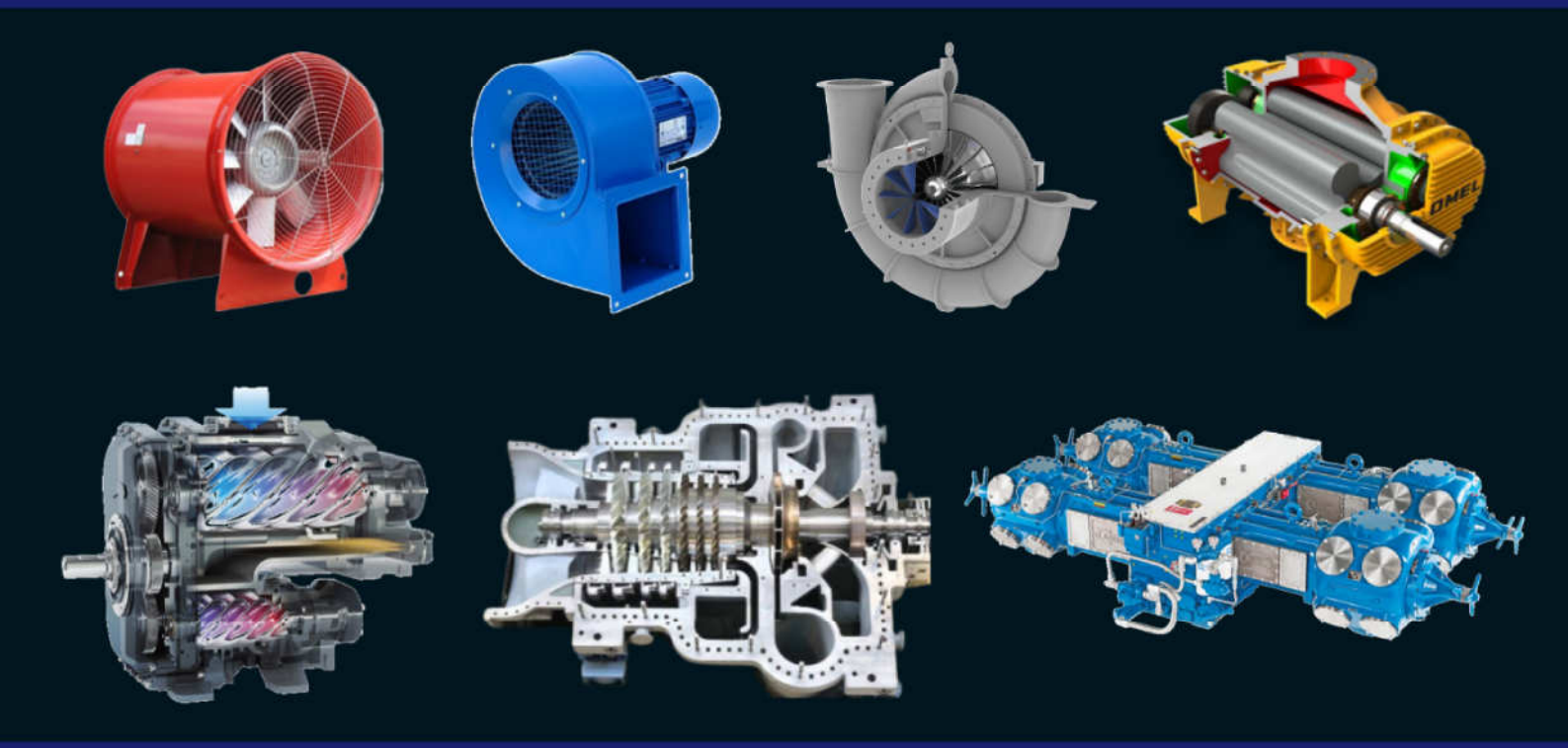
ENGENHARIA & CIA
EDUCACIONAL

Pós Graduação Lato Sensu

Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais



Ventiladores, Compressores e Sopradores

Tipos, Aplicações e Dimensionamento

Micelli R. Camargo

Ventiladores, Compressores e Sopradores

Tipos, Aplicações e Dimensionamento

Micelli Rodrigues Camargo

São Paulo, 05 de setembro de 2026

Direitos autorais e edição

© 2026 Micelli Rodrigues Camargo. 1ª edição. São Paulo, Brasil.

