ou redução da umidade reduz o conteúdo de oxigênio no ar usado para combustão e, consequentemente, a potência extraível do motor de combustão interna (CI). O grau de redução da potência do eixo depende do tipo de motor e seu método de aspiração (naturalmente aspirado ou sobrealimentado), conforme estabelecido na Figura 3: 8. A umidade desempenha um papel menor (redução <1% por 1.000 m) quando a temperatura cai abaixo de 30 °C.

Observe que a potência do motor cai mais rapidamente do que a potência do eixo necessária para o compressor. Isso implica que, para cada combinação compressor/ motor, existe uma altitude máxima de trabalho que utilizará toda a margem de potência do motor, para uso ao nível do mar, no compressor. Geralmente, os fornece-

3:8

Tipo de motor	Redução de potência em % por 1.000 m	Redução de potência em % por 10°C de aumento na temperatura
Motor aspirado	12	3,6
Motor turbocompressor	8	5,4

Potência disponível do motor de combustão interna em função da altitude e temperatura.

dores devem confiar no cálculo e na indicação dos dados específicos que se aplicam ao compressor, motor e equipamento de consumo de ar em questão.

3.2 TRATAMENTO DE AR

3.2.1 Geral

É de vital importância para o usuário que o ar comprimido seja da qualidade certa. Se o ar que contém contaminação entrar em contato com o produto final, os custos de rejeição podem rapidamente se tornar inaceitavelmente altos e a solução mais barata pode rapidamente se tornar a mais cara. É importante que você selecione a qualidade do ar comprimido de acordo com a política de qualidade da empresa e até mesmo tentar julgar as necessidades futuras.

O ar comprimido pode conter substâncias indesejáveis, por exemplo, água em forma de gota ou vapor, óleo em forma de gota ou aerossol, além de poeira. Dependendo da área de aplicação do ar comprimido, essas substâncias podem prejudicar os resultados da produção e até aumentar os custos. O objetivo do tratamento do ar é produzir a qualidade do ar comprimido especificada pelo consumidor.

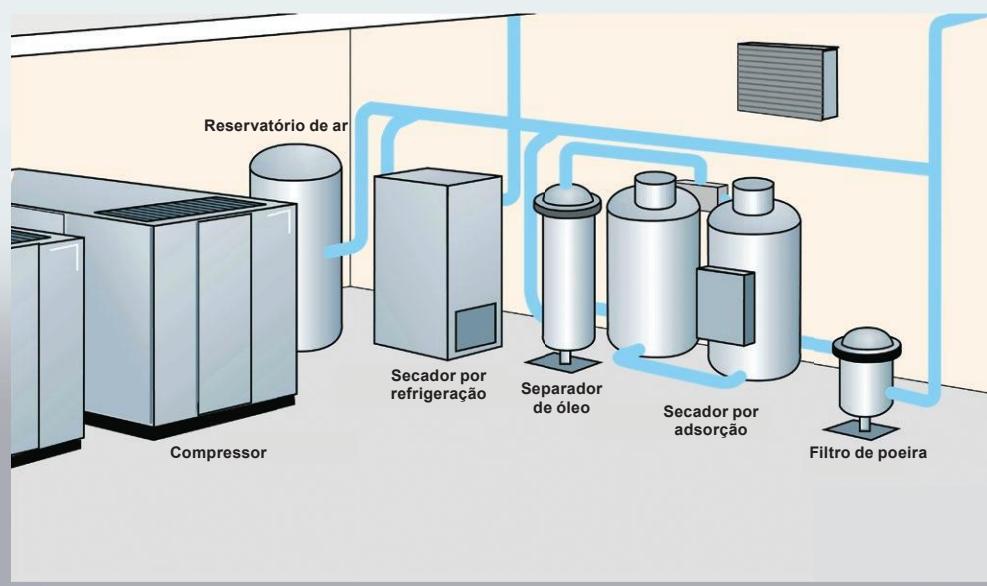
car os resultados da produção e até aumentar os custos. O objetivo do tratamento do ar é produzir a qualidade do ar comprimido especificada pelo consumidor.

Quando o papel do ar comprimido em um processo é definido claramente, é simples encontrar um sistema que será o mais rentável e eficiente nessa situação específica. Trata-se, entre outras coisas, de estabelecer se o ar comprimido entrará em contato direto com o produto ou se, por exemplo, a névoa de óleo pode ser aceita no ambiente de trabalho. É necessário um método sistemático para selecionar o equipamento certo.

3.2.2 Vapor de água no ar comprimido

O ar na atmosfera sempre contém umidade na forma de vapor de água. Algum vapor de água está incluído no ar comprimido e pode causar problemas. Os exemplos incluem: elevados custos de manutenção, vida útil reduzida e desempenho prejudicado de ferramentas, alta taxa de rejeição com pintura por spray e injeção plástica, aumento de vazamentos, distúrbios no sistema de controle e instrumentos, menor vida útil do sistema de tubos devido a corrosão e instalação mais cara. A água pode ser separada usando

3:9



Os principais componentes de uma instalação típica de sistema de ar comprimido. O equipamento de tratamento determina a qualidade do ar comprimido, o que pode afetar a economia da instalação.

3:10

Classe	Número máximo de partículas por m ³			Água	Óleo
	para tamanhos de partículas, d ($\leq m$)			Máx. ponto de orvalho sob pressão (°C)	Máx. conc. (mg/m ³)
	0,1 < d ≤ 0,5	0,5 < d ≤ 1,0	1,0 < d ≤ 5,0		
0	Conforme especificado pelo usuário ou fornecedor do equipamento e mais rigoroso que a classe 1				
1	≤20000	≤400	≤10	-70	0,01
2	≤400000	≤6000	≤100	-40	0,1
3	não especificado	≤90000	≤1000	-20	1
4	não especificado	não especificado	≤10000	+3	5
5	não especificado	não especificado	≤100000	+7	>5
6	0 < c _p ≤ 5			+10	-
c_p = Concentração em massa em mg/m ³ Óleo = Concentração total de óleo (líquido, aerossol e vapor)					

A tabela é da ISO 8573-1 (2010).

acessórios: resfriadores posteriores, separadores de condensado, secadores por refrigeração e secadores por adsorção.

Um compressor que trabalha com 7 bar (man) de sobrepressão comprime o ar para 7/8 do seu volume. Isso também reduz a capacidade do ar de reter o vapor de água em 7/8. A quantidade de água liberada é considerável. Por exemplo, um compressor de 100 kW que aspira o ar a 20°C e 60% de umidade relativa libera aproximadamente 85 litros de água durante um turno de 8 horas. Portanto, a quantidade de água que será separada depende da área de aplicação do ar comprimido. Por sua vez, isso determina qual combinação de resfriadores e secadores é adequada.

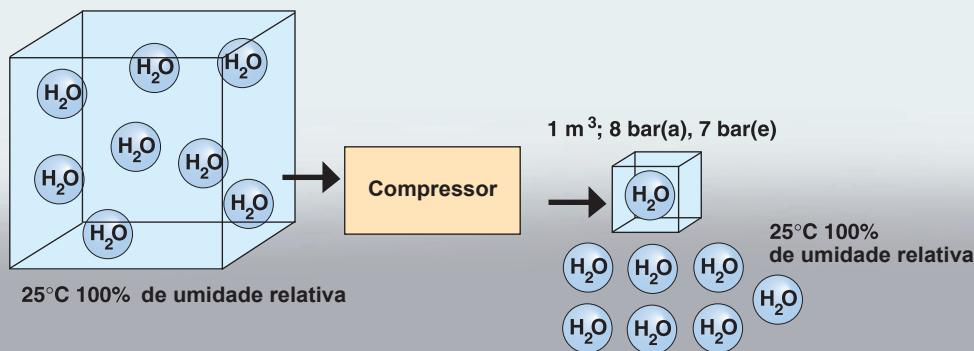
3.2.3 Óleo no ar comprimido

A quantidade de óleo no ar comprimido

depende de vários fatores, incluindo o tipo de máquina, design, idade e condição. Existem dois tipos principais de projeto de compressor a esse respeito: aqueles que funcionam com lubrificante na câmara de compressão e aqueles que funcionam sem lubrificante.

Nos compressores lubrificados, o óleo está envolvido no processo de compressão e também é incluído no ar comprimido (total ou parcialmente). No entanto, nos compressores modernos de pistão e parafuso lubrificados, a quantidade de óleo é muito limitada. Por exemplo, em um compressor de parafuso injetado a óleo, o teor de óleo no ar é inferior a 3 mg/m³ a 20°C. O teor de óleo pode ser reduzido ainda mais usando filtros de vários estágios. Se essa solução for escolhida, é importante considerar as limitações de qualidade, riscos e custos de energia envolvidos.

3:11



Um compressor que trabalha na pressão de 7 bar (man) comprime o ar em 1/8 do seu volume.

3.2.4 Microrganismos no ar comprimido

Mais de 80% das partículas que contaminam o ar comprimido são menores do que 2 µm em tamanho e, portanto, podem passar facilmente através do filtro de admissão do compressor. A partir desse ponto, as partículas se espalham pelo sistema de tubulações e se misturam com os resíduos de água e óleo e os depósitos da própria tubulação. Isso pode resultar no crescimento de microrganismos. Um filtro posicionado diretamente após o compressor pode eliminar esses riscos. No entanto, para ter uma qualidade pura do ar comprimido, o crescimento de bactérias após o filtro deve ser totalmente controlado.

A situação é complicada ainda mais, pois os gases e o aerossol podem ser concentrados em gotículas (por concentração ou carga elétrica), mesmo após a passagem por vários filtros. Os microrganismos podem germinar através das paredes do filtro e, portanto, existem nas mesmas concentrações na entrada e nos lados de saída do filtro. Os microrganismos são extremamente pequenos e incluem bactérias, vírus e bacteriófagos. Normalmente, as bactérias podem ser tão pequenas entre 0,2 µm e 4 µm e os vírus entre 0,3 µm e tão ínfimos 0,04 µm. Contaminação menor do que 1 µm de diâmetro e, consequentemente, os micr-

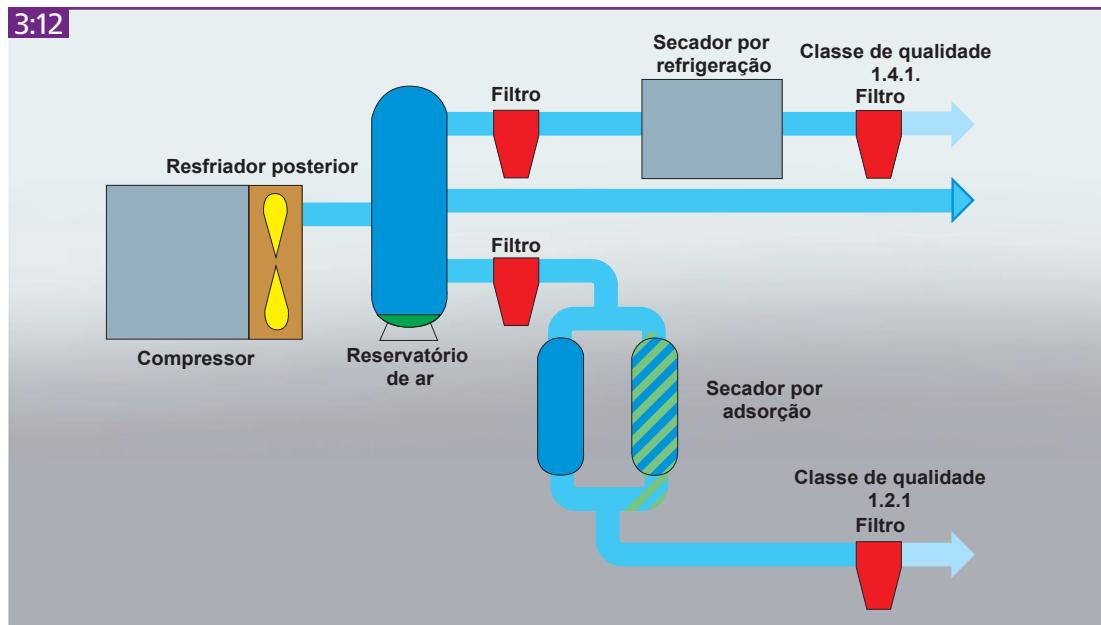
ganismos podem passar facilmente pelo filtro de entrada do compressor.

Apesar do seu tamanho, esses microrganismos são um problema sério em muitas indústrias, porque como organismos "vivos", eles são capazes de se multiplicar livremente sob estas condições. As investigações estabeleceram que os microrganismos se desenvolvem em sistemas de ar comprimido com ar não seco e com alta umidade (100%). O óleo e outras contaminações atuam como nutrientes e permitem que os microrganismos floresçam. O tratamento mais eficaz envolve a secagem do ar a uma umidade relativa <40% (isso pode ser alcançado usando qualquer tipo de seca-dor) e a instalação de um filtro esterilizante no sistema. O filtro esterilizante deve ser instalado em uma carcaça de filtro que permita a esterilização com vapor no local ou que possa ser facilmente aberta. A esterilização deve ser realizada com frequência para manter a boa qualidade do ar.

3.2.5 Filtros

Os modernos filtros de fibra são muito eficientes na remoção de óleo. No entanto, é difícil controlar com precisão a quantidade de óleo remanescente no ar após a filtragem, pois a temperatura, entre outros fatores, tem um impacto significativo no processo de separação.

3:12



Esquema de uma instalação que pode fornecer ar comprimido com diferentes classes de qualidade do ar, de acordo com a norma ISO 8573-1.

A eficiência do filtro também é afetada pela concentração de óleo no ar comprimido, bem como pela quantidade de água livre. Os dados indicados na especificação do filtro sempre se aplicam a uma temperatura específica do ar, geralmente 21°C. Isso corresponde a temperatura aproximada do ar após um compressor resfriado a ar trabalhar numa temperatura ambiente de 10°C. No entanto, mudanças climáticas e sazonais podem causar variações de temperatura, o que, por sua vez, afetará a capacidade de separação do filtro. O ar deve estar o mais seco possível para obter os melhores resultados. Todos os filtros de óleo, carvão ativado e esterilizadores fornecem resultados ruins se houver água livre no ar (as especificações do filtro não se aplicam nessas condições). Os filtros de fibra só podem remover o óleo na forma de gotículas ou como aerossóis. O vapor de óleo deve ser removido usando um filtro com carvão ativado. Um filtro de fibra instalado corretamente, juntamente com um pré-filtro adequado, pode reduzir a quantidade de óleo no ar comprimido para aproximadamente 0,01 mg/m³. Um filtro com carvão ativado pode reduzir a quantidade de óleo para 0,003 mg/m³.

O carvão ativado é produzido especificamente para cobrir uma extensa superfície interna. O carvão ativado é capaz de absorver 10-20% de seu próprio peso em óleo.

Um filtro revestido com pó de carvão ativado contém, portanto, apenas uma pequena quantidade de pó de carbono. Isso limita sua vida útil e seu uso é restrito a 20°C. O filtro de esferas de carvão ativado a granel contém uma grande quantidade de carvão ativado. Isso o torna mais adequado para muitas aplicações (mesmo em temperaturas mais altas) e aumenta a vida útil do filtro.

Esta vida é influenciada pela temperatura do ar. A medida que a temperatura aumenta, a quantidade de vapor de óleo aumenta exponencialmente. Os filtros de carvão ativado devem conter a quantidade adequada de carbono e devem ser dimensionados para criar a menor queda de pressão possível. Os filtros com carvão ativado apenas removem a contaminação do ar na forma de vapor e devem ser precedidos por outros filtros apropriados. Para um efeito ideal, os filtros também devem ser colocados o mais próximo possível da aplicação em questão. Além disso, eles devem ser verificados regularmente e substituídos com frequência.

O compressor isento de óleo elimina a necessidade de filtro de óleo. Isso significa que o com-

pressor pode trabalhar com uma pressão de desgaste mais baixa, reduzindo assim o consumo de energia.

Foi demonstrado, em muitos casos, que compressores isentos de óleo são a melhor solução, tanto do ponto de vista econômico quanto da qualidade do ar.

3.2.6 Resfriador posterior

O ar comprimido do compressor é aquecido após a compressão, geralmente a uma temperatura entre 70–200°C. Um resfriador posterior é usado para diminuir essa temperatura, o que também reduz o teor de água. Atualmente, este equipamento é frequentemente incluído como equipamento padrão para uma instalação de compressor. O resfriador posterior deve sempre ser colocado diretamente após o compressor. O trocador de calor resfria o ar quente e, em seguida, direciona a maior parte da água de condensação para fora do fluxo de ar comprimido. O resfriador posterior pode ser resfriado a água ou a ar, sendo geralmente equipado com um separador de água com drenagem automática.

3.2.7 Separador de água

A maioria das instalações de compressores é equipada com um resfriador posterior e um separador de água, a fim de separar o máximo possível de água condensada do ar comprimido. Com a escolha correta do separador de água, é possível obter uma eficiência de 80 a 90%.

A água restante flui como névoa junto com o ar comprimido para o reservatório de ar.

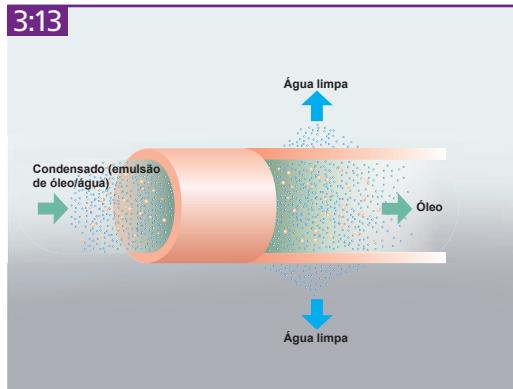
3.2.8 Separação de óleo/água

O óleo na forma de gotículas é separado parcialmente no resfriador posterior, no separador de condensados ou na torneira de condensação e flui através do sistema junto com a água condensada. Esta emulsão de óleo/ água é classificada do ponto de vista ambiental como óleo usado e não deve ser drenada para o sistema de esgoto ou diretamente para a natureza.

Novas e mais rigorosas leis estão sendo introduzidas continuamente com relação ao manuseio de resíduos ambientalmente perigosos. A drenagem do condensado, assim como sua coleta, é complexa e cara.

Uma solução fácil e econômica para esse problema envolve a instalação de um separador de

3:13



Princípio de funcionamento de um filtro de diafragma para separação de óleo. O diafragma deixa passar pequenas moléculas (água limpa), enquanto moléculas maiores (óleos) são mantidas no sistema e podem ser coletadas em um recipiente.

óleo/água, por exemplo, com um filtro de diafragma para produzir água de drenagem limpa e drenar o óleo em um receptor especial.

3.2.9 Ar medicinal

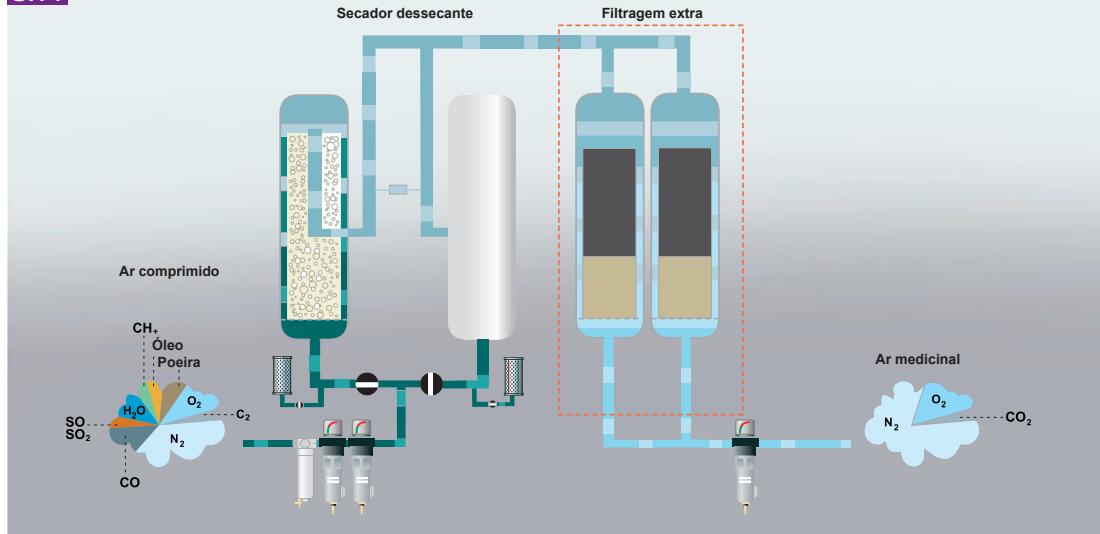
Além dos requisitos regulares de pureza do ar, existem aplicações especiais que exigem um grau ainda mais alto de purificação do tratamento do ar. O ar de alta qualidade é de vital importância para muitas indústrias, mas em nenhum lugar isso é tão literalmente verdadeiro quanto no setor médico. A pureza do ar medicinal para

pacientes hospitalares deve ser 100% garantida. No entanto, o ar aspirado do nosso meio ambiente para produzir ar medicinal, especialmente em cidades ou áreas industriais, raramente é de qualidade suficiente para se pensar em usar.

A filtragem de ar medicinal consiste em várias etapas de purificação para tratar o ar comprimido, de modo que o resultado é extremamente limpo. Ao usar um separador de água e dois filtros coalescentes, contaminantes como água, partículas e gotículas de óleo são eliminados do ar antes de entrar no secador de adsorção com regeneração a frio. Este secador reduz o ponto de orvalho para -40°C , que é a temperatura necessária para se qualificar para uso médico.

Depois de passar pelo secador de adsorção, o ar passa por uma etapa extra de filtragem, cuja função é dupla. O carvão ativado (também consulte a Seção 3.2.5 sobre carvão ativado) reduz os hidrocarbonetos, como vapor de óleo e cheiros, a níveis inofensivos, e um catalisador converte concentrações excessivas de óxido de carbono em dióxido de carbono. Nesta etapa de filtragem, os contaminantes de óxido de enxofre e óxido de nitrogênio também são reduzidos ao mínimo absoluto. Na fase final, um filtro de partículas elimina as partículas de poeira que podem ter sido introduzidas no ar pelo secador ou pela unidade extra de filtragem. Os requisitos para o mercado médico diferem em cada país e são regidos pela legislação local.

3:14



Esquema de uma instalação que fornece ar medicinal.

3.3 SISTEMA DE RESFRIAMENTO

3.3.1 Compressores resfriados a água

3.3.1.1 Geral

Quanto mais ar comprimido é resfriado em um compressor, dentro do resfriador intermediário e do resfriador posterior, mais energeticamente eficiente o compressor será e mais vapor de água será condensado. Uma instalação de compressor resfriado a água exige pouca demanda do sistema de ventilação da sala de compressores, pois a água de resfriamento contém, na forma de calor, cerca de 90% da energia consumida pelo motor elétrico.

Os sistemas de resfriamento de água do compressor podem se basear em um dos três princípios básicos: sistemas abertos sem circulação de água (conectados a uma fonte externa de água), sistemas abertos com circulação de água (com torre de resfriamento) e sistemas fechados com água em circulação (incluindo um trocador de calor externo/radiador).

3.3.1.2 Sistema aberto sem água de circulação

Em um sistema aberto sem circulação de água, a água é fornecida por uma fonte externa: abas-

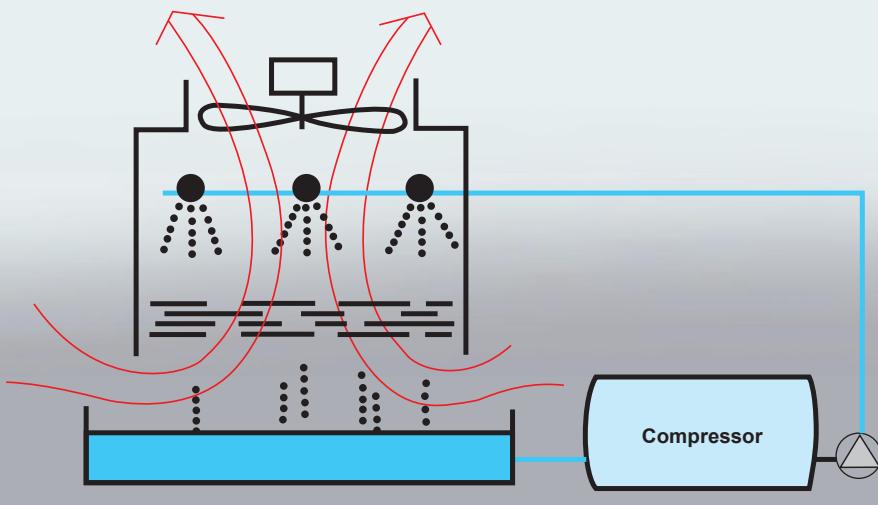
tecimento de água municipal, lago, córrego ou poço e após a passagem através do compressor, essa água é descarregada como residual. O sistema deve ser controlado por um termostato, para manter a temperatura do ar desejada e para controlar o consumo de água.

Geralmente, um sistema aberto é fácil e barato de instalar, mas caro de operar, principalmente se a água de resfriamento for retirada da rede municipal de água. A água de um lago ou riacho é normalmente gratuita, mas deve ser filtrada e purificada para limitar o risco de entupimento do sistema de resfriamento. Além disso, a água rica em cal pode resultar na formação de incrustações dentro dos resfriadores e gradualmente causar um resfriamento deficiente. O mesmo se aplica à água salgada, que pode, no entanto, ser usada se o sistema for projetado adequadamente e dimensionado de acordo.

3.3.1.3 Sistema aberto com água de circulação

Em um sistema aberto com água em circulação, a água de resfriamento do compressor é arrefecida em uma torre de resfriamento aberta. A água é resfriada nesta torre, fluindo para dentro de uma câmara enquanto o ar circundante é nela soprado. Como resultado, parte da água evapora e a água restante é resfriada a 2°C abaixo da temperatura ambiente (isso pode variar, dependendo da temperatura e da umidade relativa).

3:15



Sistema de refrigeração aberto com água de refrigeração circulante.

Os sistemas abertos com água em circulação são usados principalmente quando a disponibilidade de um suprimento externo de água é limitada. A desvantagem deste sistema é que a água se torna gradualmente contaminada pelo ar circundante. O sistema deve ser diluído continuamente com água externa devido a evaporação. Sais dissolvíveis são depositados nas superfícies metálicas quentes, reduzindo a capacidade de transferência térmica da torre de resfriamento. A água deve ser analisada e tratada regularmente com produtos químicos para evitar o crescimento de algas. Durante o inverno, quando o compressor não está funcionando, a torre de resfriamento deve ser drenada ou a água deve ser aquecida para evitar o congelamento.

3.3.1.4 Sistema fechado

Em um sistema de resfriamento fechado, a mesma água circula continuamente entre o compressor e alguma modalidade de trocador de calor externo. Por sua vez, este trocador de calor é resfriado por meio de um circuito externo de água ou pelo ar do entorno.

3:16

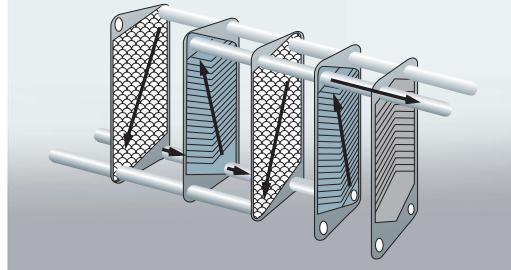
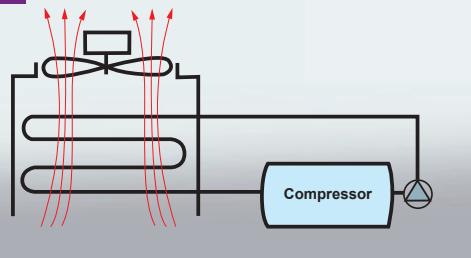


Ilustração de um trocador de calor plano. Os trocadores de calor planos são fáceis de limpar, o que possibilita o resfriamento indireto do compressor usando água do lago ou água do córrego.