Editor/Selo: Edição do Autor (Micelli Camargo) • Engenharia & Cia – Publicações Técnicas.

Esse material foi elaborado para apoio aos alunos da Pós-Graduação Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução por quaisquer meios sem autorização do detentor dos direitos, exceto nos casos previstos em lei.

[reservado para dados de registro]

Créditos

- ✓ Capa e projeto gráfico: Micelli R. Camargo
- ✓ Revisão técnica: Micelli R. Camargo
- ✓ Diagramação: Micelli R. Camargo

Índice:

APRESENTAÇÃO 15
ORGANIZAÇÃO DA PÓS-GRADUAÇÃO 16
APOIO INSTITUCIONAL 17
OBJETIVOS 18
1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS 19
1.1. Introdução 19
1.2. Propriedades dos Fluidos 19
1.2.1. Conceito Técnico de Fluido e Os Estados da Matéria 19
1.2.2. Princípio da Aderência (Condição de Não Deslizamento) 19
1.2.3. A Experiência Das Duas Placas E A Lei De Newton 20
1.2.4. Massa Específica, Peso Específico 20
1.2.5. Gravidade Específica 21
1.2.6. Viscosidade Dinâmica E Viscosidade Cinemática 21
1.2.6.1. Exemplo: Conversão de unidade de viscosidade 22
1.3. Estática dos Fluidos 22
1.3.1. Pressão E Unidades 22
1.3.2. Pressão Absoluta, Atmosférica E Efetiva 22
1.3.2.1. Exemplo: Conversão entre escalas de pressão 23
1.3.3. Princípio de Stevin e Carga de Pressão 23
1.3.3.1. Exemplo: pressão no fundo de um reservatório 24
1.4. Cinemática dos Fluidos 24
1.4.1. Vazão Volumétrica e Vazão Mássica 24
1.4.1.1. Exemplo: Vazão a Partir de V e D 25
1.4.2. Velocidade Média e Perfil de Velocidades 25
1.4.3. Regimes de Escoamento e Número ee Reynolds 25
1.4.3.1. Exemplo: Cálculo do número de Reynolds 26
1.4.4. Equação Da Continuidade 26
1.4.4.1. Exemplo: efeito da redução de diâmetro 26
1.4.5. Escoamentos em Regime Permanente e Não-Permanente 26
2. PROPRIEDADES DOS GASES E DO AR ATMOSFÉRICO 28
2.1. Introdução 28
2.2. Composição do Ar Atmosférico 28
2.3. Comportamento dos Gases 29
2.3.1. Compressibilidade 29
2.3.2. Elasticidade 29

2.3.3. Difusibilidade 29
2.3.4. Expansibilidade 30
2.4. Temperatura Absoluta 30
2.5. Propriedades dos Gases 31
2.5.1. Massa 31
2.5.2. Massa Específica e Volume Específico 31
2.6. Viscosidade de Gases 32
2.7. Calores Específicos e o Expoente Isentrópico 32
2.8. Equação de Estado dos Gases Ideais 32
2.8.1. As Leis Particulares 32
2.8.2. A Lei Geral e As Duas Formas de Escrevê-La 33
2.8.3. A Forma Combinada e Por Que Ela É A Mais Usada 34
2.8.3.1. Exemplo 2.1: Conversão de vazão normal para vazão real de sucção 34
2.9. Gás Real e o Fator de Compressibilidade 34
2.10. Misturas de Gases 35
2.11. Condições de Referência e Unidades de Vazão 35
2.11.1. Estado Normal e Estado Padrão 36
2.11.2. As Siglas e O Que Cada Uma Mede 36
2.11.3. Referências Padronizadas ou de Referências 36
2.11.4. Conversão Entre Referências 37
2.11.4.1. Exemplo 2.2: Vazão Normal e Vazão de Ar Livre (FAD) 38
2.12. Ar Úmido 38
2.12.1. Umidade Relativa e Umidade Absoluta 38
2.12.2. Ponto de Orvalho 39
2.12.2.1. Ponto de Orvalho versus Umidade Relativa 39
2.12.3. Consequência Operacional 40
2.13. Velocidade Do Som e O Número De Mach 41
3. ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL E TERMODINÂMICA DA COMPRESSÃO 42
3.1. Introdução 42
3.2. Incompressível ou Compressível? 42
3.3. Escoamento de Gás em Tubulações 43
3.4. Escoamento Através de Restrição e Escoamento Crítico 43
3.5. Estrangulamento e Efeito Joule-Thomson 43
3.6. Os Cinco Processos de Mudança de Estado 44
3.6.1. Compressão Isotérmica 44
3.6.2. Compressão Isentrópica 44