Quando a água é arrefecida usando outro circuito de água, é usado um trocador de calor de placa plana.

Quando a água é resfriada usando o ar circundante, é utilizada uma matriz de resfriamento composta por tubos e aletas de resfriamento. O ar do entorno é迫使ido a circular pelos tubos e aletas por meio de um ou mais ventiladores. Este método é adequado se a disponibilidade de água de resfriamento for limitada. A capacidade de resfriamento de circuitos abertos ou fechados é praticamente a mesma, isto é, a água do com-

3:17



Um aquecedor de ar básico (trocador de calor resfriado a ar) pode ser encontrado em sistemas de resfriamento fechados para líquidos de arrefecimento, como água/ /glicol, óleo, etc. Em ambientes agressivos ou com líquidos agressivos, são utilizados resfriadores de aço inoxidável ou titânio.

pressor é resfriada a 5°C acima da temperatura do líquido de resfriamento.

Se a água de resfriamento for arrefecida pelo ar circundante, então será necessária a adição de um anticongelante (por exemplo, glicol).

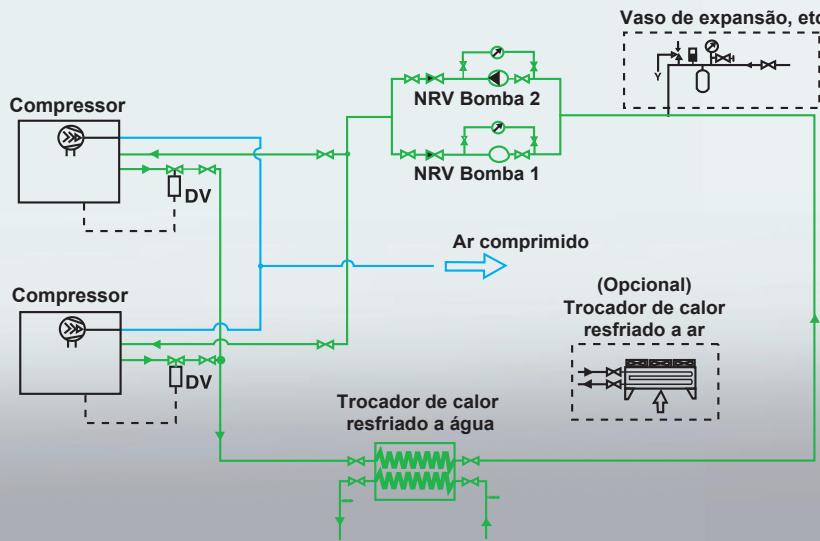
O sistema de água de resfriamento fechado é cheio com água pura e amolecida. Quando o glicol é adicionado, o fluxo de água do sistema do compressor deve ser recalculado, pois o tipo e a concentração de glicol afetam a capacidade térmica e a viscosidade da água. Também é importante que todo o sistema seja completamente limpo antes de ser preenchido pela primeira vez. Um sistema de água fechado corretamente implantado requer muito pouca supervisão e tem baixos custos de manutenção. Para instalações nas quais a água de resfriamento disponível é potencialmente corrosiva, o resfriador deve ser projetado com um material resistente à corrosão, como o Incoloy.

3:18

Ponto de congelamento °C	Mistura de glicol %	Capacidade térmica específica kJ/kg x K
-10	23	3.850
-15	30	3.650
-20	37	3.450
-25	43	3.350
± 0	0	4.190

A água deve ser protegida de congelamento a baixas temperaturas. Lembre-se de que o tamanho do resfriador pode precisar ser aumentado, pois, por exemplo, uma mistura de água/glicol tem uma capacidade térmica mais baixa do que a água pura.

3:19



Esquema de um sistema de resfriamento fechado. O trocador de calor pode ser resfriado a água ou a ar.

3.3.2 Compressores resfriados a ar

A maioria dos pacotes de compressores modernos também está disponível em versão resfriada a ar, na qual a ventilação forçada dentro do pacote de compressores de ar contém quase 100% da energia consumida pelo motor elétrico.

3.4 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

3.4.1 Geral

Quando o ar é comprimido, o calor é gerado. Antes de o ar comprimido ser distribuído no sistema de tubulações, a energia térmica é extraída e se torna um calor residual. Para cada instalação de ar comprimido, deve ser analisado o problema da capacidade de resfriamento suficiente e confiável. O resfriamento pode ocorrer por meio do ar externo ou de um sistema de água de resfriamento que utiliza rede de água municipal, água corrente ou água de processo em um sistema aberto ou fechado.

Muitas instalações que produzem ar comprimido apresentam possibilidades significativas de economia de energia na forma de recuperação de energia residual, mas que frequentemente não são utilizadas. Em grandes indústrias, os custos

de energia podem chegar a 80% do custo total da produção do ar comprimido.

Até 94% da energia fornecida ao compressor pode ser recuperada como, por exemplo, água quente a 90°C a partir de compressores de parafuso isentos de óleo.

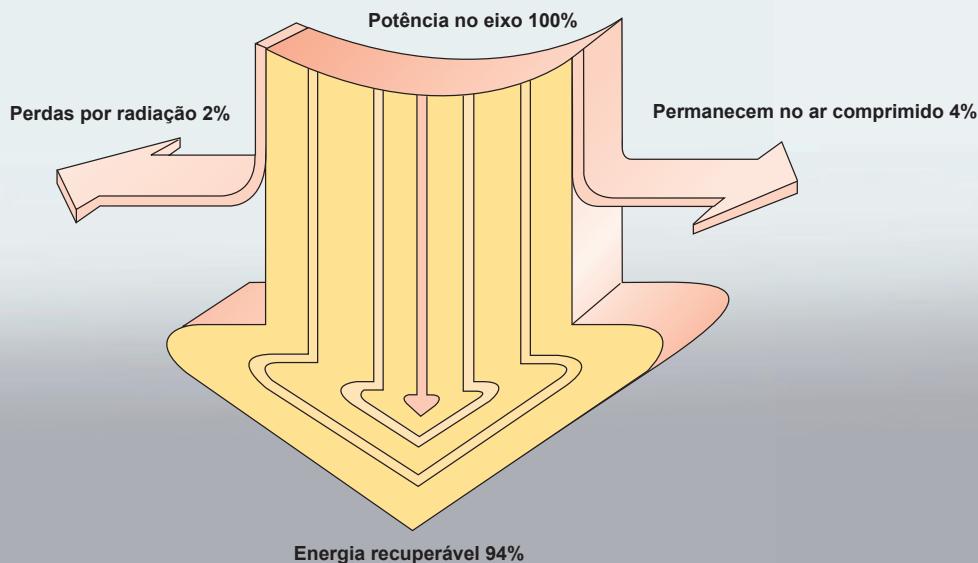
Esse fato ilustra que as medidas de economia fornecem rapidamente um retorno substancial.

Uma planta central de compressores, numa grande indústria que consome 500 kW em mais de 8.000 horas de operação por ano, representa um consumo anual de energia de 4 milhões de kWh. São reais as possibilidades de recuperar significativas quantidades de calor desperdiçado através do ar quente ou da água quente.

O retorno do investimento para recuperação de energia é geralmente tão breve, varia de 1 a 3 anos. Além disso, a energia recuperada por meio de um sistema de resfriamento fechado melhora as condições de operação, confiabilidade e vida útil do compressor. Isso é devido a um nível de temperatura equalizado e a alta qualidade da água de resfriamento, para citar apenas algumas vantagens. Os países nórdicos são um dos precursores nessa área e a recuperação de energia tem sido uma prática usual há algum tempo nas instalações de compressores.

A maioria dos compressores de médio e grande porte proveniente dos principais fornecedores está agora adaptada para ter equipamento padrão de recuperação de calor residual.

3:20



Como o calor é o subproduto inevitável da compressão, a energia pode ser recuperada na forma de água quente do sistema de resfriamento do compressor.

3:21

Água de resfriamento e seu uso

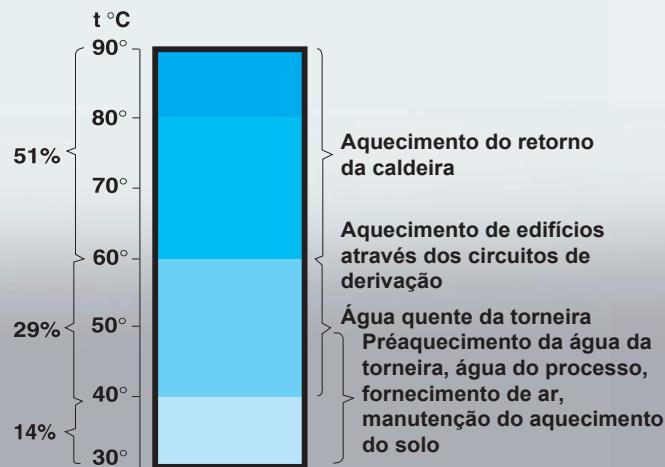
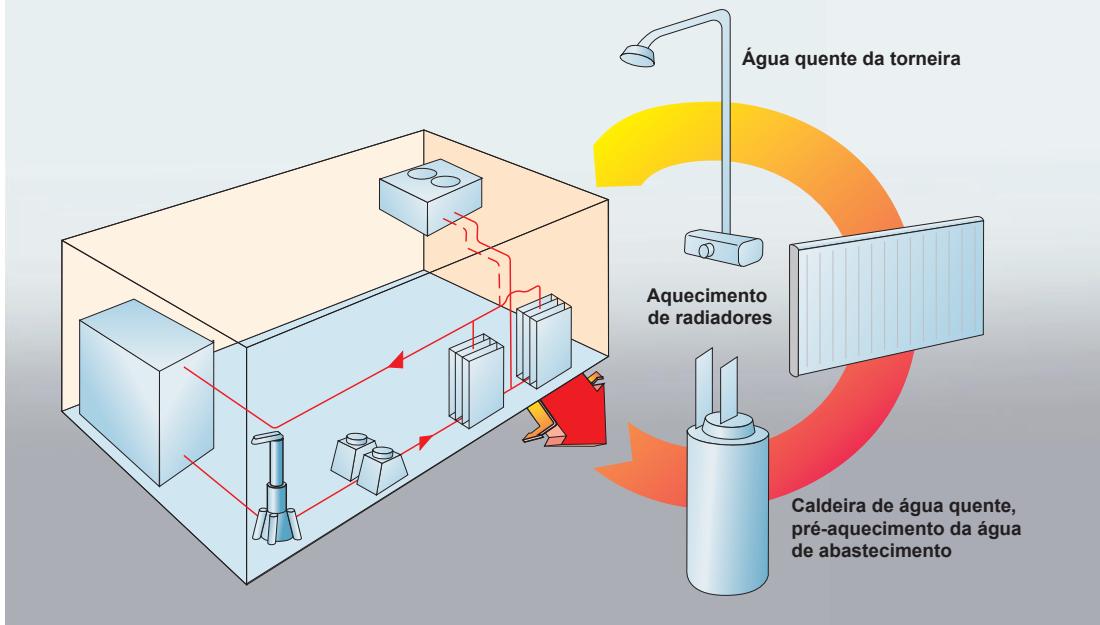


Diagrama que ilustra algumas das áreas de aplicação típicas para recuperação de energia da água de resfriamento do compressor. Nos níveis mais altos de temperatura, existe o maior grau de recuperação.

3:22



Cada instalação de compressor tem um grande potencial para recuperação de energia. Até 95% da energia fornecida pode ser recuperada de grandes compressores de parafuso isentos de óleo.

3.4.2 Cálculo do potencial de recuperação

As leis da física determinam que quase toda a energia fornecida a instalação de um compressor seja convertida em calor. Quanto mais energia puder recuperar e utilizar em outros processos, maior será a eficiência geral do sistema. A quantidade de calor que tem condição de ser recuperada pode ser calculada pela equação:

Energia recuperada in kWh annui:

$$W = [(K_1 \times Q_1) + (K_2 \times Q_2)] \times T_R$$

$$\text{Economias por ano : (€)} = W \times \frac{e_p}{n}$$

T_R = Tempo de demanda de energia recuperada (TR) [horas/ano]

K_1 = Parte do TR com compressor em carga [horas/ano]

K_2 = Parte do TR com compressor em alívio [horas/ano]

Q_1 = Potência disponível de resfriamento com o compressor em carga [kW]

Q_2 = Potência disponível de resfriamento com o compressor em alívio [kW]

e_p = Nível de preço da energia [€/kWh]

η = Eficiência normal da fonte de calor [%]

Em muitos casos, o grau de recuperação de calor pode exceder 90% se a energia obtida com o resfriamento da central de compressores puder ser utilizada com eficiência.

A função do sistema de resfriamento, a distância até o ponto de consumo, e o grau e a continuidade da necessidade de calor são fatores decisivos. Com grandes fluxos térmicos, vender a energia térmica recuperada é uma possibilidade que não deve ser ignorada. O fornecedor de energia elétrica pode ser um cliente em potencial e o investimento, a subordem e a entrega podem ser prontamente negociadas. Também existe uma oportunidade de economia, coordenando a recuperação de energia de vários processos.

3:23

Energia recuperável			
FAD m ³ /min	Fluxo de calor kW	Economia de 2000 hs oper./ano kWh/ano	Óleo E01 m ³ /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

Exemplo de potencial de recuperação de compressores.

3.4.3 Métodos de recuperação

3.4.3.1 Geral

A recuperação de energia de instalações de ar comprimido nem sempre gera o calor que é necessário e, muitas vezes, nem a quantidade suficiente. A quantidade de energia recuperada flutua ao longo do tempo se o compressor tiver uma carga variável. Para que a recuperação seja viável, é necessária uma demanda de energia térmica correspondente e relativamente estável. A energia térmica residual recuperada é a melhor utilizada para suplementar a energia fornecida ao sistema, de modo que a energia disponível seja sempre utilizada quando o compressor estiver em operação.

3.4.3.2 Sistema resfriado a ar

As opções para os compressores resfriados a ar, que produzem uma alta vazão de ar quen-

te a uma temperatura relativamente baixa, são o aquecimento direto do edifício ou a troca de calor por uma bateria de pré-aquecimento. O ar de resfriamento aquecido é então distribuído usando um ventilador.

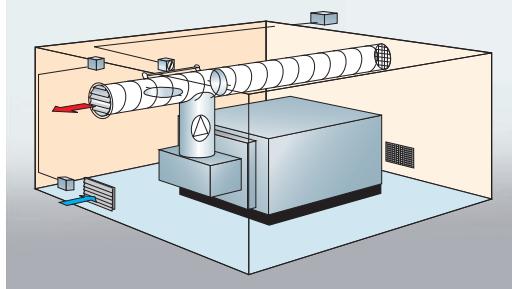
Quando os edifícios não precisam de calor adicional, o ar quente é evacuado para a atmosfera, automaticamente pelo controle do termostato ou manualmente pelo controle de um registro de ar. Um fator limitante é a distância entre os compressores e o prédio que precisa ser aquecido. Essa distância deve ser limitada (de preferência a distância entre prédios vizinhos). Além disso, a possibilidade de recuperação pode ser limitada aos períodos mais frios do ano. A recuperação de energia pelo ar é mais comum em compressores de pequeno e médio porte.

A recuperação do calor residual dos sistemas de resfriamento de ar do compressor resulta em apenas pequenas perdas na distribuição e requer pouco investimento.

3.4.3.3 Sistema resfriado a água

A água de resfriamento de um compressor com a temperatura de até 90°C pode complementar um sistema de aquecimento de água quente. Se a água quente for usada para lavar, limpar ou tomar banho, ainda será necessário uma caldeira de água quente com carga normal. A energia

3:24

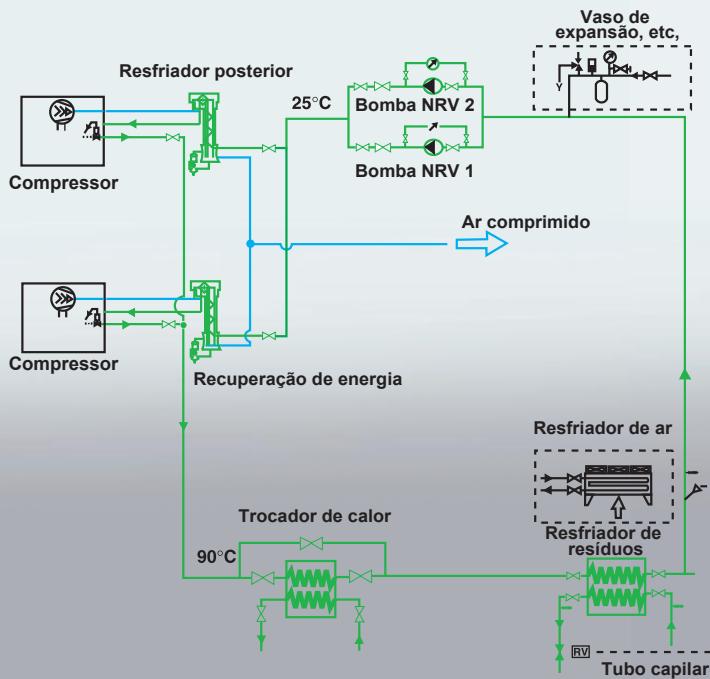


Recuperação de energia de um compressor resfriado a ar.

recuperada do sistema de ar comprimido forma uma fonte de calor suplementar que reduz a carga na caldeira, economiza combustível para o aquecimento e pode resultar potencialmente no uso de uma caldeira menor.

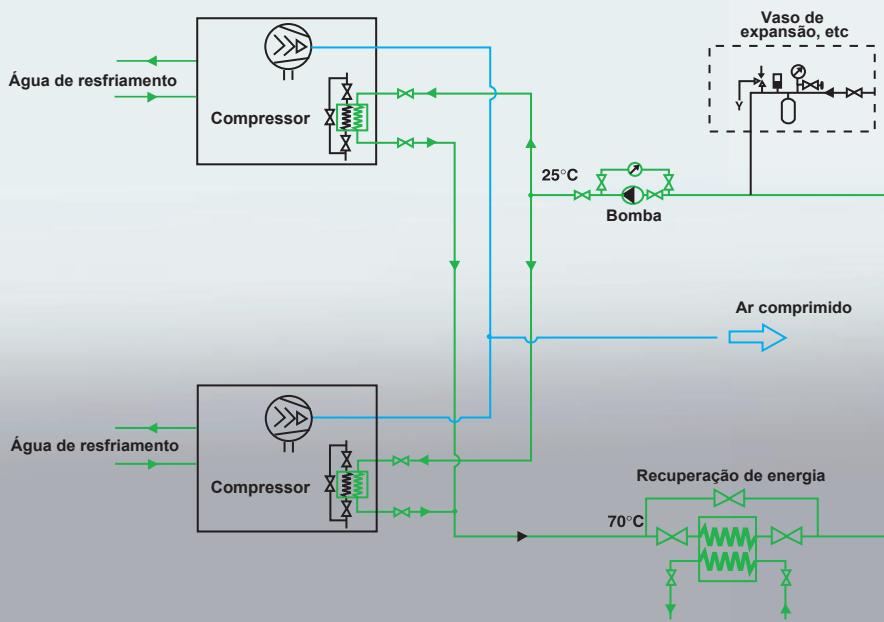
Os pré-requisitos para recuperação de energia dos compressores de ar diferem em parte e dependem do tipo de compressor. Os compressores isentos de óleo padrões são fáceis de modi-

3:25



Exemplo de recuperação de energia à base de água de um compressor de parafuso com isenção de óleo.

3:26



Exemplo de recuperação de energia à base de água de um compressor de parafuso lubrificado a óleo. O resfriador de resíduos com sistema de regulagem está integrado ao compressor.

ficar para a recuperação de energia. Este tipo de compressor é ideal para se integrar em um sistema de aquecimento de água quente, pois fornece a temperatura da água (90°C) necessária para a recuperação eficiente de energia.

Nos compressores lubrificados a óleo, o óleo que participa do processo de compressão é um fator que limita as possibilidades de conseguir altas temperaturas da água de resfriamento.

Nos compressores centrífugos, os níveis de temperatura são geralmente mais baixos devido a menor relação de compressão por estágio, limitando assim o grau de recuperação de energia.

A recuperação de energia residual a base de água é a mais adequada para compressores com potência do motor elétrico acima de 10 kW. A recuperação de resíduos de energia a base de água requer uma instalação mais complexa do que a recuperação de resíduos de energia por via aérea. O equipamento básico consiste em bombas de fluidos, trocadores de calor e válvulas de regulagem.

O calor também pode ser distribuído em edifícios de localização remota, utilizando diâmetros de tubos relativamente pequenos (40-80 mm), sem perdas significativas de calor pelo uso da recuperação de energia transportada pela água. A alta temperatura inicial da água significa que a sobra de energia pode ser usada para aumentar a temperatura da água que retorna de uma caldeira de água quente. Portanto, a fonte de aquecimento convencional pode ser periodicamente desligada e substituída pelo sistema de recuperação de calor residual do compressor. O calor residual dos compressores na indústria de processo também pode ser usado para aumentar a temperatura do processo.

Também é possível usar compressores de parafuso lubrificados a óleo, resfriados a ar, para aplicar a recuperação de energia de resíduos a base de água. Isso requer um trocador de calor no circuito de óleo, e o sistema fornecerá água a temperaturas mais baixas (50°C - 60°C) do que com compressores isentos de óleo.

3.5 A SALA DE COMPRESSORES

3.5.1 Geral

Há pouco tempo, a aquisição de um compressor exigia que o cliente comprasse o motor elétrico, o equipamento de partida, o resfriador posterior, os filtros de admissão, etc. O cliente também precisava examinar minuciosamente as demandas de capacidade e a qualidade dos acessórios com todos os vários fornecedores de componentes. Isso era feito para garantir que todos os equipamentos fossem compatíveis com o compressor. Hoje, um compressor e todos os seus acessórios são comprados como uma solução de turnkey, e muitas vezes como um pacote totalmente integrado.

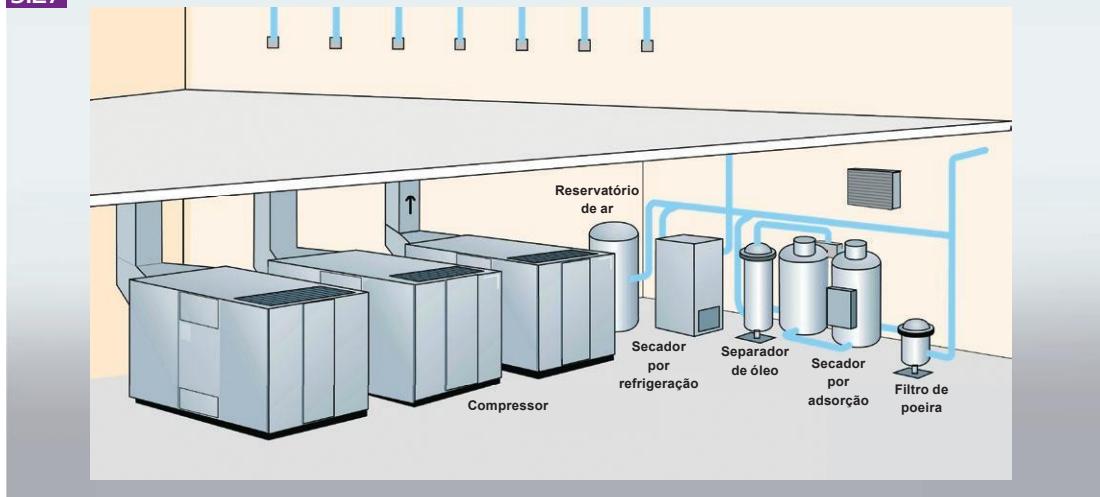
A unidade compressora é constituída por uma base, sobre a qual o compressor e os acessórios são montados. Todas as conexões internas entre as diferentes peças são produzidas na fábrica.

O pacote completo do compressor é fornecido em uma cabine de absorção de som para reduzir os níveis de ruído. Isso resultou em uma simplificação significativa da instalação. Um exemplo excelente é o chamado 'compressor no local de trabalho', que incorpora os sistemas de tratamento do ar totalmente integrados (secador, filtro, removedor de condensado, etc.) e medidas muito eficazes de redução de ruído e vibração.

Esses modernos pacotes de compressores são instalados ao longo do sistema de distribuição do ar comprimido existente ou em futuras expansões. Independentemente disso, é importante lembrar que o método de instalação ainda pode ter uma influência significativa no desempenho e na confiabilidade do sistema do compressor.

A regra principal para uma instalação é, em primeiro lugar, organizar uma central de compressores separada. A experiência mostra que a centralização é preferível, independentemente da indústria. Entre outras coisas, ele fornece economia operacional aprimorada, um sistema de ar comprimido melhor projetado, facilidade de uso e de manutenção, proteção contra acesso não autorizado, controle de ruído adequado e possibilidades mais simples de ventilação controlada. Em segundo lugar, uma área separada num edifício usado para outros fins pode ser destinada a

3:27



A instalação em uma sala de compressores é simples. O pacote do compressor é uma solução pronta para o uso, pronta para instalar e conectar aos equipamentos auxiliares necessários.

instalação do compressor. Certos riscos e inconvenientes devem ser considerados com esse tipo de instalação, por exemplo: distúrbios devido a ruído ou as exigências de ventilação do compressor, riscos físicos e/ou riscos de superaquecimento, drenagem de condensados, ambientes perigosos com, por exemplo, pó ou substâncias inflamáveis, substâncias agressivas no ar, além de requisitos de espaço para expansão futura e acessibilidade para manutenção. Entretanto, a instalação numa oficina ou armazém pode facilitar a implantação de recuperação de energia. Se não houver locais disponíveis para a instalação do compressor em ambientes fechados, ele também poderá ser instalado ao ar livre, sob um teto. Nesse caso, certos aspectos devem ser considerados: o risco de congelamento em coletores e descarga de condensados, proteção contra chuva e neve na abertura de entrada de ar, entrada e sucção de ventilação, fundação sólida e plana (asfalto, laje de concreto ou superfície plana de telhas), risco de poeira, substâncias inflamáveis ou agressivas e proteção contra acesso não autorizado.

3.5.2 Posicionamento e projeto

A planta de ar comprimido deve ser instalada para facilitar o encaminhamento do sistema de distribuição em grandes instalações com tubulação longa. O serviço e a manutenção podem ser facilitados com a instalação da planta de ar comprimido perto de equipamentos auxiliares, como

bombas e ventiladores; até um local próximo a sala da caldeira pode ser benéfico.