3.6.3. Compressão Politrópica 45
3.7. Trabalho e Potência de Compressão 45
3.7.1. Compressão Isotérmica 45
3.7.2. Compressão Isentrópica 45
3.8. Relação de Compressão e Temperatura de Descarga 46
3.8.1. Exemplo 3.1: Temperatura de Descarga Em Compressão de Um Estágio 46
3.9. Compressão Multiestágio e Interresfriamento 46
3.9.1. Exemplo 3.2: O Mesmo Serviço em Dois Estágios 47
3.10. Eficiências 47
3.10.1. Eficiência Isotérmica 47
3.10.2. Eficiência Isentrópica 47
3.10.3. Eficiência Politrópica 48
3.10.4. Eficiência Volumétrica 48
3.10.5. Eficiência Mecânica e Potências 48
4. VENTILADORES 49
4.1. Por Que O Ventilador Abre O Bloco Das Máquinas 49
4.2. As Três Pressões Do Ventilador 49
4.3. Ventiladores Axiais 50
4.3.1. A Curva Do Ventilador Axial e A Região De Stall 50
4.3.2. Curva Do Sistema e O Ponto De Operação 51
4.3.3. Campo Básico de Funcionamento 52
4.3.4. Controle e Aplicações 53
4.4. Ventiladores Centrífugos 53
4.4.1. Pá Curvada Para Trás - O Padrão Industrial 54
4.4.2. Pá Radial: A Máquina de Serviço Pesado 55
4.4.3. Pá Curvada Para Frente: O Sirocco 55
4.4.4. Os três formatos lado a lado 58
4.5. Leis de Afinidade 58
4.5.1. Exemplo 4.1: Redução de rotação por Inversor de Frequência 59
4.6. O Ventilador e a Massa Específica do Gás 59
4.6.1. Exemplo 4.2: Ventilador em Altitude Com Ar Quente 59
4.7. Controle de Vazão 60
5. COMPRESSORES 61
5.1. Introdução 61
5.2. O Mapa de Aplicações 61
5.3. Compressor Alternativo de Pistão 62

5.3.1. Introdução 62
5.3.2. Principais Componentes 63
5.3.3. Funcionamento 64
5.3.4. Área De Trabalho 65
5.4. Compressores De Processo e De Alta Pressão 65
5.4.1. Principais Componentes 65
5.4.2. Características Operacionais 66
5.4.3. Controle De Capacidade 67
5.4.4. Pontos Críticos De Operação e Manutenção 67
5.4.5. Aplicações 68
5.5. Compressor de Parafusos 68
5.5.1. Funcionamento 68
5.5.2. Principais Componentes 69
5.5.3. Características Operacionais 70
5.5.4. Injeção De Óleo: Três Funções Em Uma 70
5.5.5. Compressor De Parafusos Isento De Óleo 72
5.5.6. Carga Parcial: Onde O Dinheiro Escapa 73
5.5.7. Pontos Críticos De Operação E Manutenção 73
5.5.8. Aplicações 74
5.6. Compressor de Palhetas 75
5.6.1. Introdução 75
5.6.2. Principais Componentes 75
5.6.3. Princípio De Funcionamento 76
5.6.4. Características Operacionais 76
5.6.5. Pontos Críticos De Operação E Manutenção 77
5.6.6. Aplicações 77
5.7. Compressor Centrífugo 77
5.7.1. Funcionamento 78
5.7.2. Principais Componentes 78
5.7.3. Mapa De Desempenho Ou Curvas Características 79
5.7.4. Surge: O Limite Esquerdo 80
5.7.5. Choke ou Stonewall: O Limite Direito 80
5.7.6. Leis Da Afinidade: Agora Só Aproximada 81
5.7.7. Controle De Capacidade: Pás-Guia, Rotação E Reciclo 81
5.7.8. Pontos Críticos De Operação e Manutenção 81
5.7.9. Aplicações 82