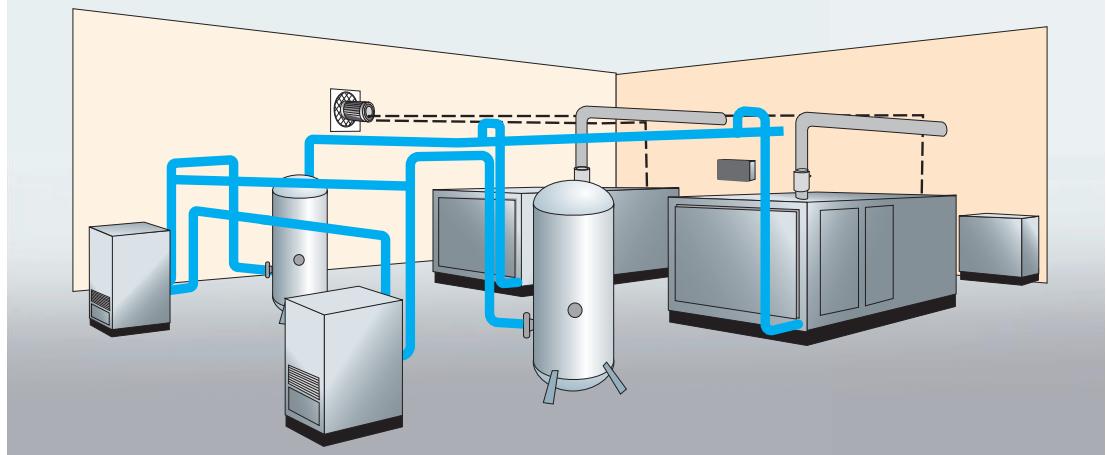
O edifício deve possuir equipamentos de elevação dimensionados para lidar com os componentes mais pesados da instalação do compressor (geralmente o motor elétrico) e/ou ter acesso a uma empilhadeira. Também deve ter espaço suficiente para a instalação de um compressor extra para expansão futura.

Além disso, uma folga na altura da sala deve ser suficiente para permitir a elevação de um motor elétrico ou similar, se necessário. A planta de ar comprimido deve ter um dreno no piso ou outros dispositivos para lidar com os condensados do compressor, resfriador posterior, reservatório de ar, secadores, etc. O dreno do piso deve ser implantado em conformidade com a legislação municipal.

3.5.3 Fundação

Normalmente, apenas um piso plano com capacidade suficiente de suporte do peso é necessário para instalar a planta do compressor. Na maioria dos casos, os recursos antivibração estão integrados na planta. Para novas instalações, geralmente é utilizado um pedestal para cada pacote de compressor, a fim de permitir a limpeza do piso. Os compressores de pistão e centrífugos grandes podem exigir uma fundação de laje de concreto, ancorada ao leito de rocha ou em uma base sólida do solo.

3:28



É importante que a instalação do compressor tenha um layout que seja favorável e flexível para atender a futuras expansões. A área mínima nos pontos de serviço em frente aos gabinetes elétricos da máquina deve ser de 1.200 mm.

O impacto da vibração produzida externamente foi reduzido ao mínimo para instalações avançadas e completas de compressores. Em sistemas com compressores centrífugos, pode ser necessário amortecer as vibrações da fundação da sala de compressores.

3.5.4 Entrada de ar

O ar que entra no compressor deve estar limpo e livre de contaminação sólida e gasosa. Partículas de sujeira que causam desgaste e gases corrosivos podem ser particularmente prejudiciais.

A entrada de ar do compressor geralmente está localizada em uma abertura na cabine de redução de som, mas também pode ser colocada remotamente, em um local em que o ar esteja o mais limpo possível.

A contaminação por gases de escape de veículos pode ser fatal se misturada com o ar que deve ser inalado. Um pré-filtro (filtro de ciclone, painel ou de faixa rotativa) deve ser usado em instalações onde o ar ambiente tem uma alta concentração de poeira. Nesses casos, a queda de pressão causada pelo pré-filtro deve ser considerada no projeto.

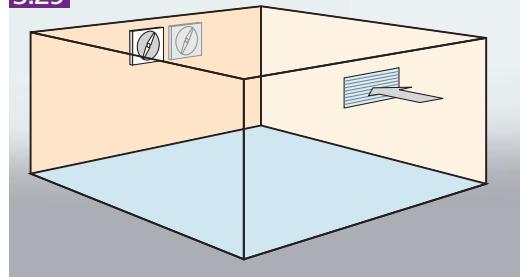
Também é benéfico que o ar de entrada seja frio. Portanto, pode ser melhor encaminhar esse ar através de um tubo separado, desde a parte externa do edifício até o compressor.

É importante, para esta finalidade, que sejam utilizados tubos resistentes a corrosão, equipa-

dos com malha na entrada e projetados para que não haja risco de atrair neve ou chuva para o compressor. Também é importante usar tubos de diâmetro suficientemente grande para ter a menor perda de carga possível.

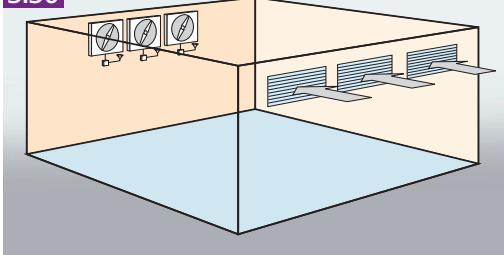
O projeto dos tubos de entrada nos compressores de pistão é particularmente crítico. A ressonância no tubo, provocada por ondas acústicas que são causadas pela frequência de pulsação cíclica do compressor, pode danificar a tubulação, o próprio compressor, causar vibrações e prejudicar o ambiente por meio de irritante ruído de baixa frequência.

3:29



Solução básica de ventilação. A desvantagem é que a ventilação é constante, independentemente da temperatura externa. Além disso, podem ocorrer dificuldades se dois compressores estiverem instalados. Os ventiladores serão superdimensionados se apenas um dos compressores for usado. O problema pode ser resolvido montando os ventiladores com motores de velocidade controlada, que partem através de um termostato de vários estágios.

3:30



Sistema com vários ventiladores controlados por termostato, que juntos podem atender à necessidade total de ventilação. Os termostatos dos ventiladores individuais são configurados para diferentes faixas, o que significa que a quantidade de ar de ventilação pode variar dependendo da temperatura externa e/ou do número de compressores em uso (pois os termostatos ligam os ventiladores um após o outro, dependendo da temperatura na sala do compressor). Alternativamente, os ventiladores podem partilhar através de um termostato de vários estágios.

3.5.5 Ventilação da sala de compressores

O calor na sala é gerado a partir de todos os compressores. Esse calor é exaurido ventilando a sala de compressores. A quantidade de ar de ventilação é determinada pelo tamanho do compressor e se é resfriado a ar ou a água.

O ar de ventilação dos compressores resfriados a ar contém quase 100% da energia consumida pelo motor elétrico na forma de calor.

O ar de ventilação dos compressores resfriados a água contém cerca de 10% da energia consumida pelo motor elétrico.

O calor deve ser removido para manter a temperatura na sala dos compressores em um nível aceitável. O fabricante do compressor deve fornecer informações detalhadas sobre o fluxo de ventilação necessário, mas esse valor também pode ser calculado de acordo com o seguinte:

$$q_v = \frac{P_v}{1.21 \times \Delta T}$$

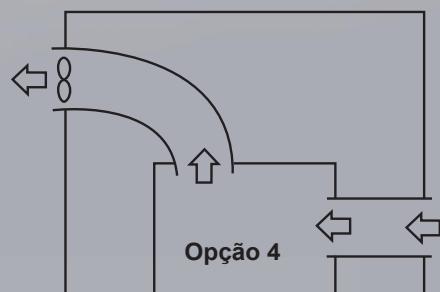
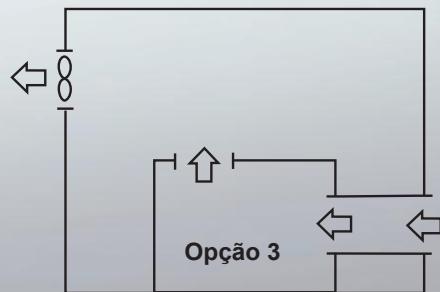
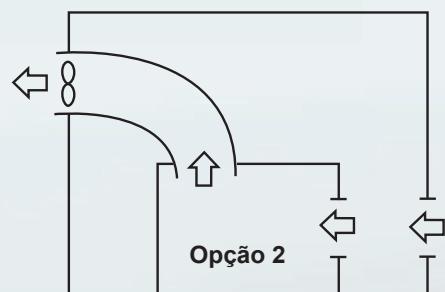
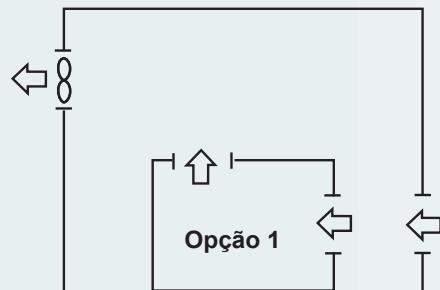
q_v = quantidade de ar de ventilação [m^3/s]

P_v = fluxo de calor [kW]

ΔT = aumento permitido de temperatura [$^\circ\text{C}$]

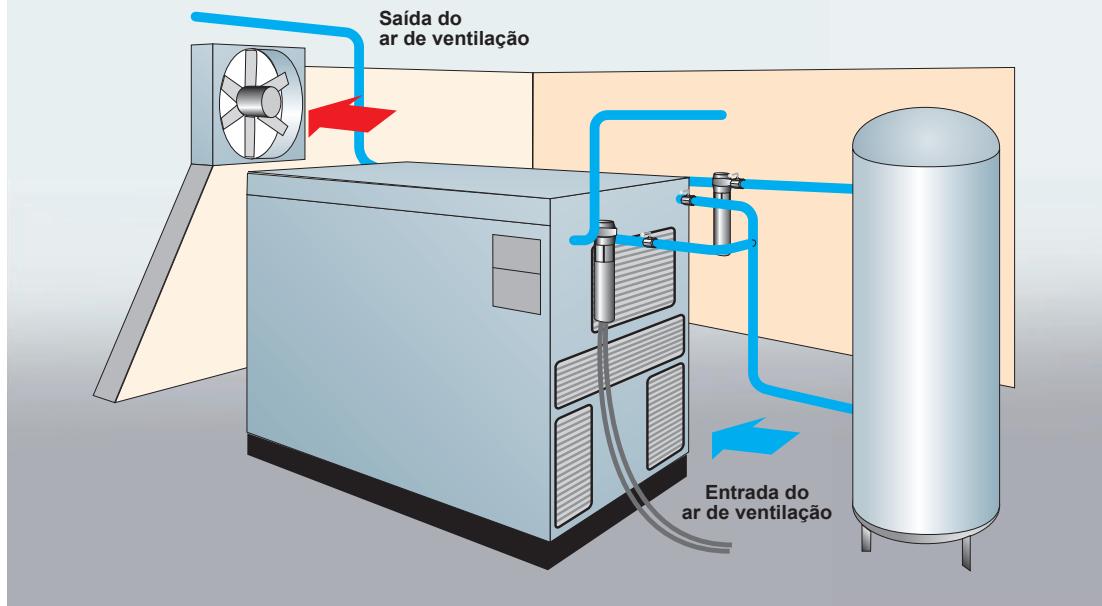
Uma maneira de lidar melhor com o problema do acúmulo de calor é recuperar a energia térmica residual e usá-la no local.

3:31



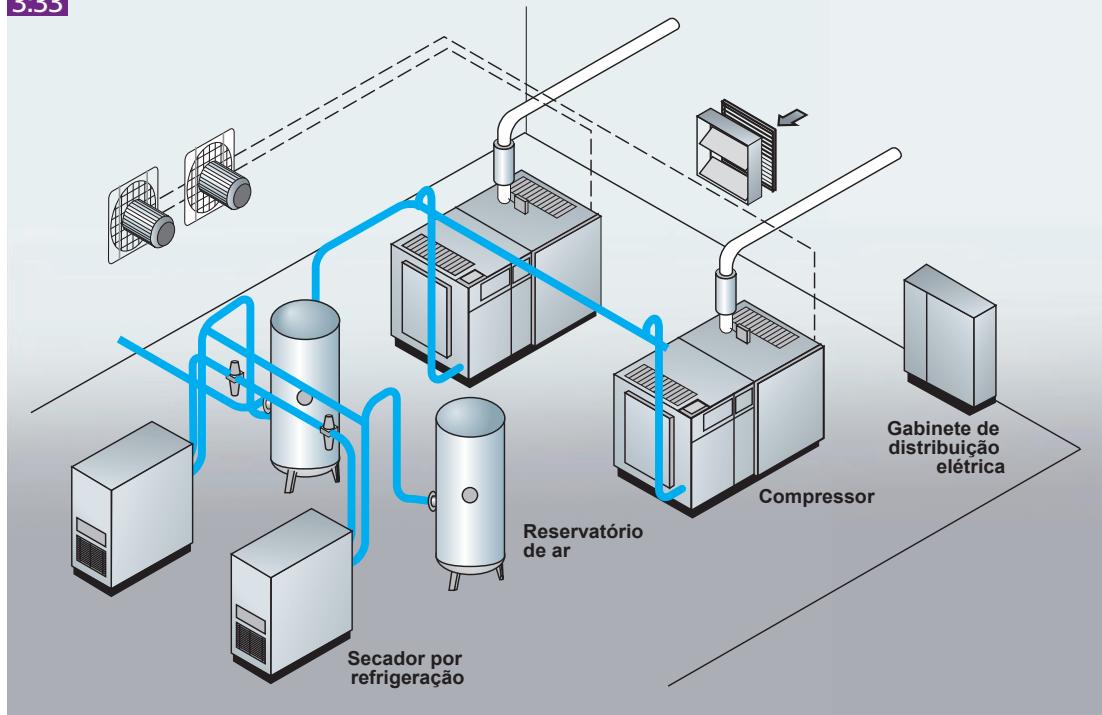
Exemplos de diferentes soluções de ventilação.

3:32



Uma instalação simples de compressor na prática. Um separador de óleo deve ser instalado, se houver risco de que a água de condensação residual contenha óleo.

3:33



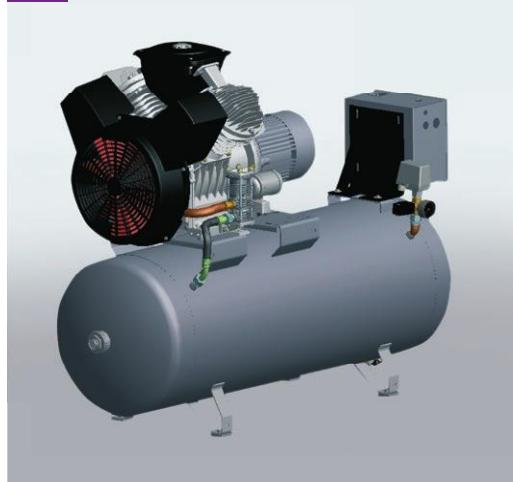
Exemplo de instalação hospitalar com suprimento de ar natural da sala fechado no lado da sucção e sistema 100% redundante.

O ar de ventilação deve ser aspirado externamente, de preferência sem o uso de dutos longos. Além disso, o consumo deve ser o mais baixo possível, mas sem correr o risco de ficar coberto de neve durante o inverno. Também devem ser levados em consideração os riscos de que poeira e substâncias explosivas ou corrosivas possam entrar na sala dos compressores. O ventilador/ventiladores devem ser colocados no alto de uma das paredes da extremidade da sala de compressores e a entrada de ar na parede oposta. A velocidade do ar na abertura da entrada de ventilação não deve exceder a 4 m/s.

Os ventiladores controlados por termostato são os mais apropriados neste caso. Esses ventiladores devem ser dimensionados para operar com a queda de pressão nos dutos, nas persianas da parede externa, etc.

A quantidade de ar de ventilação deve ser suficiente para limitar o aumento de temperatura na sala de 7 a 10°C. Deve-se considerar a possibilidade de usar compressores resfriados a água se houver problemas em obter ventilação suficiente na sala.

3:34



3.5.6 Segurança do reservatório de ar

Reservatórios de aço usados para ar comprimido são sempre afetados pela corrosão interna. Portanto, a espessura da parede sempre tem uma “tolerância à corrosão” em cima da espessura do revestimento necessária para garantir uma vida útil adequada do reservatório.

A razão da corrosão interna é um fenômeno complexo, principalmente devido a presença de condensação de água no interior do vaso; corrosão interna é evidente em reservatórios que coletam ar sem um secador de ar no escopo, mas mesmo se houver um secador ocorrerá corrosão. Ambiente externo (por exemplo, enxofre, ambiente marinho) também afeta a corrosão interna em um vaso.

Um reservatório corroído pode resultar em uma repentina explosão, que em alguns casos tem semelhanças com explosão.

Existe um sério risco de ferimentos em pessoas e danos às instalações danos às instalações.

Uma drenagem frequente da condensação interna de água (a cada 8 horas ou pelo menos uma vez ao dia) é necessária para manter o reservatório em boas condições.

Várias legislações nacionais exigem uma inspeção periódica dos reservatórios a serem executadas por organismos de inspeção ou oficiais delegados. A inspeção fornece uma medição da espessura do revestimento, para verificar as condições de segurança do vaso. Uma vez que a espessura do revestimento é menor do que um certo limite definido pelo fabricante do reservatório, o mesmo deve ser retirado de operação.

A medição da espessura do revestimento é normalmente feito via ondas ultrassônicas ou por inspeção direta através das ligações posicionadas nos revestimentos finais.

Por razões de segurança do reservatório, nunca deve haver soldagem ou modificações feitas nos vasos de ar.

3.6 DISTRIBUIÇÃO DO AR COMPRIMIDO

3.6.1 Geral

Sistemas inadequados de distribuição de ar comprimido resultam em contas de energia altas, baixa produtividade e baixo desempenho das ferramentas pneumáticas. Três exigências são colocadas em um sistema de distribuição de ar comprimido: uma baixa queda de pressão entre o compressor e o ponto de consumo, um mínimo de vazamento na tubulação de distribuição e uma separação eficiente de condensado se um secador de ar comprimido não estiver instalado. Isso se aplica principalmente aos tubos principais e ao consumo de ar comprimido planejado para as necessidades atuais e futuras. O custo da instalação de tubos de dimensões maiores e acessórios, acima dos inicialmente exigidos, é baixo se comparado ao custo de reconstrução de todo o sistema de distribuição posteriormente. O direcionamento, o projeto e o dimensionamento da rede de ar são importantes para eficiência, confiabilidade e custo da produção de ar comprimido. As vezes, uma grande queda de pressão na tubulação é compensada aumentando a pressão de trabalho do compressor de 7 bar (e) para 8 bar (e), por exemplo. Isso oferece uma economia de ar comprimido inferior. Além disso, quando o consumo de ar comprimido é reduzido, o mesmo ocorre com a queda de pressão e a pressão no ponto de consumo acima do nível permitido.

As redes fixas de distribuição de ar comprimido devem ser dimensionadas para que a queda de pressão nos tubos não exceda 0,1 bar entre o compressor e os mais remotos pontos de consumo.

A queda de pressão na conexão de mangueiras flexíveis, acoplamentos de mangueiras e outros acessórios deve ser adicionada a isso. É particularmente importante dimensionar adequadamente esses componentes, pois a maior queda de pressão ocorre frequentemente nessas conexões.

O maior comprimento permitido na rede de tubulações para uma queda de pressão específica pode ser calculado usando a seguinte equação:

$$l = \frac{\Delta p \times d^5 \times p}{450 \times q_c^{1.85}}$$

l = comprimento total do tubo [m]

Δp = queda de pressão permitida na rede [bar]

p = pressão absoluta de entrada [bar(a)]

q_c = descarga livre de ar do compressor (FAD) [l/s]

d = diâmetro interno do tubo [mm]

A melhor solução implica em projetar um sistema de tubulações como um anel de circuito fechado em torno da área em que o consumo de ar ocorrerá. Os tubos de ramificação são executados a partir dos loops para os vários pontos de consumo. Isso fornece suprimento uniforme de ar comprimido, mesmo havendo o uso intermitente e intenso, pois o ar é levado aos pontos de consumo em duas direções.

Este sistema deve ser usado para todas as instalações, exceto se alguns pontos de grande consumo de ar estiverem localizados a uma grande distância da instalação do compressor. Um tubo principal separado é encaminhado para esses pontos.

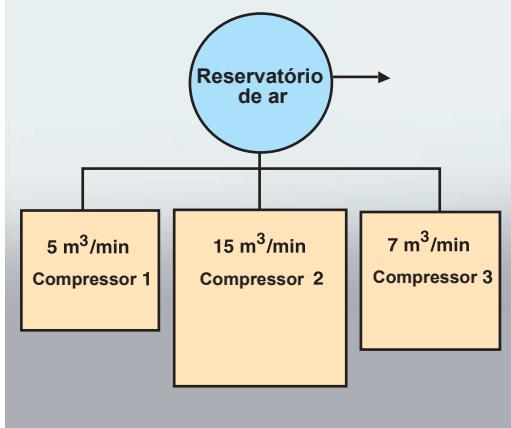
3.6.1.1 Reservatório de ar

Um ou mais reservatórios de ar estão incluídos em cada instalação de compressor. Seu tamanho é função da capacidade do compressor, do sistema de regulagem e do padrão de exigência de ar do consumidor. O reservatório de ar forma uma área de armazenamento para o ar comprimido, equilibra as pulsações do compressor, esfria o ar e coleta a condensados.

Consequentemente, o reservatório de ar deve estar equipado com dispositivo de drenagem de condensados.

A relação a seguir se aplica ao dimensionar o volume do reservatório. Observe que essa relação se aplica apenas em compressores com regulagem de carga/alívio.

3:35



O reservatório de ar é sempre dimensionado com base no maior compressor quando um sistema contém vários compressores.

$$V = \frac{0.25 \times q_c \times p_1 \times T_0}{f_{\max} \times (p_U - p_L) \times T_1}$$

V = volume do reservatório de ar [l]

q_c = FAD do compressor [l/s]

p_1 = pressão de entrada no compressor [bar(a)]

T_1 = temperatura máxima de entrada no compressor [K]

T_0 = temperatura de ar do compressor no reservatório [K]

$(p_U - p_L)$ = diferença de pressão entre carga e alívio

f_{\max} = frequência máxima de carregamento (1 ciclo a cada 30 segundos se aplica aos compressores Atlas Copco)

Para compressores com controle de velocidade variável (VSD), o volume necessário do reservatório de ar é substancialmente reduzido. Ao usar a fórmula acima, q_c deve ser considerado o FAD na velocidade mínima.

Quando a demanda por compressores exige grandes quantidades de ar em curtos períodos de tempo, não é economicamente viável dimensionar a rede de compressores ou as tubulações exclusivamente para esse padrão extremo de consumo de ar. Um reservatório de ar separado deve ser colocado próximo ao ponto de consumo e dimensionado de acordo com a saída de ar máxima.

Em casos mais extremos, um compressor menor de alta pressão é usado junto com um grande reservatório para atender a requisitos de ar com pouca vazão e com alta vazão em longos intervalos. Aqui, o compressor é dimensionado para satisfazer o consumo médio. A seguinte relação se aplica a esse reservatório:

$$V = \frac{q \times t}{p_1 - p_2} = \frac{L}{p_1 - p_2}$$

V = volume do reservatório de ar [l]

q = fluxo de ar durante a fase de esvaziamento [l/s]

t = duração da (s) fase (s) de esvaziamento [s]

p_1 = pressão normal de trabalho na rede [bar]

p_2 = pressão mínima para a função do consumidor [bar]

L = necessidade de ar na fase de enchimento [1/ciclo de trabalho]

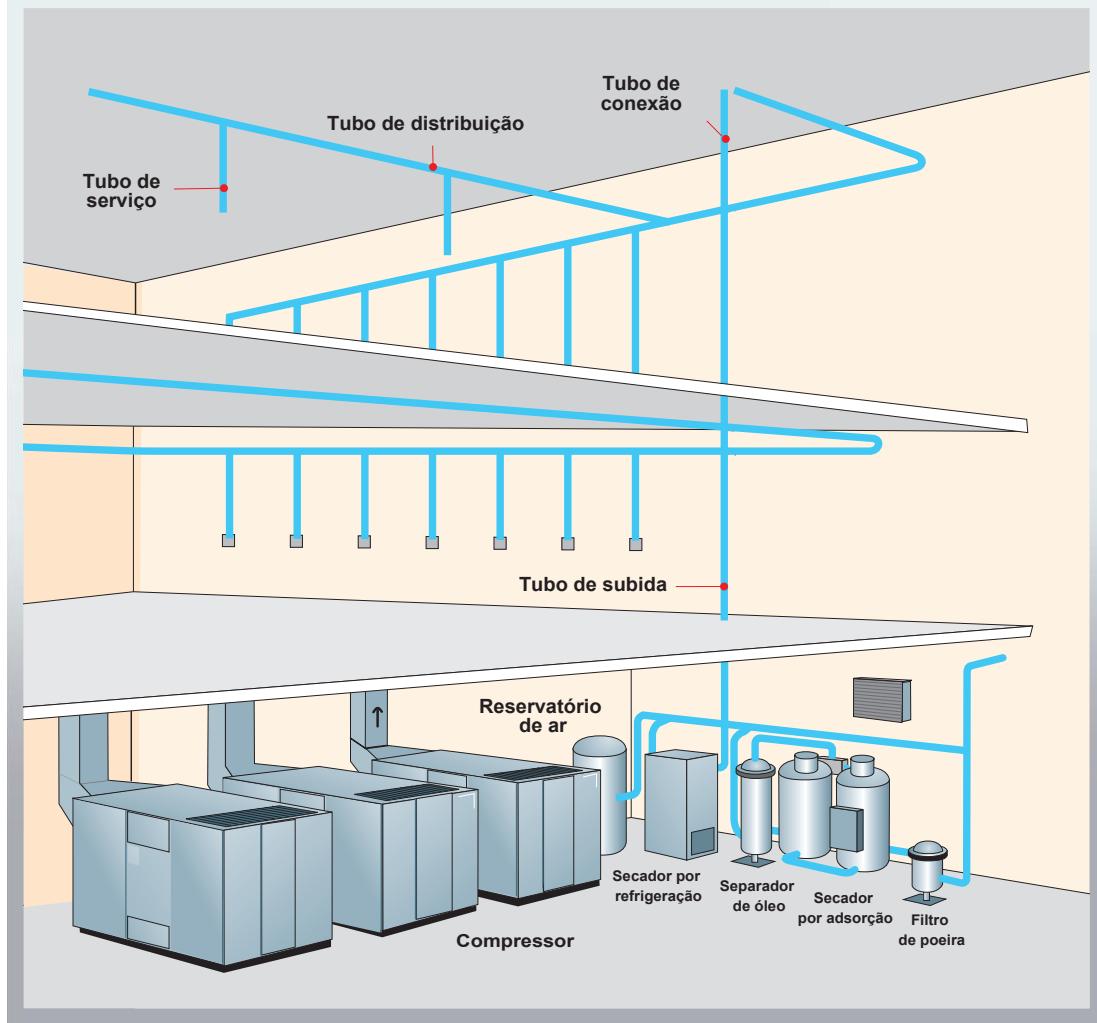
A fórmula não leva em consideração o fato de que o compressor pode fornecer ar durante a fase de esvaziamento. Uma aplicação comum é dar a partida em grandes motores de navios, onde a pressão de enchimento do reservatório é de 30 bar.

3.6.2 Projeto da rede de ar comprimido

O ponto de partida ao projetar e dimensionar uma rede de ar comprimido é uma lista de equipamentos que identifica todos os consumidores de ar comprimido e um diagrama indicando as localizações de cada um. Os consumidores são agrupados em unidades lógicas e são definidos pelo mesmo canal de distribuição. O tubo de distribuição é, por sua vez, abastecido pelos risers da fábrica de compressores. Uma rede maior de ar comprimido pode ser dividida em quatro partes principais: risers, tubos de distribuição, tubos de serviço e conexões de ar comprimido. Os risers transportam o ar comprimido da planta do compressor para a área de consumo.

Os tubos de distribuição dividem o ar pela área de distribuição. Os tubos de serviço direcionam o ar dos tubos de distribuição para os locais de trabalho.

3:36



3.6.3 Dimensionamento da rede de ar comprimido

A pressão obtida imediatamente após o compressor geralmente nunca pode ser totalmente utilizada porque a distribuição de ar comprimido gera algumas perdas de pressão, principalmente por atrito nos tubos.

Além disso, efeitos de estrangulamento e mudanças na direção do fluxo ocorrem nas válvulas e nas curvas dos tubos. As perdas, que são convertidas em calor, resultam em quedas de pressão que podem ser calculadas usando a seguinte equação para um tubo reto:

$$\Delta p = 450 \times \frac{q_c^{1.85} \times l}{d^5 \times p}$$

Δp = queda de pressão [bar]

q_c = fluxo de ar, (FAD) [l/s]

d = diâmetro interno do tubo [mm]

l = comprimento do tubo [m]

p = pressão absoluta inicial [bar(a)]

Ao calcular diferentes partes da rede de ar comprimido, os seguintes valores podem ser usados para a queda de pressão permitida:

3:37

Componente	Comprimento equivalente em metros										
	Diâmetro interno do tubo em mm (d)										
	25	40	50	80	100	125	200	250	250	300	400
Válvula de esfera (fluxo total)	0.3 5	0.5 8	0.6 10	1.0 16	1.3 20	1.6 25	1.9 30	2.6 40	3.2 50	3.9 60	5.2 80
Válvula de diafragma, totalmente aberta	1.5	2.5	3.0	4.5	6	8	10	-	-	-	-
Válvula angular, totalmente aberta	4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Válvula reguladora de pressão	7.5	12	15	24	30	38	45	60	-	-	-
Válvula de retenção de flap	2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	10	12	16	20	24	32
Cotovelo $R=2d$	0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
Cotovelo $R=d$	0.4	0.6	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
Ângulo de 90°	1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Tubo em T, fluxo direto	0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3	4	5	6	8
Tubo em T, fluxo lateral	1.5	2.4	3.0	4.8	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Niple de redução	0.5	0.7	1.0	2.0	2.5	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.6

Alguns acessórios e sua influência nas perdas em tubos de vários diâmetros. As perdas são recalculadas para um comprimento equivalente ao tubo (m).

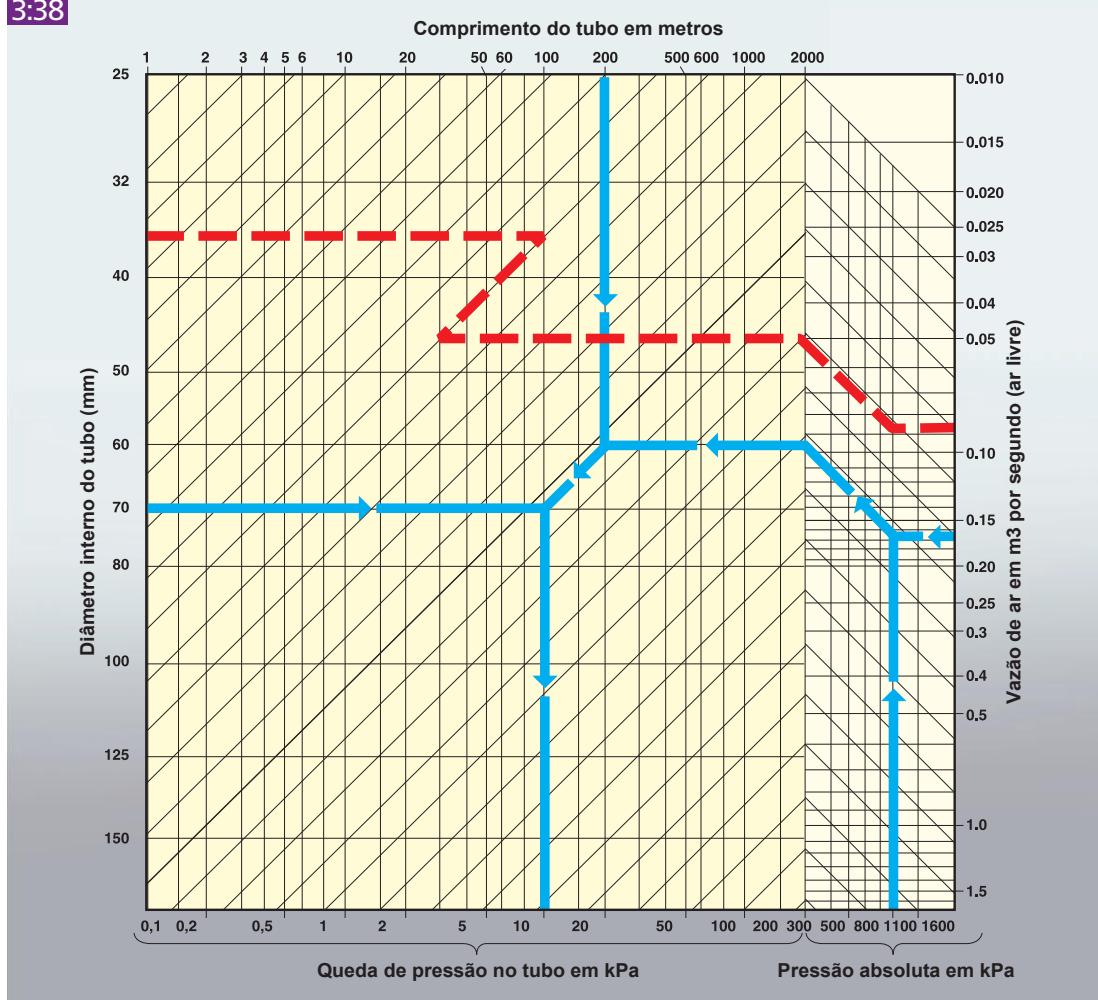
Queda de pressão através dos tubos de serviço	0,03 bar
Queda de pressão através dos tubos de distribuição	0,05 bar
Queda de pressão através dos risers	0,02 bar
Perda de pressão total na instalação de tubos fixos	0,10 bar

São calculados os comprimentos dos tubos necessários para as diferentes partes da rede (risers, tubos de distribuição e serviço). Um desenho

em escala do provável plano da rede é uma base adequada para isso. O comprimento do tubo é corrigido através da adição de comprimentos equivalentes para válvulas, dobras, uniões, etc., conforme ilustrado na Figura 3:36.

Como alternativa a fórmula acima, ao calcular o diâmetro do tubo, um nomograma (mostrado na Figura 3:37) pode ser usado para encontrar o diâmetro do tubo mais apropriado. A vazão, a pressão, a queda de pressão permitida e o comprimento do tubo devem ser conhecidos para fazer esse cálculo. O tubo padrão mais próximo de maior diâmetro é selecionado para a instalação.

3:38



Os comprimentos de tubo equivalentes para todas as partes da instalação são calculados usando uma lista de acessórios e componentes de tubo, bem como a resistência ao fluxo expressa em comprimento de tubo equivalente. Esses comprimentos de tubo “extras” são adicionados ao comprimento do tubo reto inicial. As dimensões selecionadas da rede são então recalculadas para garantir que a queda de pressão não seja muito significativa. As seções individuais (tubo de serviço, tubo de distribuição e risers) devem ser calculadas separadamente para grandes instalações.

3.6.4 Medição de vazão

Os medidores de vazão de ar são estrategicamente colocados para facilitar o débito interno

das despesas e a alocação de verbas da utilização do ar comprimido dentro da empresa. O ar comprimido é um meio de produção que deve fazer parte do custo individual de produção de cada departamento da empresa. Com este ponto de vista, todas as partes envolvidas poderiam se beneficiar com tentativas de redução do consumo nos diferentes departamentos.

Atualmente, os medidores de vazão disponíveis no mercado fornecem tudo, desde valores numéricos para leitura manual até dados de medição alimentados diretamente a um módulo de computador ou de débito.

Esses medidores de vazão geralmente são montados perto de válvulas de fechamento. A medição do anel requer atenção especial, pois o medidor precisa ser capaz de medir o fluxo para frente e para trás.

3.7 INSTALAÇÃO ELÉTRICA

3.7.1 Geral

Dimensionar e instalar um compressor requer conhecimento de como as peças dos componentes afetam umas as outras e quais regulamentos e provisões se aplicam.

A seguir, é apresentada uma visão geral dos parâmetros que devem ser considerados para obter uma instalação de compressores que funcione satisfatoriamente em relação ao sistema elétrico.

3.7.2 Motores

Na maioria das vezes, motores de indução trifásicos de gaiola de esquilo são usados para acionar compressores.

Motores de baixa tensão são geralmente usados até 450 - 500 kW, enquanto que para alta potência, motores de média ou tensão são a melhor opção.

A classe de proteção do motor é regulada por normas. O projeto resistente a jatos de poeira e água (IP55) é preferível aos motores abertos (IP23), que podem exigir desmontagem e limpeza regulares.

Em outros casos, depósitos de poeira na máquina acabam causando superaquecimento, resultando em vida útil reduzida. Como a cabine do compressor Pack fornece uma proteção de primeira linha contra poeira e água, uma classe de proteção abaixo de IP55 também pode ser usada.

O motor, geralmente resfriado por ventilador, é selecionado para funcionar a uma temperatura ambiente máxima de 40 °C e uma altitude de até 1.000 metros. Alguns fabricantes oferecem motores padrões com capacidade máxima de temperatura ambiente de 46°C. Em temperaturas mais altas ou em altitudes mais altas, a potência deve ser reduzida. O motor é geralmente montado em flange e conectado diretamente ao compressor. A velocidade é adaptada ao tipo de compressor, mas, na prática, são usados apenas motores de 2 ou 4 polos com velocidades respectivas de 3.600 rpm e 1.800 rpm.

A potência nominal do motor também é determinada pelo compressor, devendo estar o mais próximo possível dos requisitos do compressor. Um motor superdimensionado é mais caro, requer uma corrente de partida desnecessariamente alta, precisa de fusíveis maiores, possui

um baixo fator de potência e tem uma eficiência um pouco inferior. Um motor que é muito pequeno para a instalação na qual ele é utilizado, logo fica sobrecarregado e, consequentemente, corre o risco de apresentar falhas.

O método de partida também deve ser incluído como parâmetro ao selecionar um motor. O motor parte apenas com um terço do seu torque, da partida normal para uma partida em estrela/triângulo. Portanto, a comparação das curvas de torque do motor e do compressor pode ser útil para garantir a partida correta do compressor.

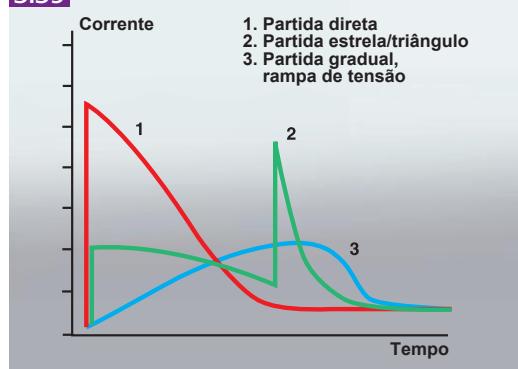
3.7.3 Métodos de partida

Os métodos de partida mais comuns são partida direta, partida em estrela/triângulo e soft start. A partida direta é simples e requer apenas um contator e proteção contra sobrecarga. A vantagem que apresenta é a alta corrente de partida, que é de 6 a 10 vezes a corrente nominal do motor, e seu alto torque de partida, que pode, por exemplo, danificar eixos e acoplamentos.

A chave estrela/triângulo é usada para limitar a corrente de partida. O motor de partida consiste de três contatores, proteção contra sobrecarga e um temporizador. O motor parte com a conexão em estrela e após um determinado tempo (quando a velocidade atingiu 90% da velocidade nominal), o temporizador alterna os contatores para que o motor seja conectado em triângulo, que é o modo de operação. (Para mais detalhes, consulte a Seção 1.6.5.7).

A partida estrela/triângulo reduz a corrente de partida para aproximadamente 1/3 em comparação com a partida direta. Entretanto, simultaneamente, o torque inicial também cai para 1/3. O torque de partida relativamente baixo signifi-

3:39



Corrente com diferentes métodos de partida.

ca que a carga do motor deve ser baixa durante a fase de partida, para que o motor atinja virtualmente a sua velocidade nominal antes de mudar para a conexão triângulo. Se a velocidade for muito baixa, ao alternar para a conexão triângulo será gerado um pico de corrente/torque tão alto quanto o de uma partida direta.

A soft start (ou partida gradual), que pode ser um método de partida alternativo ao estrela/triângulo, é uma chave de partida equipada com semicondutores (interruptores do tipo IGBT) em vez de contatores mecânicos. A partida é gradual e a corrente de partida é limitada a aproximadamente três vezes a corrente nominal.

As chaves de partida direta e de partida estrela/triângulo são, na maioria dos casos, integradas ao compressor. Para uma instalação grande de compressores, as unidades de partida podem ser colocadas separadamente em um quadro elétrico, devido a requisitos de espaço, geração de calor e acesso a serviços.

A chave de partida soft start geralmente é posicionada separadamente, ao lado do compressor, devido a radiação de calor, mas pode ser integrada dentro do conjunto do compressor, desde que o sistema de resfriamento tenha sido adequadamente protegido. Os compressores de média ou alta tensão sempre têm seus equipamentos de partida em um quadro elétrico instalado em separado.

3.7.4 Tensão de controle

Normalmente, nenhuma tensão de controle separada é conectada ao compressor, pois a maioria dos compressores é equipado com um transformador de controle integrado. O terminal primário desse transformador está conectado a fonte de alimentação do compressor. Esse arranjo oferece uma operação mais confiável. Se houver distúrbios na fonte de alimentação, o compressor será desligado imediatamente e impedido de partir.

A função com tensão de controle com alimentação interna deve ser usada em situações nas quais a chave de partida está localizada distante do compressor.

3.7.5 Proteção contra curto-círcuito

A proteção contra curto-círcuito, que é colocada em um dos pontos dos cabos de partida, pode incluir fusível ou disjuntor. Independentemente da solução que você selecionar, se ela estiver bem adaptada ao sistema, ela fornecerá o nível adequado de proteção.

Ambos os métodos apresentam vantagens e desvantagens. Os fusíveis são bem conhecidos e funcionam melhor do que um disjuntor para grandes correntes de curto-círcuito, mas eles não criam uma interrupção de isolamento total e têm longos prazos de desligamento para pequenas correntes de falha. Um disjuntor cria uma interrupção rápida e com isolamento total, mesmo para pequenas correntes de falha, mas exige mais estudo durante a fase de planejamento, em comparação com os fusíveis. O dimensionamento da proteção contra curto-círcuito é feita com base na carga esperada, mas também nas limitações da chave de partida.

Para proteção contra curto-círcuito na chave de partida, consulte a norma IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) 60947-4-1 Tipo 1 e Tipo 2. A seleção do Tipo 1 ou Tipo 2 é baseada em como um curto-círcuito afetará a chave de partida.

Tipo 1: "... sob condições de curto-círcuito, o contator ou a chave de partida não deve causar perigo a pessoas ou a instalação, e pode não ser adequado para serviços adicionais sem reparo e substituição peças."

Tipo 2: "... sob condições de curto-círcuito, o contator ou a chave de partida não deve causar perigo a pessoas ou a instalação e deve ser adequado para uso posterior. O risco de soldagem leve dos contatores é reconhecido, caso em que o fabricante deve indicar as medidas de manutenção ... "

3.7.6 Cabos

Os cabos devem, de acordo com as disposições da norma, "ser dimensionados para que, durante operações normais, não sofram temperaturas excessivas e não sejam danificados termicamente ou mecanicamente por um curto-círcuito elétrico". O dimensionamento e a seleção dos cabos

3:40



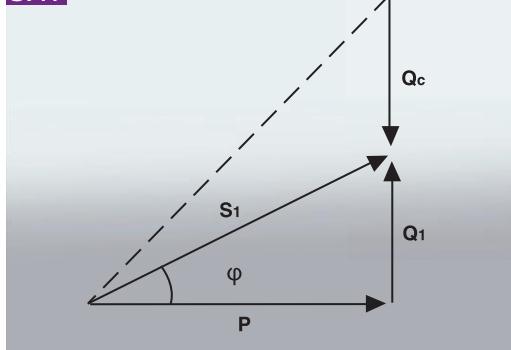
Esquema simplificado para conexão do motor elétrico à fonte de alimentação

são baseados na carga, na queda de tensão permitida, no método de encaminhamento (em um rack, parede, etc.) e na temperatura ambiente. Os fusíveis podem ser usados, por exemplo, para proteger os cabos e podem ser usados para proteção contra curto-círcito e proteção contra sobrecarga. Para operações do motor, é usada proteção contra curto-círcito (por exemplo, fusíveis), bem como proteção separada contra sobrecarga (geralmente a proteção do motor é incluída na chave de partida).

A proteção contra sobrecarga protege o motor e os cabos do motor, com corte e interrupção da chave de partida quando a corrente de carga exceder um valor predefinido. A proteção contra curto-círcito protege a chave de partida, sobrecarga e os cabos. O dimensionamento dos cabos para carga é definido na IEC 60364-5-52.

Um parâmetro adicional deve ser lembrado ao dimensionar cabos e proteção contra curto-círcito: a "condição de corte". Essa condição significa que a instalação deve ser projetada para que um curto-círcito em qualquer lugar da instalação resulte em interrupção rápida e segura. O cumprimento da condição é determinado, entre outras coisas, pela proteção contra o curto-círcito e pelo comprimento e seção transversal do cabo.

3:41



3.7.7 Compensação de fase

O motor elétrico não consome apenas energia ativa, que pode ser convertida em trabalho mecânico, mas também energia reativa, necessária para a magnetização do motor. A potência reativa carrega os cabos e o transformador. A relação entre a potência ativa e a reativa é determinada pelo fator de potência, $\cos \phi$. Isso geralmente é entre 0,7 e 0,9, onde o valor mais baixo refere-se a motores pequenos.

O fator de potência pode ser aumentado para virtualmente 1 gerando a energia reativa diretamente pela máquina usando um capacitor. Isso reduz a necessidade de extrair energia reativa da rede elétrica. A razão por trás da compensação de fase é que o fornecedor de energia pode cobrar pelo consumo de energia reativa em um nível predeterminado, e que os transformadores e cabos altamente carregados precisam ser descarregados.

3.8 SOM

3.8.1 Geral

Todas as máquinas geram som e vibração. O som é uma forma de energia que se propaga como ondas longitudinais através do ar, que é um meio elástico.

A onda sonora causa pequenas alterações na pressão do ar ambiente, que podem ser registradas por um instrumento sensível a pressão (por exemplo, um microfone).

Uma fonte sonora irradia potência sonora e isso resulta em uma flutuação da pressão sonora no ar.

Potência sonora é a causa disso. Pressão sonora é o efeito. Considere a seguinte analogia: um aquecedor elétrico irradia calor para uma sala e

ocorre uma mudança de temperatura. A mudança de temperatura na sala depende obviamente da própria sala. Mas, para a mesma entrada de energia elétrica, o aquecedor irradia a mesma energia, que é quase independente do ambiente. A relação entre potência sonora e pressão sonora é semelhante. O que ouvimos é a pressão sonora, mas essa pressão é causada pela potência sonora da fonte sonora.

A potência sonora é expressa em watts. O nível de potência sonora é expresso em decibéis (dB), isto é, uma escala logarítmica (escala dB) em relação a um valor de referência padronizado:

$$L_W = 10 \log\left(\frac{W}{W_0}\right)$$

L_W = nível de potência sonora [dB]

W = potência sonora real [W]

W_0 = potência sonora de referência [10^{-12} W]

A pressão sonora é expressa em Pa. O nível de pressão sonora é igualmente expresso em decibéis (dB), isto é, uma escala logarítmica (escala dB) em relação a um valor de referência padronizado:

$$L_p = 10 \log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) = 20 \log\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

L_p = nível de pressão sonora [dB]

p = pressão sonora real [Pa]

p_0 = pressão sonora de referência [20×10^{-6} Pa]

A pressão sonora que observamos depende da distância da fonte e do ambiente acústico no qual a onda sonora é propagada. Para a propagação de ruído interno, depende, portanto, do tamanho da sala e da absorção sonora das superfícies. Consequentemente, o ruído emitido por uma máquina não pode ser totalmente quantificado através da medição exclusiva da pressão sonora. A potência sonora é mais ou menos independente do ambiente, enquanto a pressão sonora não é.

Portanto, as informações sobre o nível de pressão sonora devem sempre ser complementadas com informações adicionais: a distância da fonte da posição de medição (por exemplo, especificada de acordo com um determinado padrão) e a Constante da Sala em que a medição foi feita. Caso contrário, presume-se que a sala seja ilimitada (isto é, um campo aberto). Em uma sala ilimitada, não há paredes para refletir as ondas sonoras, afetando assim a medição.

3.8.2 Absorção

Quando as ondas sonoras entram em contato com uma superfície, uma parte das ondas é refletida e outra parte é absorvida no material dessa superfície. Portanto, a pressão sonora em um determinado momento sempre consiste parcialmente no som que a fonte sonora gera e em parte no som refletido nas superfícies circundantes (após uma ou mais reflexões). A eficácia com que uma superfície pode absorver o som depende do material dos quais é composto. Isso geralmente é expresso como um fator de absorção (entre 0 e 1, com 0 refletindo completamente e 1 absorvendo completamente).

3.8.3 Constante da Sala

O impacto de uma sala na propagação das ondas sonoras é determinado pela Constante da Sala. A Constante da Sala para um ambiente com várias superfícies, paredes e outras superfícies internas pode ser calculada levando em consideração os tamanhos e as características de absorção das várias superfícies. A equação que se aplica é:

$$K = \frac{A \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\text{absorção total}}{\text{área total superfície}}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_2 + \dots}{A_1 + A_2 + \dots}$$

K = Constante da Sala

$\bar{\alpha}$ = fator médio de absorção da sala

A = área total da superfície da sala [m^2]

A_1, A_2 etc. são as superfícies individuais da sala que possuem fatores de absorção α_1, α_2 , etc.

3.8.4 Reverberação

A Constante da Sala também pode ser determinada usando o tempo de reverberação medido. O tempo de reverberação T é definido como o tempo que leva para a pressão do som diminuir em 60 dB depois que a fonte de som é desligada. O fator de absorção médio para a sala é calculado da seguinte forma:

$$\bar{\alpha} = \frac{0.163_x V}{T}$$

V = volume da sala [m³]

T = tempo de reverberação [s]

A Constante da Sala K é então obtida da seguinte expressão:

$$K = \frac{A \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

A = área total da superfície da sala [m²]

Os coeficientes de absorção para diferentes materiais de superfície dependem da frequência e, portanto, são o tempo de reverberação obtido e a Constante da Sala.

3.8.5 Relação entre o nível de potência sonora e o nível de pressão sonora

Sob algumas condições particulares, a relação entre o nível de potência sonora e o nível de pressão sonora pode ser expressa de uma maneira simples.

Se o som for emitido a partir de uma fonte sonora pontual dentro de uma sala sem superfícies refletivas ou ao ar livre, onde nenhuma parede esteja próxima a fonte de som, este será distribuído igualmente em todas as direções e a intensidade do som medida será, portanto, a mesma em qualquer ponto com a mesma distância da fonte de som. Consequentemente, a intensidade é constante em todos os pontos de uma superfície esférica ao redor da fonte sonora.

Quando a distância da fonte é duplicada, a superfície esférica a essa distância quadruplicará. A partir disso, podemos inferir que o nível de pressão sonora cai em 6 dB cada vez que a distância da fonte sonora é dobrada. No entanto, isso não se aplica se a sala tiver paredes reflexivas e duras. Se for esse o caso, o som refletido pelas paredes deve ser levado em consideração.

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right)$$

L_p = nível de pressão sonora [dB]

L_w = nível de potência sonora [dB]

Q = fator de direção

r = distância da fonte de som

Para Q, os valores empíricos podem ser utilizados (para outras posições da fonte sonora, o valor de Q deve ser estimado):

Q = 1	Se a fonte de som é suspensa no meio de uma sala grande.
Q = 2	Se a fonte de som é colocada perto do centro de uma parede dura e reflexiva.
Q = 4	Se a fonte de som é colocada perto da intersecção de duas paredes
Q = 8	Se a fonte de som é colocada perto de um canto (cruzamento de três paredes).

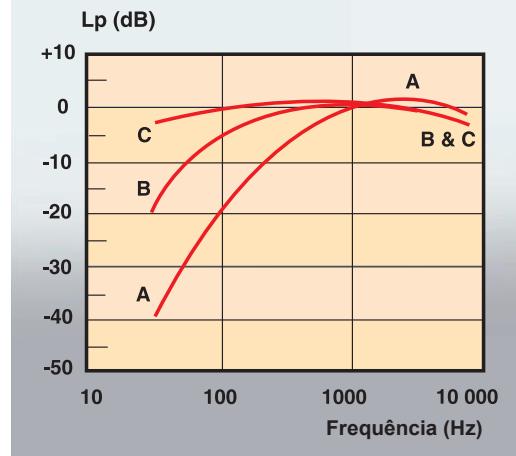
Se a fonte sonora for colocada em uma sala onde as superfícies não absorvam todo o som, o nível de pressão sonora aumentará devido ao efeito de reverberação.

Esse aumento é inversamente proporcional a Constante da Sala:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{K} \right)$$

Nas proximidades da fonte de alimentação, o nível de pressão sonora cai em 6 dB cada vez que a distância é dobrada. No entanto, a distâncias maiores da fonte, o nível de pressão sonora é dominado pelo som refletido e, portanto, a diminuição é mínima com o aumento da distância. Máquinas que transmitem som através de seus

3:42



Dependência da frequência ao usar diferentes filtros para ponderar os níveis sonoros na sua medição. O mais comum é o filtro A.

corpos ou molduras não se comportam como fontes pontuais se o ouvinte estiver a uma distância do centro da máquina menor que 2 a 3 vezes a maior dimensão da máquina.

3.8.6 Medidas do som

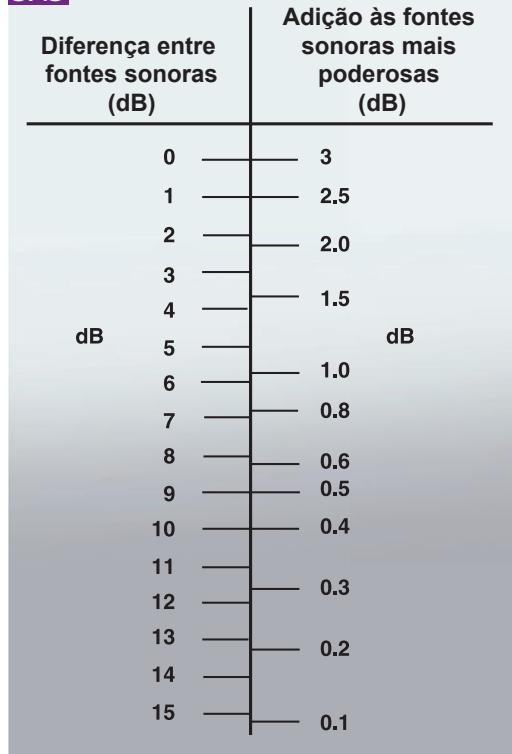
O ouvido humano distingue o som em diferentes frequências com diferentes eficiências de percepção.

As frequências baixas ou muito altas são percebidas com menos intensidade do que as frequências em torno de 1000–2000 Hz. Diferentes filtros padronizados ajustam os níveis medidos nas frequências baixa e alta para emular a habilidade do ouvido humano de ouvir sons. Ao medir o ruído ocupacional e industrial, o filtro A é comumente usado e o nível de som é expresso em dB (A).

3.8.7 Interação de várias fontes sonoras

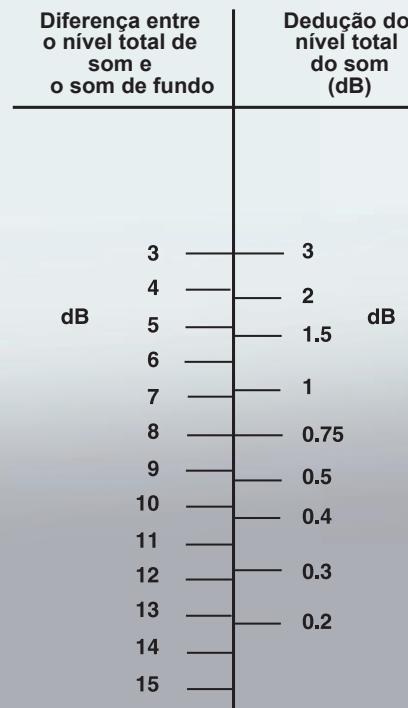
Quando mais de uma fonte sonora emite som para um receptor comum, a pressão do som

3:43



O nomograma define quantos dB serão adicionados ao nível do som mais alto quando adicionar dois níveis de som.

3:44



O nomograma define quantos dB serão deduzidos do nível sonoro total em diferentes níveis de som de fundo para estimar o nível sonoro líquido.

aumenta. No entanto, como os níveis sonoros são definidos logaritmicamente, eles não podem ser simplesmente adicionados algebraicamente. Quando mais de duas fontes de som estão ativas, duas são adicionadas primeiro e a seguinte é adicionada a soma das primeiras, e assim por diante. Para a memória, quando duas fontes de som com os mesmos níveis devem ser adicionadas, o resultado é um aumento de 3 dB. A fórmula para adicionar dois níveis sonoros (níveis de pressão sonora e níveis de potência sonora) é a seguinte:

$$L_{\text{sum}}(\text{soma}) = 10 \times \log(10^{L_p(1)} + 10^{L_p(2)})$$

Uma fórmula semelhante se aplica a subtração dos níveis de som.

O som de fundo é um caso especial, que requer subtração. O som de fundo é tratado como uma fonte de som separada e o valor será deduzido do nível de som medido.

3.8.8 Redução do som

Existem cinco maneiras diferentes de reduzir o som.

Isolamento acústico, absorção sonora, isolamento de vibrações, amortecimento de vibrações e amortecimento da fonte sonora.

O isolamento acústico envolve a colocação de uma barreira acústica entre a fonte sonora e o receptor. Isso significa que apenas uma parte do som pode ser isolada, dependendo da área da barreira e de suas características de isolamento. Uma barreira maior e mais pesada é mais eficaz do que uma barreira menor e mais leve.

A absorção sonora envolve a fonte sonora envolvida por leves absorventes porosos presos a uma barreira. Absorventes mais espessos são mais eficazes que os absorventes mais finos e as densidades mínimas típicas são de aprox. 30 kg/m³ para espuma de poliuretano de célula aberta e aprox. 150 kg/m³ para lã mineral.

O isolamento de vibração é usado para impedir a transferência de vibrações de uma parte de uma estrutura para outra. Um problema comum é a transferência de vibrações de uma máquina embutida para a barreira de isolamento acústico ao redor ou para o chão. Molas de aço, molas pneumáticas, cortiça, plástico e borracha são exemplos de materiais usados para isolamento de vibrações. A escolha dos materiais e seu dimensionamento são determinados pela frequência da vibração e pelas exigências de estabilidade para a configuração da máquina.

O amortecimento de vibrações envolve uma estrutura equipada com uma superfície de amortecimento externa composta de material elástico com alta histerese. Quando a superfície de amortecimento aplicada for suficientemente espessa, a parede da barreira será efetivamente impedida de vibrar e, consequentemente, de emitir som.

O amortecimento da fonte sonora geralmente influencia o seu comportamento operacional. Pode dar resultados limitados, mas fornece uma solução viável em termos de custo.

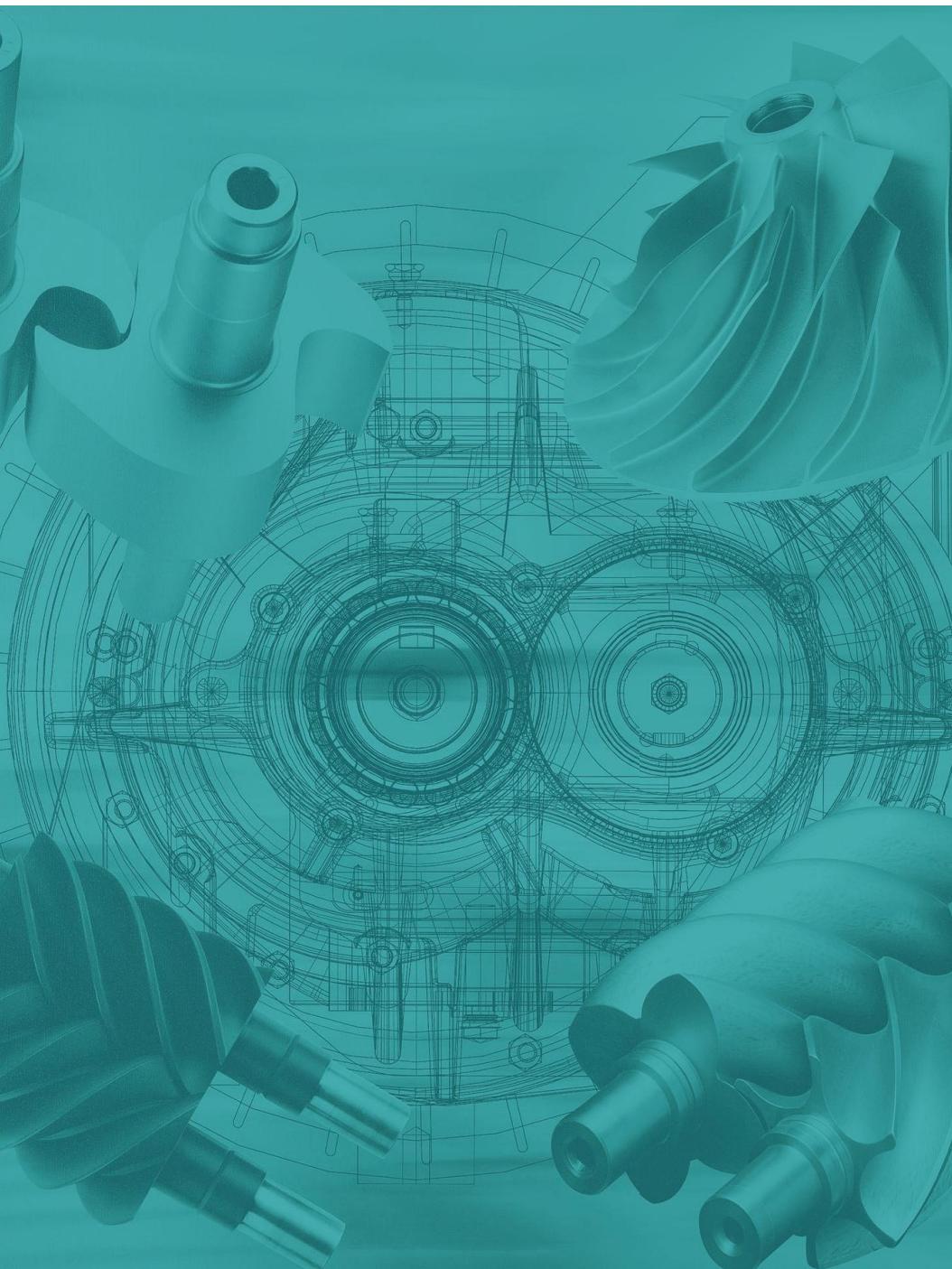
3.8.9 Ruído dentro da instalação do compressor

O nível de ruído do compressor é medido de maneira padronizada em uma máquina (em um campo livre acústico, por exemplo, ao ar livre, sem paredes ou por meio de uma técnica de varredura de intensidade sonora). Quando o compressor é instalado em uma sala, o nível de ruído é influenciado pelas propriedades da sala. O tamanho da sala, os materiais usados nas paredes e no teto e a presença de outros equipamentos (e seus níveis de ruído em potencial) na sala têm impactos significativos.

Além disso, o posicionamento do compressor na sala também afeta o nível de ruído devido a instalação e conexão de tubos e outros componentes.

O som que irradia dos tubos de ar comprimido é frequentemente mais problemático do que o ruído produzido pelo próprio compressor e sua fonte de energia. Isso pode ser devido a vibração transferida mecanicamente para os tubos, geralmente em combinação com a vibração transferida através do ar comprimido. Portanto, é importante instalar isoladores de vibração e até incluir seções no sistema de tubos usando uma combinação de material de absorção de som coberto com uma barreira de isolamento vedada.

4 ECONOMIA



4.1 CUSTO

4.1.1 Custo de produção do ar comprimido

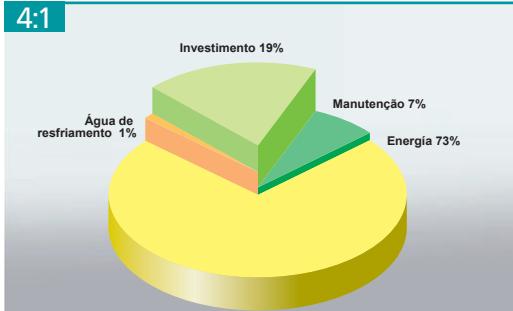
4.1.1.1 Geral

A energia elétrica é a fonte de energia predominante na produção industrial de ar comprimido. Em muitas instalações de ar comprimido, muitas vezes existem possibilidades significativas e não utilizadas de economia de energia, incluindo recuperação de energia, redução de pressão, redução de vazamentos e aprimoramento das operações através da escolha correta de um sistema de controle e regulagem, bem como a escolha do tamanho do compressor.

Ao planejar um novo investimento, é melhor olhar o futuro, o mais longe possível, e tentar avaliar os impactos de novas situações e demandas que possam afetar a instalação de ar comprimido. Exemplos típicos incluem demandas ambientais, demandas de economia de energia, aumento dos requisitos de qualidade da produção e investimentos futuros em expansão da produção.

As operações otimizadas do compressor estão se tornando mais importantes, especialmente para indústrias maiores e dependentes de ar comprimido. A produção mudará ao longo do tempo em uma indústria em desenvolvimento e, consequentemente, também mudarão as condições de operação do compressor. Portanto, é importante que o suprimento de ar comprimido se baseie nas

4:1



Ao analisar os contribuidores que geram os custos de produção do ar comprimido, é possível encontrar uma divisão semelhante à do diagrama. No entanto, o peso relativo dos diferentes tipos de custos pode variar com o número de horas de operação/ano, com o equipamento auxiliar incluído no cálculo, com o tipo de máquina e o sistema de resfriamento selecionado, etc.

exigências atuais e nos planos de desenvolvimento para o futuro. A experiência mostra que uma análise extensa e imparcial da situação operacional quase sempre resulta em melhoria da economia geral.

Os custos de energia são claramente o fator dominante no custo total da instalação. Portanto, é importante se concentrar em encontrar soluções que atendam às demandas por desempenho e qualidade, bem como à demanda por utilização eficiente de energia. O custo adicional associado à aquisição de compressores e outros equipamentos que atendam a essas duas demandas será percebido ao longo do tempo como um bom investimento.

Como o consumo de energia geralmente representa aprox. 80% do custo total, importante é ter cuidado ao selecionar o sistema de regulagem. A diferença significativa nos sistemas de regulagem disponíveis excede as diferenças relevantes nos tipos de compressores. Uma situação ideal é quando a capacidade total do compressor corresponde exatamente ao consumo de ar da aplicação. Isso ocorre com frequência em aplicações de processo. A maioria dos tipos de compressores é fornecida com o seu próprio sistema de controle e regulagem a bordo, mas a adição de equipamentos para controle compartilhado com outros compressores na instalação pode melhorar ainda mais a economia operacional.

A regulagem da velocidade provou ser um método popular devido ao seu substancial potencial de economia de energia. Pense com cuidado e permita que as exigências de sua aplicação governem a sua seleção de equipamentos de regulagem para obter bons resultados.

Se apenas uma pequena quantidade de ar comprimido for necessária durante a noite e nos fins de semana, pode ser rentável instalar um pequeno compressor adaptado a esse trabalho fora do pico. Se, por algum motivo, uma aplicação específica precisar de uma pressão de trabalho diferente, esse requisito deve ser analisado para descobrir se toda a produção de ar comprimido deve ser centralizada em uma planta central de compressores ou se a rede deve ser dividida de acordo com a pressão em diferentes níveis. A divisão da rede de ar comprimido em seções também pode ser considerada para desligar determinados setores durante a noite e nos fins de semana, a fim de reduzir o consumo de ar ou alocar custos internamente com base nas medições do fluxo de ar.

4.1.1.2 Alocação de custos

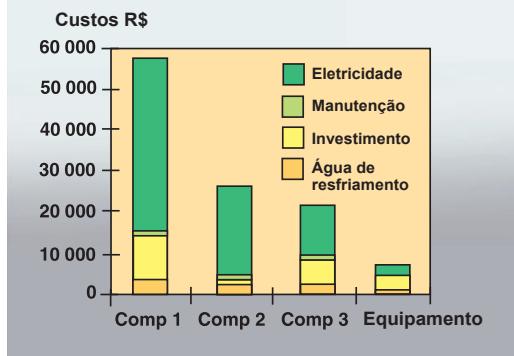
Os custos de investimento são um custo fixo que inclui o preço de compra, os custos de infraestrutura de construção, instalação e seguro.

A parcela do custo do investimento como parte do custo total é determinada em parte pela seleção do nível de qualidade do ar comprimido e em parte pelo período de depreciação e pela taxa de juros aplicável.

A parcela dos custos de energia é determinada pelo tempo operacional anual, o grau de utilização de carga/alívio e o custo unitário de energia.

Investimentos adicionais, por exemplo, equipamentos para recuperação de energia, oferecem um retorno direto na forma de redução de custos operacionais e de manutenção.

4.2



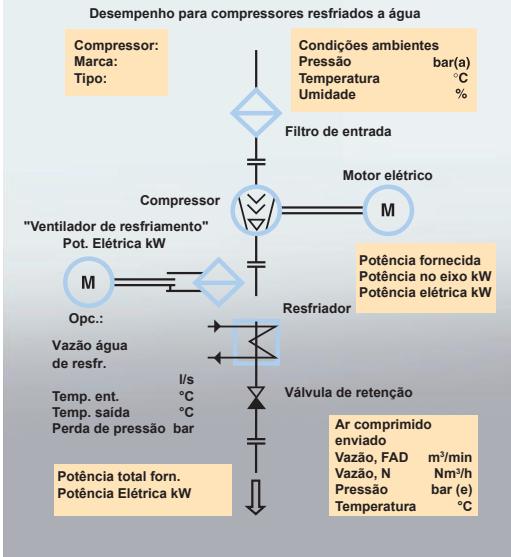
Este gráfico ilustra como os custos podem ser divididos entre 3 compressores e seus equipamentos auxiliares. As grandes diferenças podem dever-se à forma como as máquinas são avaliadas, ao valor de capital individual do equipamento, ao nível de segurança selecionado que pode afetar os custos de manutenção, etc.

4.2 OPORTUNIDADES DE ECONOMIA

4.2.1 Potência requerida

Ao fazer cálculos, é importante aplicar o conceito geral de requisitos de energia. Todos os consumidores de energia que pertencem a uma instalação de compressores devem ser considerados: por exemplo, filtros de entrada, ventiladores e

4.3



Um modelo simples, mas útil, que pode ser usado para fornecer uma imagem verdadeira dos requisitos de energia elétrica de um compressor.

bombas, secadores e separadores.

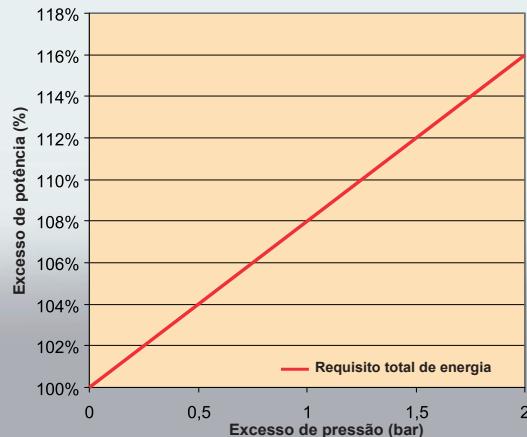
Para comparar diferentes alternativas de investimento, o uso de valores semelhantes é particularmente importante. Portanto, os valores devem ser indicados de acordo com as normas e regulamentos internacionalmente reconhecidos, por exemplo, conforme a ISO 1217 Ed.4 -2009.

4.2.2 Pressão de trabalho

A pressão de trabalho determina diretamente o requisito de energia. Pressão mais alta significa maior consumo de energia: em média, 8% a mais de potência para 1 bar de pressão mais alta. Aumentar a pressão de trabalho para compensar uma queda de pressão sempre resulta em economia operacional prejudicada.

Apesar desse efeito econômico adverso, o aumento da pressão do compressor é um método comumente usado para superar quedas de pressão causadas por um sistema de tubos subdimensionados ou por filtros entupidos. Em uma instalação equipada com vários filtros, especialmente se eles estiverem em operação por um longo período de tempo sem serem substituídos, a queda de pressão pode ser muito maior e, portanto, muito cara por não haver inspeção nos filtros por longos períodos de tempo.

4:4



Requisito de energia em excesso devido à sobrepressão para compensar as quedas de pressão. Para um compressor de 300 l/s, aumentar a pressão de trabalho em 1 bar significa um consumo de energia 6 kW maior. Com 4.000 horas de operação/ano, isso representa 24.000 kWh/ano ou € 2.400/ano.

Em muitas instalações, não é possível realizar grandes reduções de pressão, mas o uso de modernos equipamentos de regulagem permite que a pressão seja reduzida praticamente em 0,5 bar. Isso representa uma economia de energia de alguns por cento. Isso pode parecer insignificante, mas considerando que a eficiência total da instalação é aumentada em um grau equivalente, o valor dessa redução de pressão em termos de economia real é mais do que óbvio.

4.2.3 Consumo de ar

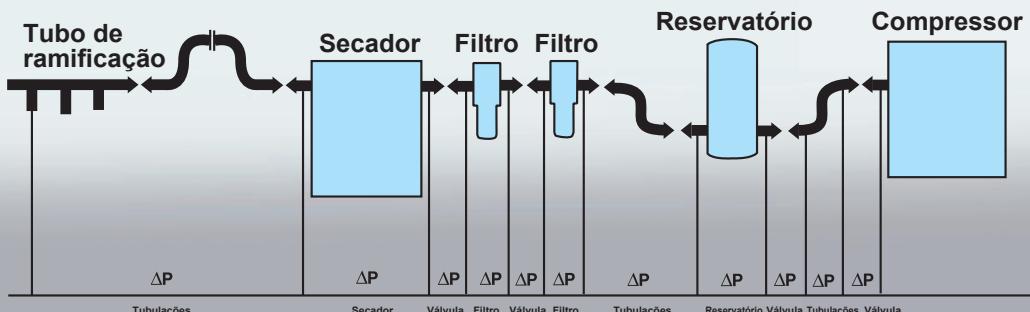
Analizando as rotinas e o uso do ar comprimido, podem ser encontradas soluções para fornecer uma carga mais equilibrada ao sistema de ar

comprimido. Pode, assim, ser evitada a necessidade de produzir maior vazão de ar para reduzir os custos operacionais.

O consumo inútil, que geralmente é uma consequência de vazamentos, equipamentos gastos, processos que não foram adequadamente configurados ou o uso incorreto do ar comprimido, é corrigido com mais acerto pelo aumento da conscientização geral. A divisão do sistema de ar comprimido em seções que podem ser separadas usando válvulas de interrupção pode servir para reduzir o consumo durante a noite e nos finais de semana.

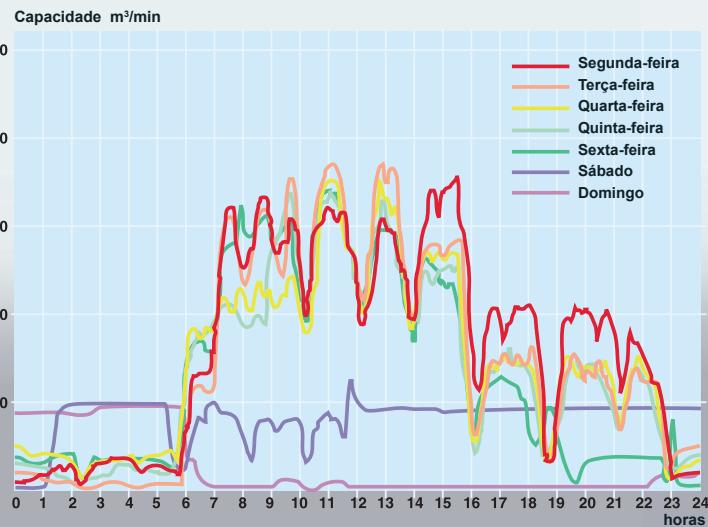
Na maioria das instalações, existe algum grau de vazamento que representa uma perda inevitável e que, portanto, deve ser minimizado.

4:5



A queda de pressão nos diferentes componentes da rede afeta a pressão de trabalho necessária.

4:6



O diagrama mostra como o consumo de ar pode variar durante uma semana e 24 horas por dia. O consumo é baixo durante o turno da noite, é alto durante o turno do dia e diminui durante os intervalos, mas é constante durante os finais de semana (vazamento?).

4:7

Diâmetro do furo	Fluxo de saída à pressão de trabalho de 7 bar	Potência requerida para o compressor
Tamanho mm	l/s	kW
• 1	1.2	0.4
● 3	11.1	4.0
● 5	31	10.8
● 10	124	43

A tabela mostra a relação entre vazamento e consumo de energia para alguns pequenos orifícios à pressão de 7 bar (e).

O vazamento frequente pode atingir 10 a 15% do fluxo de ar comprimido produzido. O vazamento também é proporcional à pressão de trabalho, razão pela qual um método para reduzir as fugas de ar é reparar o equipamento que apresenta vazamento e, assim, diminuir a pressão de trabalho, por exemplo, à noite.

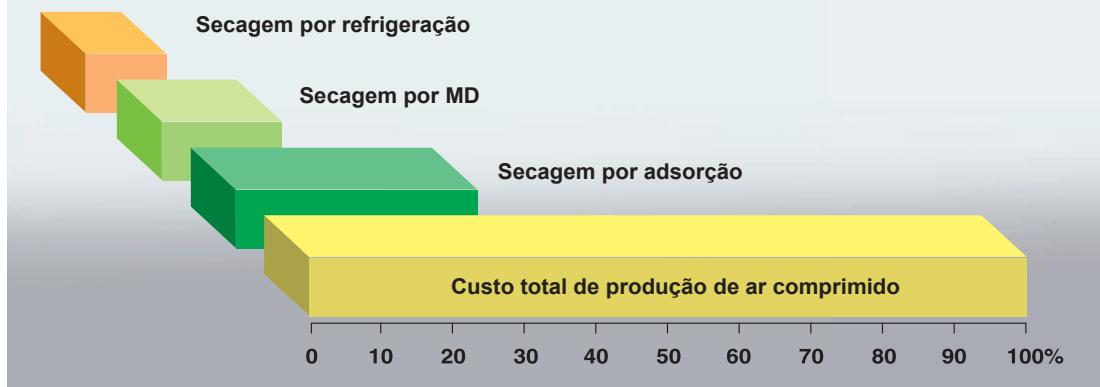
A redução da pressão em apenas 0,3 bar reduz o vazamento em 4%. Se o vazamento em uma instalação de 100 m³/min for de 12% e a pressão for reduzida em 0,3 bar, isso representa uma economia de aprox. 3 kW.

4.2.4 Método de regulagem

Usando um sistema de controle mestre moderno, a planta central de compressores pode ser operada de maneira ideal para diferentes situações operacionais, aumentando a segurança e a disponibilidade.

A seleção do método de regulagem correto incentiva a economia de energia através da menor pressão do sistema e um melhor grau de utilização, sendo otimizado para cada máquina na instalação. Ao mesmo tempo, a disponibilidade aumenta, reduzindo assim o risco de inatividade não planejada. Além disso, o controle central permite programar a redução automática de

4:8



Comparação de custos de diferentes métodos de secagem

pressão em todo o sistema durante a operação noturna e nos finais de semana.

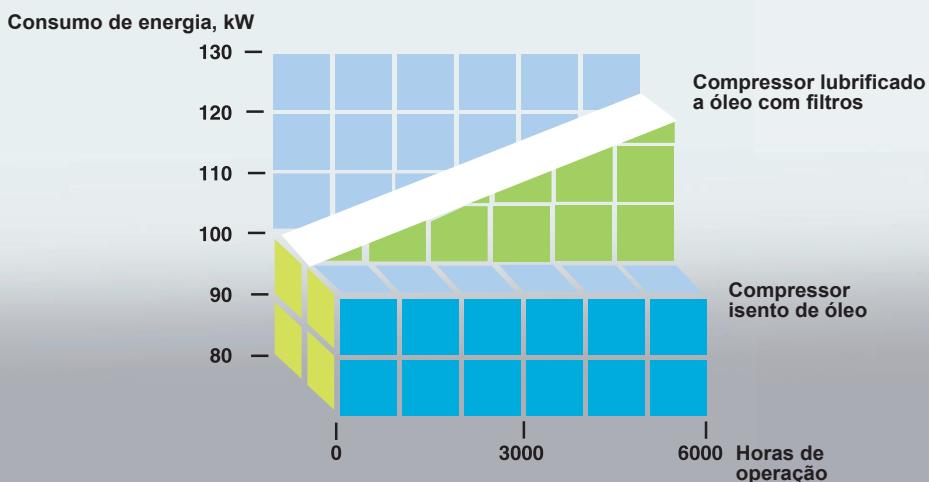
Como o consumo de ar comprimido raramente é constante, a instalação do compressor deve ter um design flexível, usando uma combinação de compressores com diferentes capacidades e motores controlados por velocidade. Os compressores podem funcionar com controle de velocidade e os de parafuso são particularmente adequados para isso, pois a relação entre vazão e o consumo de energia são praticamente proporcionais à sua velocidade.

4.2.5 Qualidade do ar

O ar comprimido de alta qualidade reduz a necessidade de manutenção, aumenta a confiabilidade operacional do sistema pneumático, sistema de controle e instrumentação, limitando o desgaste das máquinas acionadas a ar.

Se o sistema de ar comprimido for concebido para ar seco e isento de óleo desde o início, a instalação será mais barata e mais simples, pois o sistema de tubulações não precisa ser equipado com separadores de água. Quando o ar está

4:9



Os compressores isentos de óleo oferecem qualidade constante do ar comprimido a um custo fixo de energia.

seco, não é necessário descarregar o ar na atmosfera para remover a condensação. A drenagem de condensados no sistema de tubulações também não é necessária, o que significa custos mais baixos para instalação e manutenção. A solução mais econômica pode ser obtida instalando um secador de ar comprimido central. A descentralização dos módulos de tratamento de ar com várias unidades menores colocadas no sistema é mais cara e dificulta a manutenção do sistema. A experiência demonstra que os custos reduzidos de instalação e manutenção de um sistema com ar comprimido seco cobrirão o custo de investimento do equipamento de secagem. A lucratividade é muito alta, mesmo quando o equipamento de secagem tiver de ser adicionado às instalações existentes.

Compressores isentos de óleo não requerem separador de óleo ou equipamento de limpeza para condensação. Os filtros também não são necessários e, portanto, o custo para a substituição do filtro é eliminado. Consequentemente, não há necessidade de compensar perda de carga em filtros e assim a pressão de trabalho do compressor pode ser reduzida. Isso contribui para melhorar ainda mais a economia da instalação.

4.2.6 Recuperação de energia

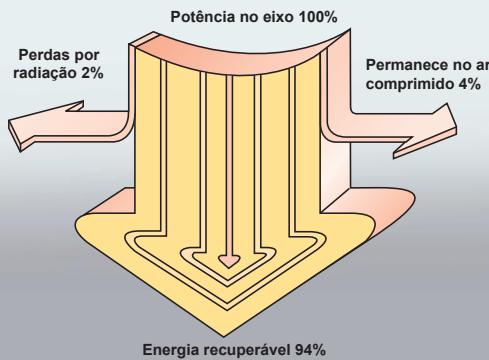
Ao usar eletricidade, gás ou óleo em forma de aquecimento nas instalações de produção ou em

um processo, deve-se investigar a possibilidade de substituir total ou parcialmente essa energia pela energia residual recuperada da instalação do compressor.

Os fatores decisivos são o custo da energia em R\$/kWh, o grau de utilização e a quantidade de investimento adicional necessário. Um investimento bem planejado na recuperação de energia residual geralmente oferece um tempo de retorno de apenas 1 a 3 anos. Mais de 90% da energia fornecida ao compressor pode ser recuperada na forma de calor, possuindo assim alto valor. O nível de temperatura da energia recuperada determina as possíveis áreas de aplicação e, portanto, os respectivos valores.

O mais alto grau de eficiência é geralmente obtido a partir de instalações resfriadas a água, quando a saída de água quente da instalação do compressor pode ser conectada diretamente a uma demanda de aquecimento contínuo, por exemplo, o circuito de retorno da caldeira de aquecimento existente. A energia residual recuperada pode ser efetivamente utilizada durante todo o ano. Projetos de compressores diferentes fornecem pré-requisitos diferentes. Em algumas situações que exigem um fluxo de calor alto e em pico, longas distâncias de transporte de calor até o ponto de utilização ou necessidades que variam durante o ano, pode ser interessante estudar a possibilidade de vender a energia recuperada na forma de calor ou de refrigeração ou eletricidade, etc.

4:10



Energia recuperada kWh/ano:

$$W = [(K_1 \times Q_1) + (K_2 \times Q_2)] \times T_R$$

Economia/ano: $W \times e_p / \eta$

Óleo economizado m3/ano: $W/6800 \times \eta$

T_R = Vezes por ano em que há a necessidade de recuperação de energia (horas por ano)

K_1 = Parte de T_R com o compressor em carga

K_2 = Parte de T_R com o compressor em alívio

Q_1 = Potência disponível no líquido de resfriamento com o compressor em carga (kW)

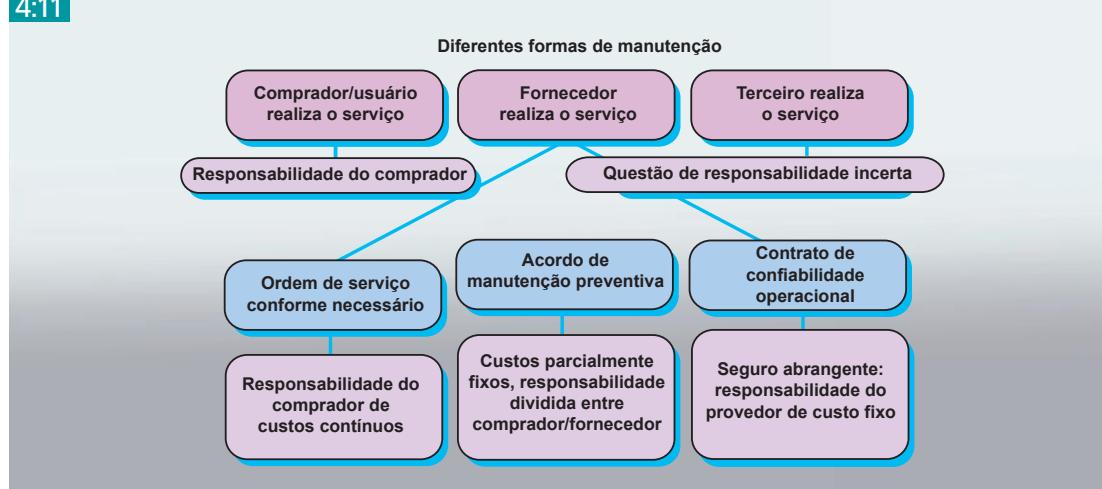
Q_2 = Potência disponível no líquido de resfriamento com o compressor em alívio (kW)

e_p = Preço da energia

η = Eficiência normal da fonte de calor

Ao mesmo tempo em que o compressor produz ar comprimido, ele também converte a energia fornecida em calor, que é transferido para o fluido de resfriamento, ar ou água. Somente uma pequena parte está contida no ar comprimido e que é emitida como radiação de calor da máquina e da tubulação.

4:11



O mais alto grau de utilização possível reduz o custo de serviço e manutenção, expresso em R\$/hora de operação. É realista planejar 100% de utilização e pelo menos 98% de disponibilidade.

4.2.7 Manutenção

Tal como acontece com todos os equipamentos, a instalação do compressor exige alguma forma de manutenção. No entanto, os custos de manutenção são baixos em relação a outros custos e podem ser reduzidos ainda mais através de cuidadosas medidas de planejamento. A escolha do nível de manutenção é determinada pela confiabilidade e desempenho necessários da instalação de ar comprimido.

A manutenção representa a menor parte do custo total de propriedade da instalação. Depende de como a instalação foi planejada em geral e da escolha específica de compressor e equipamento auxiliar.

Os custos podem ser reduzidos combinando o monitoramento das condições com outras funções ao usar o equipamento para operações totalmente automáticas e o monitoramento da planta central do compressor. O orçamento total para manutenção é influenciado por::

- **Tipo de compressores**
- **Equipamento auxiliar**
(secadores, filtros, equipamento de controle e regulagem)
- **Ciclo de operação de carga/alívio**
- **Condições de instalação**
- **Qualidade da mídia**
- **Planejamento de manutenção**
- **Escolha do nível de segurança**

- Recuperação de energia/sistema de resfriamento
- Grau de utilização

O custo total anual de manutenção é usualmente entre 5 – 10% do valor do investimento da máquina.

4.2.7.1 Planejamento de manutenção

A manutenção bem planejada do compressor permite prever custos e prolongar a vida útil da máquina e do equipamento auxiliar. Os custos para reparar pequenas falhas também diminuem e o tempo de inatividade é reduzido.

Ao utilizar eletrônicos avançados em maior grau, as máquinas são equipadas com instrumentos para exame de diagnóstico. Isso significa que as peças dos componentes podem ser utilizadas da melhor maneira possível e a substituição ocorre somente quando realmente necessário.

A necessidade de recondicionamento de componentes pode ser descoberta em um estágio inicial antes que os danos sejam significativos, evitando danos subsequentes e tempo de inatividade desnecessário.

Ao utilizar os serviços de pós-venda do fornecedor de compressores, sua equipe e peças de reposição originais, pode-se esperar que a máquina mantenha um alto padrão operacional técnico, oferecendo a possibilidade de introduzir modificações com base em experiências recentes durante a vida útil da máquina. A ava-

liação dos requisitos de manutenção é feita por técnicos especialmente treinados, que também realizam treinamento para a equipe de manutenção interna de primeira linha. A equipe qualificada interna deve preferencialmente ser usada para realizar inspeções diárias, pois ouvidos e olhos locais podem ouvir e ver coisas que o equipamento de monitoramento remoto não pode.

4.2.7.2 Equipamento auxiliar

É fácil expandir uma instalação adicionando várias peças de equipamentos auxiliares, por exemplo, para aumentar a qualidade do ar ou monitorar o sistema. No entanto, mesmo o equi-

pamento auxiliar precisa de manutenção e incorre em custos (por exemplo, substituição do filtro, substituição do agente secante, adaptação a outros equipamentos e treinamento da equipe). Além disso, existem custos de manutenção secundária, por exemplo, para a rede de distribuição e máquinas de produção, que são afetadas pela qualidade do ar comprimido, e incluem custos de depósito para óleo e cartuchos de filtro. Todos esses custos devem ser avaliados no cálculo do custo de propriedade que consiste na base para qualquer novo investimento em compressor.

4:12

Exemplo de um cálculo de compressor

Dados de entrada	R\$/kWh	0,10				
Preço da eletricidade	%	12				
Juros calculados	anos	10				
Período de depreciação	horas/ano	6,000				
Tempo de operação						
Consumo anual	MWh/ano	Comp 1	Comp 2	Comp 3	Secadores	TOTAL
Eletro	1,200	550	400	133	2,294	
Água (sistema de circulação)	--	—	—	—	—	—
Custos de operação divididos	R\$/ano	120,000	55,500	40,000	13,300	229,400
Eletro	1,000	500	300	0	0	1,650
Custos anuais sem o recuperador de energia	Euro/ano	152,500	75,000	51,000	22,500	301,000
Custos operacionais	R\$/ano	121,000	56,000	40,300	13,300	230,600
Capital investido	R\$/ano	25,000	15,000	8,000	7,000	55,000
Serviço & Manutenção	R\$/ano	6,500	4,000	2,700	2,200	15,400
Produção de ar - total	mm ³ /ano	12,660	5,770	3,640	-	22,070
Recuperador de energia	R\$/kWh	0,08	0,08	0,08	-	-
Custo da energia (para uso alternativo)	meses/ano	10	10	8	-	-
Período de recuperação	%	93	93	93	-	-
Grau de recuperação	MWh/ano	874	402	234	-	1510
Custo anual com recuperação de energia	R\$/ano	82,500	43,000	32,000	22,500	180,000
Economia com recuperação de energia	R\$/ano	70,000	32,000	19,000	-	121,000
Custo específico sem recuperação de energia	R\$/m ³	0,0120	0,0130	0,0140	0,0012	0,0136
Custo específico com recuperação de energia	R\$/m ³	0,0065	0,0075	0,0088	-	0,0082

Nota: valores arredondados; custo estimado da eletricidade: 0,1 R\$/kWh

4.3 CUSTO DO CICLO DE VIDA

4.3.1 Geral

Uma maneira comum de descrever e analisar o investimento em um produto, um material ou um serviço específico de maneira sistemática, porém simplificada, é usando uma análise de custo do ciclo de vida (LCC). Essa análise examina todos os estágios do ciclo de vida do produto operacional ou do serviço. Isso inclui tudo, desde a seleção de matéria-prima até a remoção/reciclagem final de resíduos.

A análise é frequentemente usada como uma ferramenta de comparação entre diferentes opções de investimento, por exemplo, para produtos ou sistemas com uma função equivalente. O resultado do LCC é frequentemente usado para fornecer orientação em questões relacionadas a processos específicos ou elementos específicos do design do produto. As análises

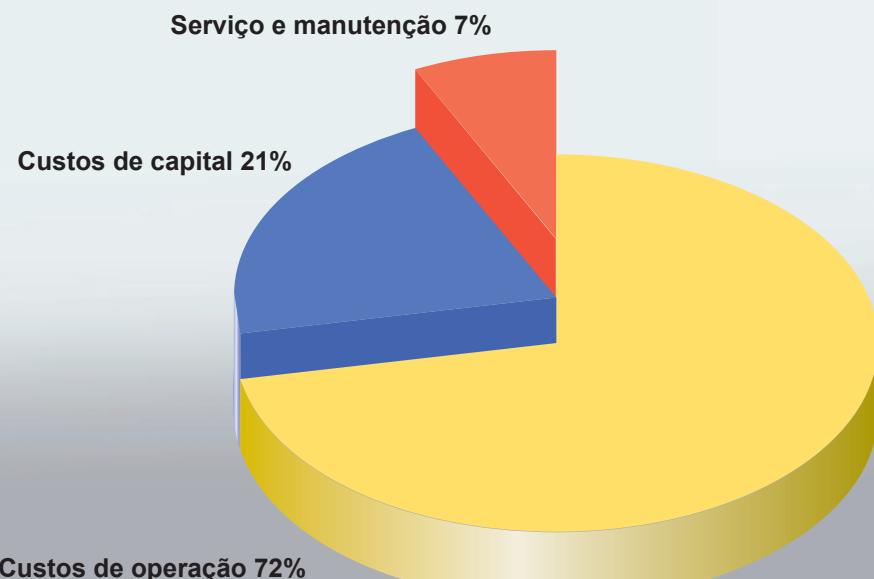
de LCC também podem ser usadas pelas empresas em comunicação com subcontratados, com clientes ou com as autoridades para descrever as suas características de sistema.

Os resultados de uma análise de LCC podem servir de base para a tomada de decisões que minimizarão o impacto operacional de um produto ou serviço no meio ambiente. No entanto, a análise do LCC não oferece respostas para todas as questões possíveis, motivo pelo qual outros aspectos, como qualidade e tecnologia disponível, devem passar por análise para fornecer o material relevante.

4.3.2 Cálculo do custo do ciclo de vida - LCC

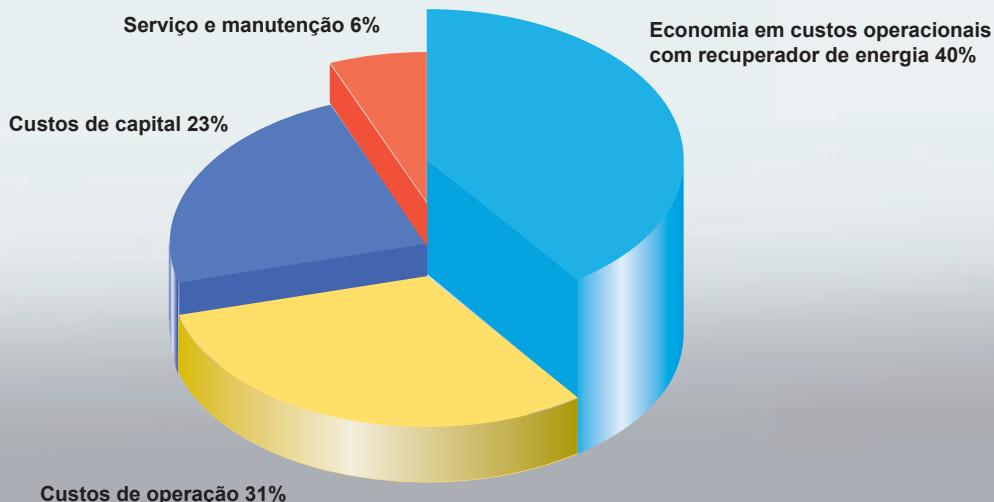
Os cálculos de LCC são utilizados cada vez mais como uma ferramenta para avaliar diversas opções de investimento. Incluídos no cálculo LCC são combinados custos devido à operação do produto durante um período específico, que incluem as despesas de capital, o custo operacional e o custo do serviço de manutenção.

4:13



Contribuidores do custo do ar comprimido sem recuperação de energia.

4:14



Contribuidores do custo do ar comprimido com recuperação de energia.

O cálculo do LCC é frequentemente implantado com base em uma instalação planejada ou em uma instalação em funcionamento. Isso serve como base para definir requisitos para uma nova instalação. No entanto, deve-se salientar que o cálculo de LCC é muitas vezes apenas uma estimativa qualificada de custos futuros e é um pouco limitado devido a ter como base o conhecimento atual da condição do equipamento e pode ser impactado por futuras evoluções nos preços da energia.

Esse cálculo também não explica valores "suaves" que podem ser tão importantes quanto a segurança da produção e seus custos subsequentes. Fazer um cálculo de LCC requer conhecimento e, de preferência, experiência com outras instalações de ar comprimido. Idealmente, deve ser feito em conjunto pelo comprador e pelo vendedor. Questões críticas são como diferentes opções de investimento afetam fatores como qualidade da produção, segurança da produção, requisitos de investimentos subsequentes, manutenção da

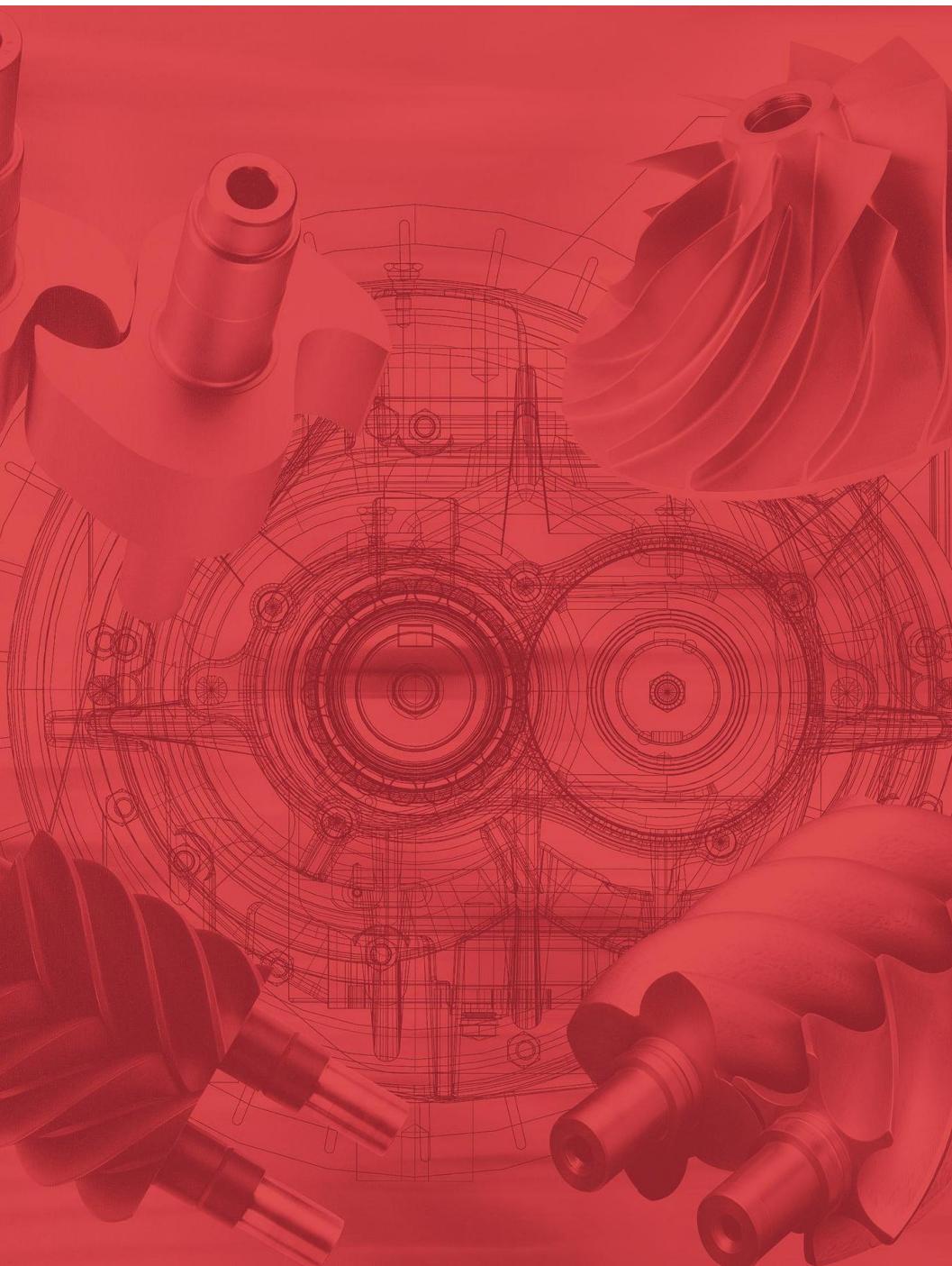
máquina de produção e da rede de distribuição, impacto ambiental, qualidade do produto final e riscos de tempo de inatividade e rejeições. Uma expressão que não deve ser esquecida nesse contexto é LCP, Life Cycle Profit (Lucro do Ciclo de Vida). Isso representa os ganhos que podem ser obtidos com a recuperação de energia e com rejeições reduzidas, para citar apenas algumas possibilidades.

Ao avaliar os custos de serviço e manutenção, a condição esperada do equipamento no final do período de cálculo também deve ser levada em consideração (isto é, se deve ser vista como totalmente utilizada ou se deve ser restaurada à sua condição original).

Além disso, o modelo de cálculo deve ser adaptado ao tipo de compressor envolvido.

O exemplo do capítulo 5 pode servir de modelo para a avaliação econômica de uma instalação de compressor, com ou sem recuperação de energia.

5 EXEMPLO DE CÁLCULO



5.1 EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES DE AR COMPRIMIDO

Os parágrafos a seguir contêm cálculos para dimensionar uma instalação típica de ar comprimido. Sua finalidade é mostrar como algumas das fórmulas e dados de referência dos capítulos anteriores são usados. O exemplo é baseado em um determinado requisito de ar comprimido e os dados dimensionados resultantes são baseados em componentes que foram selecionados para esta instalação específica de ar comprimido. Depois do parágrafo que trata de um caso típico, estão alguns parágrafos adicionais que ilustram como casos especiais podem ser tratados: grande altitude, saída intermitente, recuperação de energia e cálculo da queda de pressão na tubulação.

5.2 DADOS DE ENTRADA

Os requisitos quantitativos de ar comprimido e as condições ambientais locais devem ser estabelecidos antes de iniciar qualquer dimensionamento. Além destes requisitos, deve ser feita uma seleção qualitativa que considere se o compressor deve ser lubrificado a óleo ou isento de óleo e se o equipamento deve ser resfriado a água ou a ar.

5.2.1 Requisito de ar comprimido

Vamos supor que a instalação contenha três consumidores de ar comprimido com os seguintes dados:

Consumidor	Vazão de ar	Pressão	Ponto de orvalho
1	12 Nm ³ /min	6 bar(e)	+6 °C
2	67 l/s (FAD)	7 bar(a)	+6 °C
3	95 l/s (FAD)	4 bar(e)	+6 °C

5.2.2 Condições ambientais para o dimensionamento

Temperatura normal do ambiente: 20 °C

Temperatura máxima do ambiente: 30 °C

Pressão ambiente: 1 bar(a)

Umidade: 60%

5.2.3 Especificações adicionais

Somente equipamentos resfriados a ar.

Qualidade do ar comprimido de compressores lubrificados a óleo.

5.3 SELEÇÃO DE COMPONENTES

Recalcule todos os dados de entrada da tabela de requisitos em 5.2.1, para garantir que sejam normalizados em relação às unidades de medida antes de dimensionar os diferentes componentes.

Conversão de vazão:

Em geral, a unidade l/s é usada para definir a capacidade do compressor, razão pela qual o consumidor 1, dado em Nm³/min, deve ser recalculado em l/s.

$$12 \text{ Nm}^3/\text{min} = 12 \times 1000 / 60 = 200 \text{ NI/s.}$$

A inserção dos dados de entrada atuais na fórmula fornece:

$$q_{FAD} = \frac{q_N \times (273 + T_{FAD}) \times 1,013}{273 \times p_{FAD}} = \frac{200 \times (273 + 30) \times 1,013}{273 \times 1,00} \approx 225 \text{ l/s}$$

q_{FAD} = Descarga livre efetiva de ar [l/s]

q_N = Vazão de ar em normal [NI/s]

T_{FAD} = Temperatura máxima de entrada [30 °C]

T_N = Temperatura de referência normal [0 °C]

p_{FAD} = Pressão de entrada padrão [1,00 bar(a)]

p_N = Pressão de referência normal [1,013 bar(a)]

Conversão de pressão:

A unidade geralmente usada para definir a pressão dos componentes do ar comprimido é a pressão efetiva (também chamada de pressão manométrica), informada na barra (e).

O consumidor 2 é definido em pressão absoluta, 7 bar (a). A pressão ambiente é subtraída de 7 bar para produzir a pressão efetiva. Como a pressão ambiente neste caso é de 1 bar (a), a pressão para o consumidor 2 pode ser escrita como (7-1) bar (e) = 6 bar (e).

Com os recálculos acima, a tabela com os dados uniformes de necessidades se torna:

Consumidor	Vazão de Ar	Pressão	Ponto de Orvalho
1	225 l/s (FAD)	6 bar(e)	+5 °C
2	67 l/s (FAD)	6 bar(e)	+5 °C
3	95 l/s (FAD)	4 bar(e)	+5 °C

5.3.1 Dimensionando o compressor

O consumo total de ar é a soma dos três consumidores $225 + 67 + 95 = 387 \text{ l/s}$. Levando em consideração possíveis alterações nos dados planejados de consumo de ar e posterior expansão das necessidades de ar comprimido, uma margem de segurança de aprox. 10-20% deve ser adicionada. Isso fornece uma vazão de $387 \times 1,15 \approx 450 \text{ l/s}$ (incluindo a margem de segurança de 15%).

A pressão máxima exigida para todos os consumidores é de 6 bar (e). Uma válvula redutora de pressão deve ser montada no consumidor número 3 com o requisito de 4 bar (e).

Assumindo que a queda de pressão total no secador, filtro e tubulação não exceda a 1,5 bar, o compressor com capacidade máxima de pressão de trabalho não inferior a $6 + 1,5 = 7,5$ bar (e) é adequado neste caso.

5.3.2 Seleção final do compressor

Um compressor com as seguintes especificações é selecionado:

Tipo de compressor de parafuso injetado a óleo

Pressão máxima de saída do compressor = 7,5 bar (e)

FAD a 7 bar (e) = 450 l/s

Esta vazão é atendida por um compressor com potência instalada no eixo do motor = 162 kW.

A temperatura do ar comprimido no resfriador posterior do compressor = temperatura ambiente + 10 °C. Além disso, o compressor selecionado possui regulação de carga/alívio com uma frequência máxima de ciclo de

30 segundos. Utilizando a regulagem de carga/alívio, o compressor selecionado apresenta uma flutuação de pressão entre 7,0 e 7,5 bar (e).

5.3.3 Dimensionando o volume do reservatório de ar

q_c = capacidade do compressor = 450 l/s

p_1 = pressão de entrada no compressor = 1 bar(a)

T_1 = temperatura máxima de entrada = 30 °C = 273 + 30 = 303 °K

f_{max} = frequência máxima do ciclo = 1 ciclo/30 segundos

$(p_u - p_l)$ = diferença de pressão entre o compressor em carga e em alívio = 0,5 bar

T_0 = a temperatura do ar comprimido na saída do compressor selecionado é 10 °C mais alta que a temperatura ambiente; portanto, a temperatura máxima no reservatório de ar será = 273 + 40 = 313 K

O compressor com regulagem de carga/alívio fornece a seguinte fórmula para o volume do reservatório de ar:

$$V = \frac{0.25 \times q_c \times T_0}{f_{max} \times (p_u - p_l) \times T_1} = \frac{0.25 \times 450 \times 313}{1/30 \times 0.5 \times 303} = 6.895 \text{ litros}$$

Este é o volume mínimo recomendado para o reservatório de ar.

Geralmente é selecionado o maior tamanho próximo.

5.3.4 Dimensionando o secador

O ponto de orvalho necessário neste exemplo é + 5 °C, portanto, um secador por refrigeração é a escolha mais adequada. Ao selecionar o tamanho do secador, vários fatores devem ser levados em consideração e a capacidade do secador deve ser corrigida usando os fatores de correção apropriados. Esses fatores de correção são exclusivos para cada modelo de secador por refrigeração. No caso abaixo, os fatores de correção aplicáveis aos secadores por refrigeração da Atlas Copco são usados e estão indicados na folha de dados do produto. Os fatores de correção são:

1. Temperatura de entrada no secador por refrigeração e ponto de orvalho de pressão.

Como a temperatura do ar comprimido na saída do compressor é 10°C mais alta que a temperatura

ambiente, a temperatura de entrada no secador por refrigeração será no máximo $30 + 10 = 40^{\circ}\text{C}$. Além disso, o ponto de orvalho de pressão desejado é de $+ 5^{\circ}\text{C}$.

O fator de correção apropriado 0,95 é obtido na folha de dados da Atlas Copco.

2. Pressão de trabalho

A pressão real de trabalho é aprox. 7 bar, o que representa um fator de correção de 1,0.

3.Temperatura ambiente

Para uma temperatura máxima do ambiente de 30°C , é obtido um valor de correção de 0,95.

Consequentemente, o secador por refrigeração deve ser capaz de lidar com a capacidade total do compressor multiplicada pelos fatores de correção acima.

$$450 \times 0,95 \times 1,0 \times 0,95 = 406 \text{ l/s}$$

5.3.5 Resumo para prosseguir o cálculo

Um secador por refrigeração resfriado a ar é selecionado com os dados a seguir:

Capacidade a 7 bar (e) = 450 l/s

Consumo total de energia = 5,1 kW

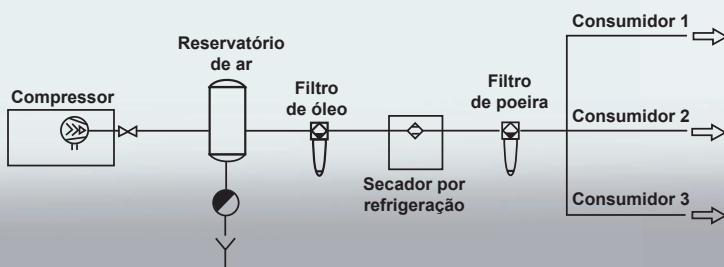
Fluxo de calor emitido para o ambiente = 14,1 kW

Queda de pressão no secador = 0,09 bar

5.3.6 Verificando os cálculos

Quando todos os componentes para a instalação do compressor foram selecionados, deve-se garantir que a queda de pressão total não seja muito grande. Isso é feito somando todas as quedas de pressão dos componentes e tubos. É apropriado desenhar um diagrama esquemático da instalação de ar comprimido, como mostra a Figura 5: 1.

5:1



A queda de pressão para os componentes é obtida junto aos fornecedores, enquanto a queda de pressão no sistema de tubos não deve exceder a 0,1 bar.

A queda de pressão total agora pode ser calculada:

Componente	Queda de pressão (bar)
Filtro de óleo (perda de pressão quando o filtro é novo)	0,08
Secador por refrigeração	0,09
Filtro de poeira (perda de pressão quando o filtro é novo)	0,08
Sistema de tubulações na planta central do compressor	0,05
Tubos desde a planta central do compressor até os pontos de consumo	0,1
Perda de pressão total:	0,4

A pressão máxima sem carga de 7,5 bar (e) e a pressão de carga de 7,0 bar (e) para o compressor selecionado fornece uma pressão mais baixa para os consumidores de $7,0 - 0,4 = 6,6$ bar (e). Acrescente a isso o aumento adicional da queda de pressão no filtro que ocorre ao longo do tempo. Esse aumento da queda de pressão é exclusivo para cada tipo de filtro e pode ser obtido na folha de dados do produto da Atlas Copco.

5.4 DIMENSIONAMENTOS ADICIONAIS

5.4.1 Cálculo da quantidade de condensados

Como foi escolhido um compressor lubrificado a óleo, o condensado da água separada no compressor e no secador de refrigeração conterá pequenas quantidades de óleo. O óleo deve ser separado antes que a água seja liberada no esgoto, o que pode ser feito usando um separador de óleo. É necessário informação sobre a quantidade de água condensada para dimensionar corretamente o separador de óleo.

A quantidade total de água no fluxo de ar admitido pelo compressor é obtida a partir da relação: f_1 = umidade relativa x a quantidade de água (g/litro) que o ar pode transportar à temperatura ambiente máxima de 30°C x fluxo de ar.

$$f_1 = 0.6 \times 0.030078 \times 445 \approx 8.0 \text{ g/s}$$

f_2 = quantidade de ar restante no ar comprimido após a secagem (condição saturada a + 6 °C).

$$f_2 = \frac{1 \times 0.007246 \times 445}{8} \approx 0.4 \text{ g/s}$$

O fluxo de condensados total da instalação f_3 , é o seguinte:

$$f_3 = f_1 - f_2 = 8,0 - 0,4 = 7,6 \text{ g/s} \approx 27,4 \text{ kg/h}$$

Este número assume a carga contínua por uma hora.

Com a ajuda deste cálculo do fluxo de condensados, agora pode ser escolhido o separador de óleo correto.

5.4.2 Ventilação requerida na sala do compressor

Tendo como princípio que o calor liberado no ar da sala será removido com o ar de ventilação, então determinamos os requisitos para a ventilação na sala do compressor.

Para este cálculo, é utilizada a seguinte relação:

$$P = m \times c_p \times \Delta T$$

$$P = \text{fluxo total de calor [kW]}$$

$$m = \text{vazão mássica [kg/s]}$$

$$c_p = \text{calor específico [J/kgxK]}$$

$$\Delta T = \text{diferença de temperatura [K]}$$

A fórmula para a ventilação do fluxo em massa pode ser a seguinte:

$$m = \frac{P}{c_p x \Delta T}$$

onde:

ΔT = aumento máximo permitido para a temperatura do ar de ventilação (por exemplo 10 °K)

c_p = 1.006 kJ/kg x K (a 1 bar e 20°C)

P = (aproximadamente 94% da potência do eixo fornecida ao compressor + a diferença entre a potência total fornecida ao pacote do compressor e a potência do eixo fornecida ao compressor + o fluxo de calor indicado pelo secador por refrigeração) = (0,94 x 162) + (175 - 162) + 4,1 ≈ 180 kW

Então, a ventilação do fluxo de ar em massa é:

$$m = \frac{P}{c_p x \Delta T} = \frac{180}{1.006 \times 10} = 17.9 \text{ kg/s}$$

Com a densidade do ar de 1,2 kg/m³, esse fluxo em massa representa 17,9/1,2 ≈ 15 m³/s.

5.5 CASO ESPECIAL: GRANDE ALTITUDE

Pergunta::

Imagine que a mesma necessidade de ar comprimido descrita no exemplo anterior seja especificada, mas a uma altitude de 2.500 metros acima do nível do mar e com uma temperatura ambiente máxima de 35°C. Qual é a capacidade necessária do compressor (expressa como fornecimento de ar livre) neste caso?

Resposta:

O ar fica mais fino em grandes altitudes. Este é um fato que deve ser levado em consideração ao dimensionar o equipamento de ar comprimido para atender a uma demanda de ar especificada para as condições normais, em Nm³/min. Nos casos em que a solicitação de vazão de ar do consumidor é declarada em fornecimento de ar livre (FAD), nenhum recálculo é necessário.

Como o consumidor 1 no exemplo citado é especificado em Nm³/min a 1,013 bar (a) e 0°C, o fluxo FAD necessário para esse consumidor deve ser recalculado para a condição 35°C a 2.500 m de altitude. Usando a tabela de consulta, a pressão ambiente a 2.500 metros acima do nível do mar é de 0,74 bar. O fluxo para o consumidor 1, recalculado para NI/s (12 Nm³/min = 200 NI/s), é então inserido na fórmula abaixo:

$$q_{FAD} = q_N \times \frac{T_{FAD}}{T_N} \times \frac{p_N}{p_{FAD}} = 200 \times \frac{(273 + 35)}{273} \times \frac{1.013}{0.74} \approx 309 \text{ l/s}$$

A capacidade total de ar comprimido requerido é então de 309 + 67 + 95 = 471 l/s (FAD).

5.6 CASO ESPECIAL: VAZÃO INTERMITENTE

Pergunta:

Imagine que, neste cálculo do exemplo, exista uma requisição extra do consumidor 1 de mais 200 l/s por 40 segundos a cada hora. Durante esta fase intermitente, a pressão no sistema pode cair para 5,5 bar (e). Qual deve ser o volume do reservatório para atender a esse requisito extra?

Resposta: Durante um curto período de tempo, mais ar comprimido pode ser fornecido do que os compressores podem suprir em conjunto usando o ar comprimido armazenado em um reservatório de ar. No entanto, para preencher esse reservatório de ar entre os períodos intermitentes nos quais é necessário ar extra, o compressor deve apresentar uma capacidade específica maior. A seguinte relação se aplica:

$$V = \frac{q_{xt}}{p_1 - p_2}$$

q = fluxo de ar durante a fase de esvaziamento = 200 l/s

t = duração da fase de esvaziamento = 40 segundos

$p_1 - p_2$ = queda de pressão permitida durante a fase de esvaziamento = pressão normal do sistema - pressão mínima aceita na fase de esvaziamento = 6,42 - 5,5 = 0,92 bar

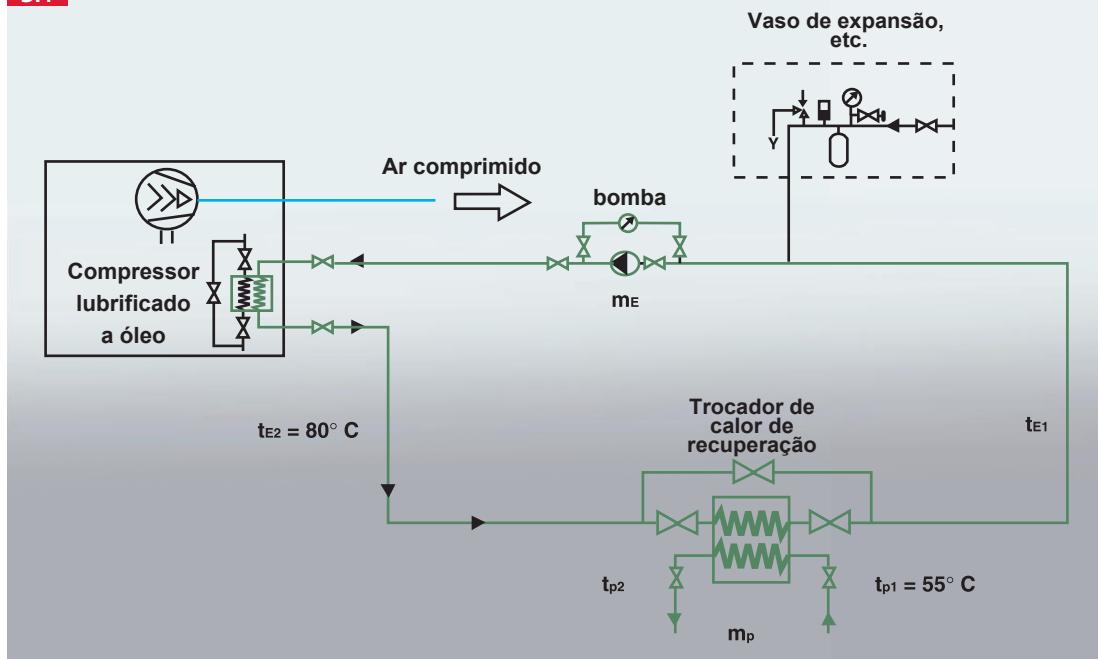
Inserindo os dados na fórmula acima para calcular o volume do reservatório:

$$V = \frac{q_{xt}}{p_1 - p_2} = \frac{200 \times 40}{0.92} \approx 8700 \text{ l}$$

Além disso, o compressor deve ter uma determinada capacidade adicional, para poder encher o reservatório de ar após a fase de esvaziamento. Se o compressor selecionado tiver uma sobrecapacidade de 5 l/s = 18.000 litros/hora, o volume do reservatório calculado acima será preenchido em meia hora. Como o reservatório de ar será esvaziado apenas uma vez a cada hora, esse excesso de capacidade do compressor é suficiente.

5.7 CASO ESPECIAL: RECUPERAÇÃO DE ENERGIA DE ÁGUA DE APLICAÇÃO

5.1



Pergunta:

Como construímos um circuito de recuperação de energia à base da água do compressor no exemplo? A água de aplicação a ser aquecida é uma linha de água quente (retorno da caldeira) com uma temperatura de 55°C . Calcule o fluxo necessário para o circuito de recuperação de energia e a energia que pode ser recuperada pela aplicação. Calcule também o fluxo e a temperatura de saída para o retorno da caldeira.

Resposta:

Comece desenhando o circuito de recuperação de energia e nomeie as diferentes potências, fluxos e temperaturas.

Agora faça o cálculo abaixo.

P_E = potência transferida do compressor para o circuito de recuperação de energia [kW]

P_A = potência transferida do circuito de recuperação de energia para a aplicação [kW]

m_E = fluxo de água no circuito de recuperação de energia [l/s]

m_A = vazão de água no retorno da caldeira [l/s]

t_{E1} = temperatura da água antes do compressor [$^\circ\text{C}$]

t_{E2} = temperatura da água após o compressor [$^\circ\text{C}$]

t_{A1} = temperatura de entrada no retorno da caldeira [$^\circ\text{C}$]

t_{A2} = temperatura in uscita nel ritorno della caldaia [$^\circ\text{C}$]

5.7.1 Pressupostos

As seguintes suposições foram feitas:

A temperatura da água do compressor, que é adequada para a recuperação de energia, pode ser obtida com o fornecedor do compressor. Supõe-se que seja $t_{E2} = 80^\circ\text{C}$.

Suposição para o circuito de água através do trocador de calor do recuperador de energia:

$$t_{E1} = t_{A1} + 5^\circ\text{C} = 55^\circ\text{C} + 5^\circ\text{C} = 60^\circ\text{C}$$

$$t_{A2} = t_{E2} - 5^\circ\text{C} = 80^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C} = 75^\circ\text{C}$$

Adicionalmente, assume-se que o sistema de tubulações e o trocador de calor não tem troca de calor com o ambiente.

5.7.2 Cálculo da vazão de água no circuito de recuperação de energia

$$P = m \times c_p \times \Delta T$$

$$\Delta T = \text{aumento da temperatura através do compressor} = t_{E2} - t_{E1} = 80^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C}$$

$$c_p = \text{capacidade térmica específica para a água} = 4,185 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$m = \text{vazão em massa no circuito de recuperação de energia} = m_E$$

$$P = 70\% \text{ da potência do eixo fornecida} = P_E = 0,70 \times 162 = 113 \text{ kW}$$

Essa é a potência máxima possível que pode ser recuperada do compressor selecionado.

A fórmula pode ser escrita como:

$$m_E = \frac{P_E}{c_p \times \Delta T} = \frac{113}{4.185 \times 20} = 1.35 \text{ kg/s} = 1.35 \text{ l/s}$$

5.7.3 Balanço de energia no trocador de calor de recuperação

Para o trocador de calor de recuperação, aplica-se o seguinte:

$$P_E = m_E \times c_p \times (t_{E2} - t_{E1})$$

$$P_A = m_A \times c_p \times (t_{A2} - t_{A1})$$

No entanto, como se presume que nenhuma troca de calor ocorre com o ambiente, a energia transferida para o circuito de recuperação de energia do compressor será igual à energia transferida no trocador de calor de recuperação, ou seja, $P_A = P_E = 113 \text{ kW}$.

A fórmula pode ser escrita como:

$$m_A = \frac{P_A}{(t_{A2} - t_{A1}) \times c_p} = \frac{113}{(75 - 55) \times 4.185} \approx 1.35 \text{ kg/s} = 1.35 \text{ l/s}$$

5.7.4 Resumo

O cálculo mostra que a potência que pode ser recuperada é de 113 kW. Isso requer uma vazão de água no circuito de recuperação de energia de 1,35 l/s. A vazão adequada para o retorno da caldeira também é de 1,35 l/s, com um aumento da temperatura de alimentação da caldeira em 20°C .

5.8 CASO ESPECIAL: PERDA DE CARGA NA TUBULAÇÃO

Pergunta:

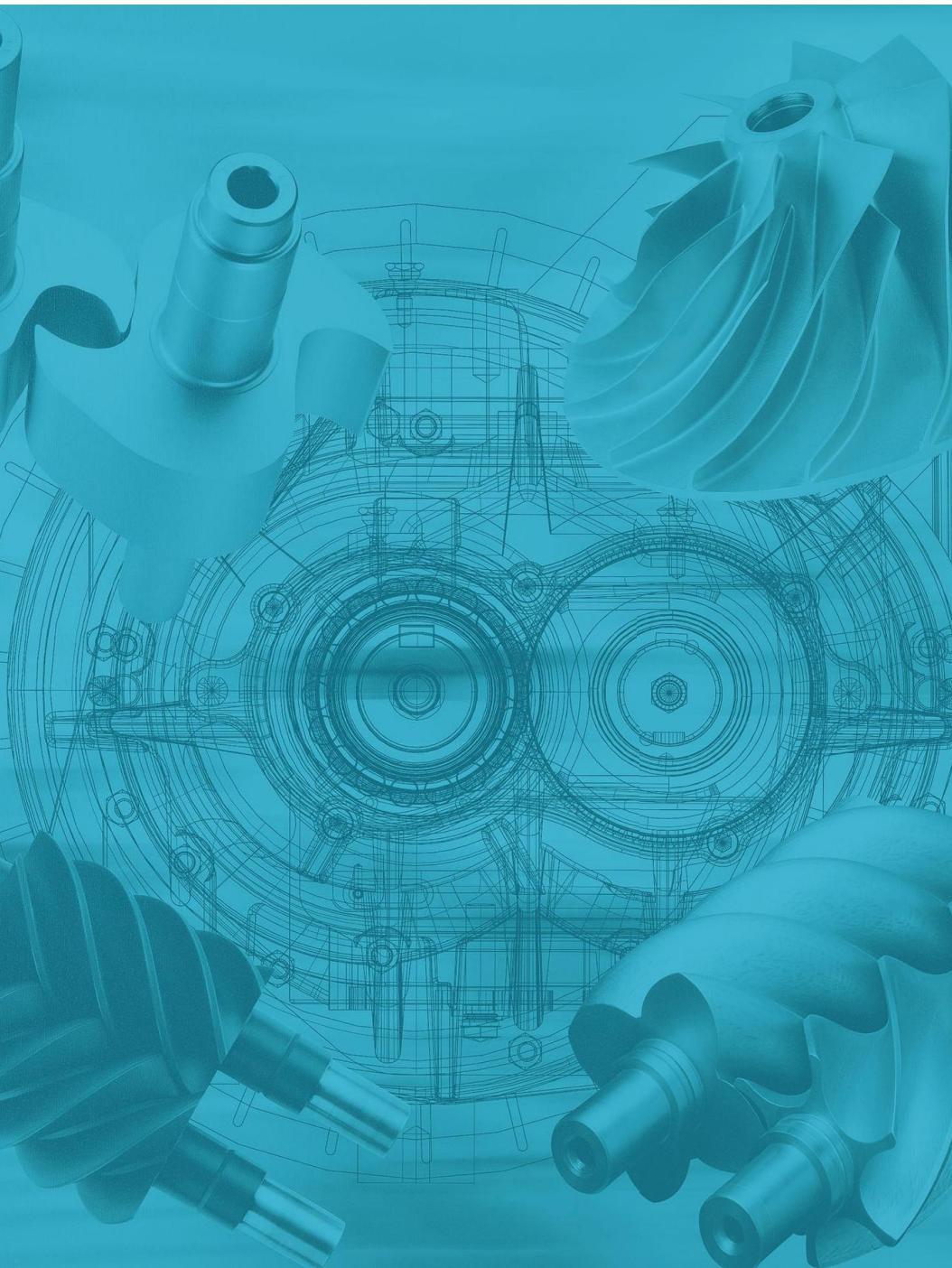
Um tubo de 23 metros com um diâmetro interno de 80 mm deve conduzir uma vazão de ar comprimido de $q_c = 140 \text{ l/s}$. O tubo é encaminhado com 8 cotovelos, todos com um raio de curvatura igual ao diâmetro interno do tubo. Qual será a queda de pressão no tubo se a pressão inicial for de 8 bar (a)?

Resposta: Primeiro, determine o comprimento equivalente do tubo para os 8 cotovelos. O comprimento equivalente do tubo de 1,3 metro por cotovelo pode ser determinado na Figura 3:36. O comprimento total do tubo é, portanto, $8 \times 1,3 + 23 = 33,4$ metros. A seguinte fórmula é usada para calcular a queda de pressão:

$$\Delta p = 450 \frac{q_c^{1.85} \times l}{d^5 \times p} = 450 \frac{140^{1.85} \times 33.4}{80^5 \times 8} \approx 0.0054 \text{ bar}$$

Assim, a queda de pressão total através do tubo será de 0,0054 bar, o que é muito baixo.

6 APÊNDICES



6.1 O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)

Qualquer quantidade física é o produto de um valor numérico e uma unidade. Desde 1964, o Sistema Internacional de Unidades (sistema SI) foi gradualmente adotado em todo o mundo, com exceção da Libéria, Mianmar e Estados Unidos. Informações básicas podem ser encontradas na norma ISO 31, que está em revisão e será substituída pela ISO / IEC 80000: Quantidades e Unidades.

As unidades são divididas em quatro classes diferentes:

Unidades base

Unidades suplementares

Unidades derivadas

Unidades adicionais

Unidades base, unidades suplementares e unidades derivadas são chamadas de unidades SI. As unidades adicionais não são Unidades SI, embora sejam aceitas para uso com as unidades SI.

As unidades base são qualquer uma das unidades independentes estabelecidas, nas quais todas as outras unidades podem ser expressas.

Existem 7 unidades básicas no sistema SI:

Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Corrente elétrica	ampere	A
Temperatura	kelvin	K
Intensidade luminosa	candela	cd
Qtde. de substância	mol	mol

As unidades derivadas são formadas como um poder ou produto de poderes de uma ou mais unidades base e/ou unidades suplementares de acordo com as leis físicas para a relação entre essas diferentes unidades.

Unidades adicionais:

Um número limitado de unidades fora do siste-

As 15 unidades derivadas mais importantes abaixo receberam nomes genéricos:

Quantidade	Unidade	Símbolo	Expresso em outras unidades SI
frequência	hertz	Hz	s^{-1}
força	newton	N	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
pressão/tensão mecânica	pascal	Pa	N/m^2
energia/trabalho	joule	J	$N \cdot m$
potência	watt	W	J/s
quantidade elétrica/carga	coulomb	C	$A \cdot s$
tensão elétrica	volt	V	W/A
capacitância	farad	F	C/V
resistência	ohm	Ω	V/A
condutividade	siemens	S	A/V
fluxo magnético	weber	Wb	$V \cdot s$
densidade do fluxo magnético	tesla	T	Wb/m^2
indutância	henry	H	Wb/A
fluxo luminoso	lúmen	lm	$Cd \cdot sr$
luz	lux	lx	lm/m^2
ângulo	radian	rad	m/m
ângulo sólido	steradian	sr	m^2/m^2

ma SI não pode ser eliminado por diferentes razões, e continua a ser usado junto com o SI como unidades adicionais.

A seguir, são apresentadas unidades adicionais comuns para uso técnico:

Quantidade	Unidade	Símbolo	Observação
volume	litro	l	$1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3$
tempo	minuto	min	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
tempo	hora	h	$1 \text{ h} = 60 \text{ min}$
massa	ton métrica	t	$1 \text{ t} = 1.000 \text{ kg}$
pressão	bar	bar	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
ângulo plano	grau	°	$1^\circ = \pi/180 \text{ rad}$
ângulo plano	minuti	'	$1' = 1^\circ/60$
ângulo plano	segundo	"	$1'' = 1'/60$

Os prefixos podem ser adicionados a uma unidade para produzir um múltiplo da unidade original. Todos esses múltiplos são potências inteiros de dez, por exemplo:

- quilo - denota um múltiplo de mil (10^3)
- mili - denota um múltiplo de um milésimo (10^{-3})

Quatorze desses prefixos estão listados nas recomendações internacionais (padrões), conforme estabelecido na tabela abaixo.

Potência	Designação do prefixo	Símbolo do prefixo	Exemplo	Símbolo
10^{12}	tera	T	1 terajoule	1 TJ
10^9	giga	G	1 gigahertz	1 GHz
10^6	mega	M	1 megawatt	1 MW
10^3	kilo	k	1 quilômetro	1 km
10^2	hecto	h	1 hectolitro	1 hl
10^1	deca	da	1 decalumen	1 dalm
10^{-1}	deci	d	1 decibel	1 dB
10^{-2}	centi	c	1 centímetro	1 cm
10^{-3}	milli	m	1 miligrama	1 mg
10^{-6}	micro	μ	1 micrometro	1 μm
10^{-9}	nano	N	1 nanohenry	1 nH
10^{-12}	pico	p	1 picofarad	1 pF
10^{-15}	femto	f	1 femtometer	1 fm
10^{-18}	atto	a	1 attosecond	1 as

6.2 SÍMBOLOS EM DESENHOS



Filtro de ar



Silenciador



Difusor



Compensador



Válvula de limitação de fluxo



Compressor de parafuso



Válvula de retenção



Válvula de interrupção



Válvula de segurança



Válvula manual



Fechamento da válvula na falha da energia de atuação



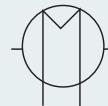
Abertura da válvula na falha da energia de atuação



Separador de óleo



Ejector



Resfriador arrefecido a água



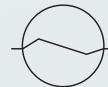
Separador de água



Coletor de condensação



Direção de fluxo



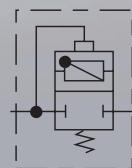
Resfriador arrefecido a ar



Ventilador



Vaso de expansão



Válvula de pressão mínima



Válvula termostática

	Válvula termostática		Ar de sinal
	Filtro de fluido		Sinal elétrico
	Bomba de fluido		Linha de limite
	Tanque de óleo com drenagem manual		Energia elétrica
	Restritor		Motor elétrico
	Bypass		Caixa de distribuição elétrica
	Regulador de pressão		Acoplamento do motor
	Válvula de bloqueio de óleo		Flange cega
	Ar		Sensor para pressão, temperatura, etc.
	Óleo		Sensor para pressão, temperatura, etc.
	Água		
	Drenagem		
	Conexão mecânica		Sensor para pressão, temperatura, etc.

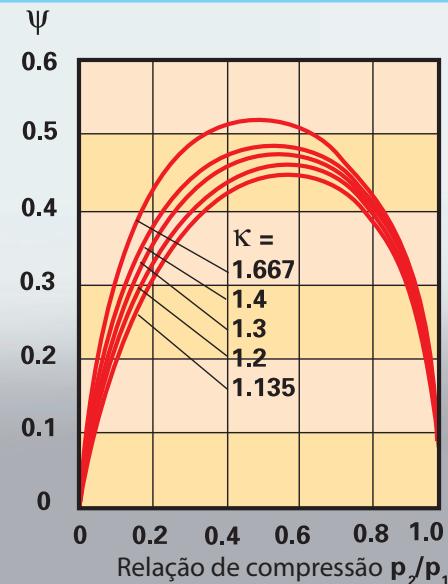
6.3 DIAGRAMAS E TABELAS

Material	J/kg x K
ar (pressão atmosférica)	1 004
alumínio	920
cobre	390
óleo	1 670-2 140
aço	460
água	4 185
zincos	385

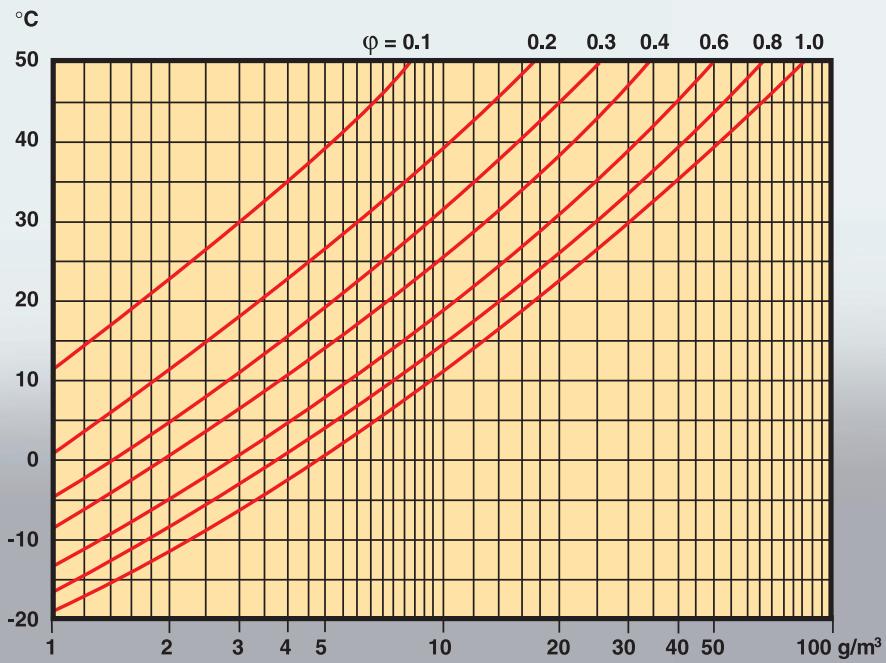
Capacidade de calor específico para alguns materiais.

Ponto de ebullição	78.8	K
Pressão crítica (a)	97.66	bar
Temperatura crítica	132.52	K
Peso específico	1.225	kg/m ³
Viscosidade dinâmica	17.89x10 ⁻⁶	Pa x s
Ponto de congelamento	57.61	K
Constante do gás	287.1	J/kg x K)
Viscosidade cinemática	14.61x10 ⁻⁵	m/s ²
Massa molar	28.964	adimensional
Capacidade de calor em:		
Pressão constante	1.004	kJ/(kg x K)
Relação de capacidade de calor específico	1.40	adimensional
Velocidade do som	340.29	m/s
Condutividade térmica	0.025	W/(m x k)

Algumas propriedades físicas do ar seco a 15°C e 1,013 bar.



Coeficientes de vazão em função da relação de compressão para diferentes valores de K



Teor de água no ar a diferentes pressões relativas de vapor (ϕ).

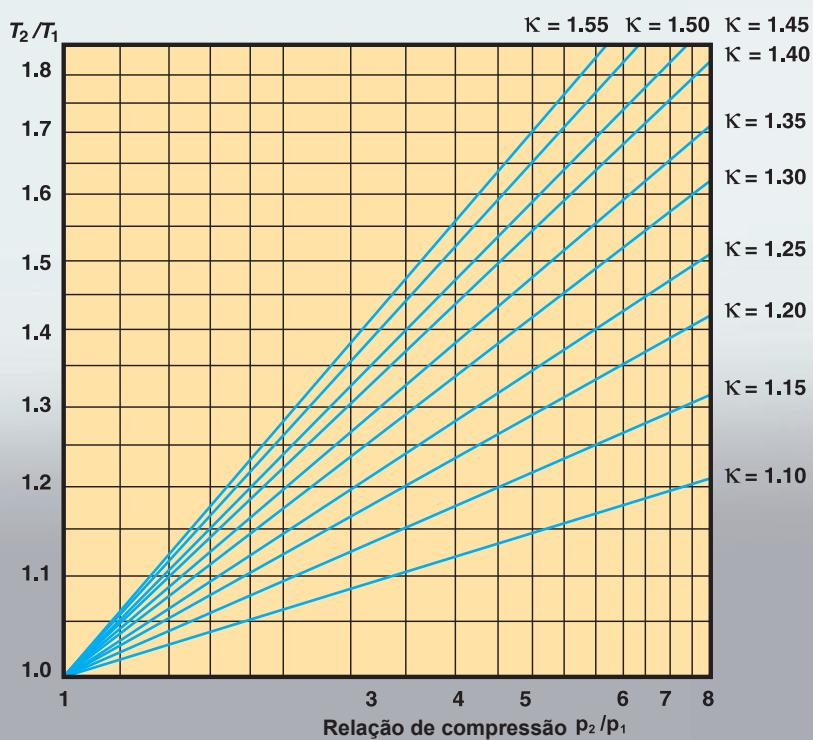


Diagrama mostrando a relação de temperatura T_2/T_1 para diferentes gases com diferentes valores de K durante a compressão isentrópica.

t °C	P_s mbar	ρ_a g/m ³	t °C	P_s mbar	ρ_a g/m ³
-40	0.128	0.119	5	8.72	6.80
-38	0.161	0.146	6	9.35	7.26
-36	0.200	0.183	7	10.01	7.75
-34	0.249	0.225	8	10.72	8.27
-32	0.308	0.277	9	11.47	8.82
-30	0.380	0.339	10	12.27	9.40
-29	0.421	0.374	11	13.12	10.01
-28	0.467	0.413	12	14.02	10.66
-27	0.517	0.455	13	14.97	11.35
-26	0.572	0.502	14	15.98	12.07
-25	0.632	0.552	15	17.04	12.63
-24	0.689	0.608	16	18.17	13.63
-23	0.771	0.668	17	19.37	14.48
-22	0.850	0.734	18	20.63	15.37
-21	0.937	0.805	19	21.96	16.31
-20	1.03	0.884	20	23.37	17.30
-19	1.14	0.968	21	24.86	18.34
-18	1.25	1.06	22	26.43	19.43
-17	1.37	1.16	23	28.09	20.58
-16	1.51	1.27	24	29.83	21.78
-15	1.65	1.39	25	31.67	23.05
-14	1.81	1.52	26	33.61	24.38
-13	1.98	1.65	27	35.65	25.78
-12	2.17	1.80	28	37.80	27.24
-11	2.38	1.96	29	40.06	28.78
-10	2.60	2.14	30	42.43	30.38
-9	2.84	2.33	31	44.93	32.07
-8	3.10	2.53	32	47.55	33.83
-7	3.38	2.75	33	50.31	35.68
-6	3.69	2.99	34	53.20	37.61
-5	4.02	3.25	35	56.24	39.63
-4	4.37	3.52	36	59.42	41.75
-3	4.76	3.82	37	62.76	43.96
-2	5.17	4.14	38	66.28	46.26
-1	5.62	4.48	39	69.93	48.67
0	6.11	4.85	40	73.78	51.19
1	6.57	5.19	41	77.80	53.82
2	7.06	5.56	42	82.02	58.56
3	7.58	5.95	43	86.42	59.41
4	8.13	6.36	44	91.03	62.39

Pressão de saturação (P_s) e densidade (ρ_a) de vapor de água saturado.

Gas	Volume %	Peso %
nitrogênio N_2	78.084	75.520
oxigênio O_2	20.947 6	23.142
argônio Ar	0.934	1.288
dióxido de carbono CO_2	0.031 4	0.047 7
neon Ne	0.001 818	0.001 267
hélio He	0.000 524	0.000 072 4
criptônio Kr	0.000 114	0.000 330
xenônio Xe	0.000 008 7	0.000 039
Hidrogênio H_2	0.000 05	0.000 003
Metano CH_4	0.000 2	0.000 1
óxido nitroso N_2O	0.000 05	0.000 08
Ozônio O_3	verão: 0 to 0.000 007	0 a 0.000 01

Composição do ar limpo e seco ao nível do mar (permanece relativamente constante até uma altitude de 25 km)

Tipo e tamanho de máquina	Necessidade máxima de ar em l/s
Máquinas de perfuração, Ø = diâmetro da ponta (mm) Pequena $\varnothing < 6.5$ Média $6.5 < \varnothing = < 10$ Grande $10 < \varnothing < 16$	6.0 7.5 16.5
Cortadores de fio	6
Chaves de fenda, d = tamanho do parafuso Pequena $d < M6$ Média $M6 < d < M8$	5.5 7.5
Chave de impacto, d = tamanho do chumbador Pequena $d < M10$ Média $M10 < d < M20$ Grande $d \geq M20$	5.0 7.5 22.0
Máquina de enchimento	7.5
Polidores /retíficas, e = potência (kW) Pequena $e < 0,5$ Grande $e < 0,5$	8.0 16.5
Moedores, e = potência (kW) Pequena $0,4 < e < 1,0$ Média $1,0 < e < 2$ Grande $e < 2$	20.0 40.0 60.0
Martelos Leve Pesado	6.0 13.5
Talhas de ar t = tonelagem de elevação $t < 1$ tonelada $t > 1$ tonelada	35 45
Scaler	5.0
Bocal de limpeza	6.0
Parafusadeira, d = tamanho do parafuso $d \leq M8$ $d \geq M10$	9 19

Dados típicos de consumo de ar de algumas ferramentas e máquinas comuns, com base na experiência. Esses valores formam a base para o cálculo da capacidade necessária do compressor.

Ponto de orvalho °C	g/m ³						
+100	588.208	+58	118.199	+16	13.531	-25	0.55
99	569.071	57	113.130	15	12.739	26	0.51
98	550.375	56	108.200	14	11.987	27	0.46
97	532.125	55	103.453	13	11.276	28	0.41
96	514.401	54	98.883	12	10.600	29	0.37
95	497.209	53	94.483	11	9.961	30	0.33
94	480.394	52	90.247	10	9.356	31	0.301
93	464.119	51	86.173	9	8.784	32	0.271
92	448.308	50	82.257	8	8.243	33	0.244
91	432.885	49	78.491	7	7.732	34	0.220
90	417.935	48	74.871	6	7.246	35	0.198
89	403.380	47	71.395	5	6.790	36	0.178
88	389.225	46	68.056	4	6.359	37	0.160
87	375.471	45	64.848	3	5.953	38	0.144
86	362.124	44	61.772	2	5.570	39	0.130
85	340.186	43	58.820	1	5.209	40	0.117
84	336.660	42	55.989	0	4.868	41	0.104
83	324.469	41	53.274			42	0.093
82	311.616	40	50.672	-1	4.487	43	0.083
81	301.186	39	48.181	2	4.135	44	0.075
80	290.017	38	45.593	3	3.889	45	0.067
79	279.278	37	43.508	4	3.513	46	0.060
78	268.806	36	41.322	5	3.238	47	0.054
77	258.827	35	39.286	6	2.984	48	0.048
76	248.840	34	37.229	7	2.751	49	0.043
75	239.351	33	35.317	8	2.537	50	0.038
74	230.142	32	33.490	9	2.339	51	0.034
73	221.212	31	31.744	10	2.156	52	0.030
72	212.648	30	30.078	11	1.96	53	0.027
71	204.286	29	28.488	12	1.80	54	0.024
70	196.213	28	26.970	13	1.65	55	0.021
69	188.429	27	25.524	14	1.51	56	0.019
68	180.855	26	24.143	15	1.38	57	0.017
67	173.575	25	22.830	16	1.27	58	0.015
66	166.507	24	21.578	17	1.15	59	0.013
65	159.654	23	20.386	18	1.05	60	0.011
64	153.103	22	19.252	19	0.96	65	0.0064
63	146.771	21	18.191	20	0.88	70	0.0033
62	140.659	20	17.148	21	0.80	75	0.0013
61	134.684	19	16.172	22	0.73	80	0.0006
60	129.020	18	15.246	23	0.66	85	0.00025
59	123.495	17	14.367	24	0.60	90	0.0001

Teor de água no ar com diferentes pontos de orvalho.

6.4 COMPILAÇÃO DE NORMAS E REGULAMENTOS APLICÁVEIS

6.4.1 Geral

No setor de ar comprimido, como em muitos outros setores industriais, são aplicáveis regulamentos. Eles podem incluir exigências definidas pela legislação, bem como regulamentos ou recomendações opcionais, como também por normas nacionais e internacionais.

Às vezes, os regulamentos em normas podem tornar-se obrigatórios quando entram em vigor através da legislação. Se uma norma é citada em um contrato comercial, ela também pode se tornar obrigatória. Os regulamentos obrigatórios podem ser aplicados, por exemplo, à segurança de pessoas e bens, enquanto que os padrões opcionais são usados para facilitar o trabalho com especificações, seleção de qualidade, execução e geração de relatórios, desenhos de fabricação, etc.

6.4.2 Normas

Os benefícios da padronização internacional são óbvios para fabricantes e partes intermediárias, tais como empresas de engenharia e clientes finais. Os produtos e sistemas tornam-se mais intercambiáveis e permite comparar as declarações de desempenho em termos análogos. Essas declarações de desempenho podem incluir aspectos operacionais, ambientais e de segurança.

As normas são referidas frequentemente pelos legisladores como uma maneira de criar impactos uniformes no mercado. As normas podem ser produzidas, emitidas e mantidas por organizações de padronização nos níveis nacional, supranacional (europeu) e internacional, mas igualmente por associações comerciais com foco em setores industriais específicos (indústria de petróleo, indústria de ar comprimido, indústria de eletrônicos etc.).

As normas produzidas pela Organização Internacional de Normalização (ISO) podem ser con-

vertidas em normas nacionais pelos países membros da ISO, a seu critério. As normas produzidas pelo CEN (Comitê Europeu de Padronização) são desenvolvidas para uso por 30 membros nacionais, e a conversão em norma nacional pode ser obrigatória no caso de normas harmonizadas.

Todas as normas podem ser adquiridas através das várias organizações nacionais de normatização.

Na indústria de ar comprimido, normas também podem ser produzidas por associações comerciais como o PNEUROP (comitê europeu de fabricantes de equipamentos de ar comprimido, bombas de vácuo, ferramentas pneumáticas e equipamentos afins) ou o seu equivalente CAGI (Instituto de Ar e Gás Comprimido dos Estados Unidos). Exemplos de tais documentos são as normas de medição de desempenho para capacidade de compressores, teor de óleo no ar comprimido, etc., que foram emitidas enquanto aguardavam que uma norma internacional fosse desenvolvida.

6.4.3 Compilação

A seguir, é apresentada uma lista que não abrange todos os padrões atuais (2010) na indústria de ar comprimido. As referências listadas são europeias e americanas.

As propostas padrão PNEUROP são geralmente emitidas em paralelo com publicação da CAGI para o mercado americano.

Recomenda-se verificar com o organismo emissor se a edição mais recente está sendo usada, a menos que o requisito/demandado do mercado específico se refira a uma publicação datada.

6.4.3.1 Segurança de máquinas

Diretiva da UE Máquinas 2006/42/EC, referente às seguintes normas:

EN 1012-1 Compressores e bombas de vácuo - Requisitos de segurança.

EN ISO 12100-1: 2003 AMD 1 2009, Segurança de máquinas - Conceitos básicos, Princípios gerais de projeto - Parte 1: Terminologia Básica, Metodologia.

EN ISO 12100-2: 2003 AMD 1 2009, Segurança de máquinas - Conceitos básicos, Princípios gerais de projeto - Parte 2: Princípios Técnicos.

6.4.3.2 Segurança em equipamentos sob pressão

Diretiva da UE 87/404 / EC, Vasos de pressão simples.

Diretiva da UE 97/23 / EC, Equipamentos sob pressão, com referência aos seguintes padrões:

EN 764-1 a 7, Equipamentos sob pressão.

EN 286-1 a 4, Vasos de pressão simples, não submetidos à chama, projetados para conter ar ou nitrogênio.

6.4.3.3 Meio ambiente

Diretiva da UEE 2000/14 / CE, Emissão de Ruído Externo, referente às seguintes normas:

EN ISO 3744: 2009, Determinação da potência sonora de níveis de fonte de ruído usando a pressão sonora - método de engenharia.

EN ISO 2151: 2004, Código de teste de ruído para compressores e bombas de vácuo - método de engenharia.

Diretiva da UE 2004/26 / EC, Norma de emissão de gases para motores não rodoviários - Níveis da Fase III implementados de 2006 a 2013, estágio IV a partir de 2014.

Padrão de Emissão Federal dos EUA para motores não rodoviários - Categorias de nível III implantadas a partir de 2006 até 2008, Categorias de nível IV entre 2008 e 2015.

6.4.3.4 Segurança elétrica

Diretiva da UE 2004/108/EC, Compatibilidade Eletromagnética, referente às seguintes normas:

EN 61000-6-2: 2005, Norma de Compatibilidade de Eletromagnética (EMC) - PARTE 6-2: Normas Genéricas - Imunidade para Ambientes Industriais.

EN 61000-6-4: 2006, Norma de Compatibilidade de Eletromagnética (EMC) - PARTE 6-4: Normas Genéricas - Normas de Emissão para Ambientes Industriais.

Diretiva da UE 2006/95 / EC, Equipamento de Baixa Tensão, referente às seguintes normas:

EN 60034- Parte 1 a 30, Máquinas Elétricas Rotativas - Classificação e Desempenho.

EN 60204-1: 2009, Norma de Segurança de Máquinas - Equipamento Elétrico de Máquinas - Parte 1: Requisitos Gerais.

EN 60439-1: 2004, Conjuntos com Comutadores de Baixa Tensão e com Controle de Manobra por Engrenagens - Parte 1: Conjuntos acionados com testes de tipo e com testes de tipo parciais.

6.4.3.5 Dispositivos médicos – geral

Diretiva 93/42 /CE da UE, referente às seguintes normas:

EN ISO 13485: 2000, Sistema de Tubos de Plástico - método de teste para estanqueidade sob pressão interna.

EN ISO 14971: 2007, Dispositivos Médicos - Aplicação de gerenciamento de riscos a Dispositivos Médicos.

6.4.3.6 Padronização

ISO 3857-1: 1977, Compressores, ferramentas e máquinas pneumáticas - Vocabulário - Parte 1: Geral.

ISO 3857-2: 1977, Compressores, ferramentas e máquinas pneumáticas - Vocabulário - Parte 2: Compressores.

ISO 5390: 1977, Compressores – Classificação.

6.4.3.7 Especificações e Testes

ISO 1217: 2009, Compressores de deslocamento - Testes de aceitação.

ISO 5389: 2005, Turbocompressores - Código de teste de desempenho.

ISO 7183: 2007, Secadores de ar comprimido - especificações e testes.

ISO 12500: 2007-Parte 1 a 3, Filtros para Ar Comprimido - Métodos de Teste.

ISO 8573-Parte 1 a 9, Ar Comprimido - Contaminantes e classes de pureza - Métodos de Teste.

ÍNDICE

A

absorção	2.4.1
absorção sonora	3.8.8
adsorção	2.4.1
alívio / carga	2.5.1
alívio de pressão	2.5.2.1, 2.5.3.4
alívio de pressão com entrada acelerada	2.5.2.4
alocação de custos	4.1.1.1, 4.3.2
alta tensão	1.6.1
amortecimento de som	3.8.8
análise operacional	3.1.1.3
ar	1.4
ar de admissão	3.5.4
ar medicinal	3.2.9
ar úmido	1.4.2

B

baixa tensão	1.6.1
bocal	1.3.5
bombas de vácuo	2.3.1

C

cabos	3.7.6
cálculo do compressor	4.3.2
capacidade térmica	1.2.3
carga em várias estágios	2.5.2.8
carregando	2.5.1
carvão ativado	3.2.9
central de ar comprimido	3.5.1, 3.5.2, 3.5.3
classe de isolamento	1.6.5.3
classe de qualidade de acordo com a ISO	3.2.2
classes de proteção	1.6.5.4
compensação de fase	3.7.7
composição do ar	1.4.1
compressão em vários estágios	1.5.5
compressor central	3.1.2, 3.5
compressor de alta pressão	3.6.1.1
compressor de dentes	2.1.6
compressor de simples efeito	1.5.2, 2.1.2
compressor resfriado a água	3.3.1
compressor resfriado a ar	3.3.2
compressores auxiliares	2.3.2
compressores axiais	2.2.3
compressores centrífugos	2.2.2
compressores de deslocamento	1.5.2, 2.1.1

compressores de diafragma	2.1.4
compressores de duplo efeito	1.5.2, 2.1.2
compressores de palhetas	2.1.8
compressores de parafuso	2.1.5
compressores de parafuso duplo	2.1.5
compressores de parafuso isentos de óleo	2.1.5.1
compressores de parafusos com injeção de líquido	2.1.5.2
compressores de pistão	1.5.1, 1.5.2, 2.1.2
compressores dinâmicos	1.5.4., 2.2.1
compressores isentos de óleo	2.1.3
compressores móveis	2.6
compressores radiais	2.1.1, 2.2.2
compressores scroll	2.1.7
comprimento equivalente do tubo	3.6.3
condutividade	1.3.3
conexão em estrela	1.6.3, 1.6.5.7
conexão triângulo	1.6.5.7
constante da sala	3.8.3
constante de gás	1.3.2
constante de gás individual	1.3.2
consumo de ar	1.1.2, 4.2.3
contator	3.7.3
controle central	2.5.7
controle da temperatura do óleo	2.6.3
controle de sequência	2.5.6.1
controle e monitoramento	2.5.4
convecção	1.3.3
conversor de frequência	2.5.4.3
corrente alternada	1.6.1
corrente elétrica	1.6.1
custo do ciclo de vida, LCC	4.3
custo total	4.3.2
custos de manutenção	4.2.7
custos operacionais	4.1.1.1, 4.1.1.2

D

decibel	3.8.1
descarga da válvula	2.5.2.8
descarga da válvula de sucção	2.5.2.8
deslocamento de fase	1.6.2
diferença logarítmica de temperatura	
média	1.3.3
dimensionamento	3.1.3, 3.1.5.1
disjuntor	3.7.5
distribuição de ar comprimido	3.6.1

E

economia geral da instalação	4.1.1.1
efeito Joule-Thomson	1.3.7

eficiência de separação	2.4.2	M	
eficiência do filtro	2.4.2	medição de pressão	1.2.1, 2.5.5.2
eletricidade	1.6	medição de temperatura	2.5.5.1
elétrons	1.1.1	medição de vazão parcial	3.6.4
emissões de escape	2.6.2	medições de som	3.8.6
escala Celsius	1.2.2	métodos de resfriamento	1.6.5.5, 3.3
escala Kelvin	1.2.2	microrganismos	3.2.4
escoamento através de tubos	1.3.6	modulação	2.5.3.4
estrangulamento de fluxo	1.3.7	moléculas	1.1.1
estrangulando a entrada	2.5.2.3	monitoramento	2.5.5.3, 2.5.8
exigência de ar	3.1.1.2	monitoramento de dados	2.5.5
		monitoramento remoto	2.5.8
		motor elétrico	1.6.5
		movimento molecular	1.1.2
		mudanças de estado	1.3.4
F			
FAD	1.2.6	N	
faixa de pressão	2.5.4.2	nêutrons	1.1.1
Fator de Potência	1.6.4	nível de potência sonora	3.8.1
filtro	2.4.2, 3.2.5	nível de pressão sonora	3.8.1
filtro de carvão	2.4.2, 3.2.5	normas	6.4
filtro de diafragma	3.2.8	novo investimento	4.1.1.1
filtro de óleo	3.2.5	número atômico	1.1.1
filtro de partículas	2.4.2	número de condutividade térmica	1.3.3
filtros bacteriológico	3.2.5	número de Reynolds	1.3.6
fluxo laminar	1.3.6		
fluxo turbulento	1.3.6		
força eletromotriz (fem)	1.6.2		
formas de onda não senoidais	1.6.1		
frequência	1.6.1		
fusíveis	3.7.5		
G			
grau de recuperação	3.4.2, 4.2.6	O	
		operações otimizadas do compressor	4.1.1.1
I			
impedância	1.6.2	P	
iniciador	3.7.3, 3.7.5	pacote de compressor	3.5.1
iniciar o seletor de sequência	2.5.6.1	partida direta	3.7.3
início gradual	3.7.3	partida em estrela/triângulo	3.7.3
instalação centralizada	3.1.2.2	planejamento de manutenção	4.2.7.1
instalações descentralizadas	3.1.2.3	plasma	1.1.2
intensificador de pressão	2.3.3	ponto de orvalho	1.4.2
ISO	6.4	ponto de orvalho da pressão	2.4.1
		porta de descarga variável	2.5.2.7
		possibilidades de economia	4.2
		potência	1.2.5, 1.6.4
		potência aparente	1.6.4
		potência ativa	1.6.4
		potência reativa	1.6.4
		potencial de recuperação	3.4.2, 4.2.6
		pré-filtro	3.5.4
		pressão	1.2.1
		pressão absoluta	1.2.1
		pressão atmosférica	1.2.1
		pressão de trabalho	3.1.1.1
L			
lei de Boyle	1.3.2		
lei de Charles	1.3.2		
lei de Ohm	1.6.2		
leis dos gases	1.3.2		
litro normal	1.2.6		

pressostato	2.5.4.2	sistema de medição capacitiva	2.5.5.2
processo isentrópico	1.3.4.4	sistema de medição resistiva	2.5.5.2
processo isobárico	1.3.4.2	sistema de regulagem	2.5.1
processo isocórico	1.3.4.1	sistema de resfriamento aberto	3.3.1.2, 3.3.1.3
processo isotérmico	1.3.4.3	sistema de resfriamento fechado	3.3.1.4
processo politrópico	1.3.4.5	sistema SI	6.1
proteção contra curto-circuito	3.7.5	sistema trifásico	1.6.3
proteção contra sobrecarga	3.7.5	sobre compressão	2.4.1.3
prótons	1.1.1	som	3.8
		sopradores roots	2.1.9

Q

quadros	6.3
qualidade do ar comprimido	3.2.2
quantidade de ar de ventilação	3.5.5
queda de pressão	1.3.6, 4.2.2

R

radiação	1.1.1
reatância	1.6.2
recuperação de energia	3.4
recuperação de energia a partir da água	3.4.3.3
recuperação de energia aérea	3.4.3.2
regra	2.5.1
regulagem contínua da capacidade	2.5.1
regulagem de entrada	2.5.3.1
regulagem de palheta	2.5.3.2, 2.5.3.3
regulagem de saída	2.5.3.2
regulagem de velocidade	2.5.2.6, 2.5.4.3
regulagem partida parada	2.5.2.5
regulamento de bypass	2.5.2.2
relação de pressão	1.5.2
relação de pressão crítica	1.3.5
relação de volume baixo	1.2.6
reservatório de ar	3.6.1.1
refriador posterior	2.4.1.1, 3.2.6
resistência	1.6.2
resistor de metal	2.5.1
ressonância do tubo	3.5.4
reverberação	3.8.4
ruído	3.8.9

S

secador de refrigeração	2.4.1.2
Secador MD	2.4.1.5
secadores de membrana	2.4.1.6
secadores por absorção	2.4.1.4
secadores por adsorção	2.4.1.5
secagem	2.4.1
separação de óleo/água	3.2.8
separador de água	2.4.1.1
símbolos de desenho	6.2

T

temperatura	1.2.2
tempo de inatividade	2.5.4.2
tensão de fase	1.6.3
tensão elétrica	1.6.1
tensão principal	1.6.3
teor de água no ar comprimido	2.4.1, 3.2.2
termistor	2.5.5.1
termodinâmica	1.3
termômetro de resistência	2.5.5.1
tipos de compressores	1.5
torque	1.6.5.8
trabalho	1.2.4
transferência de calor	1.3.3
tratamento do ar	3.2
trocador de calor	5.7.1, 5.7
tubos	1.3.3
tubulação em anel	3.6.2
turbo compressor	2.2.1

V

vapor de água	3.2.2
variação da pressão de admissão	3.1.3.2
vazamento	3.1.1.3, 4.2.3
velocidade síncrona	1.6.5.1
ventilador de ventilação	3.5.5
volume de folga	1.5.3
volume do curso	1.5.3

Z

zero absoluto	1.2.2
---------------	-------

NOTAS