5.8. Compressor Axial 82
5.8.1. Introdução 82
5.8.2. Principais Componentes 83
5.8.3. Princípio De Funcionamento 83
5.8.4. Mapa De Desempenho Ou Curvas Características 83
5.8.5. Características Operacionais 84
5.8.6. Pontos Críticos De Operação E Manutenção 84
5.8.7. Aplicações 85
5.9. Outros Tipos de Compressores 85
5.9.1. Scroll 85
5.9.2. Dentes (tooth) 86
5.9.3. Diafragma 86
6. SOPRADORES 87
6.1. A Família Do Meio 87
6.2. Soprador Roots 87
6.2.1. Introdução 87
6.2.2. Princípio De Funcionamento 88
6.2.3. Principais Componentes 89
6.2.4. A Curva Característica Do Roots E O Limite Térmico 90
6.2.5. Características Operacionais 91
6.2.6. Pontos Críticos De Operação E Manutenção 91
6.3. Soprador De Parafuso 92
6.3.1. Introdução 92
6.3.2. Principais Componentes 93
6.3.3. Características Operacionais 93
6.3.4. Pontos Críticos De Operação E Manutenção 93
6.4. Soprador Turbo De Alta Rotação 94
6.4.1. Introdução 94
6.4.2. Principais Componentes 94
6.4.3. Características Operacionais 95
6.4.4. Curvas Características 95
6.4.5. Pontos Críticos De Operação E Manutenção 96
6.5. Soprador Centrífugo Multiestágio 96
6.5.1. Introdução 96
6.5.2. Principais Componentes 96
6.5.3. Características Operacionais 97

6.5.4. Curvas Características 97
6.5.5. Pontos Críticos De Operação E Manutenção 98
6.6. Soprador De Canal Lateral 98
6.6.1. Introdução 98
6.6.2. Principais Componentes 99
6.6.3. Características Operacionais 99
6.6.4. Pontos Críticos De Operação E Manutenção 100
6.7. Aplicações dos Sopradores 100
6.8. Quadro Comparativo Dos Sopradores 102
7. ACESSÓRIOS PARA GÁS E AR COMPRIMIDO 102
7.1. Introdução 102
7.2. A Cadeia De Tratamento 103
7.3. Reservatórios 103
7.4. Resfriador Posterior 104
7.5. Drenagem Do Condensado 106
7.5.1. Dreno Manual 106
7.5.2. Dreno Eletrônico Temporizado: 107
7.5.3. Dreno Com Sensor De Nível 107
7.6. Separador de Condensado 108
7.7. Secadores de Ar 108
7.7.1. Secador Por Absorção 109
7.7.2. Secador Por Adsorção 109
7.7.3. Secador Por Refrigeração 110
7.7.4. Secador Por Membrana 111
7.7.5. Comparativo Dos Secadores 112
7.7.6. O Secador Integrado Em Compressores 112
7.8. Filtros 113
7.8.1. Pré-filtro para uso geral (Grau B, P, R) 113
7.8.2. Filtros De Remoção De Óleo (Grau M, S) 113
7.8.3. Elementos Filtrantes De Carvão Ativado (Grau A, A^2) 113
7.8.4. Elementos Filtrantes Catalisadores (Grau H^2) 114
7.8.5. Elementos Filtrantes De Peneira Molecular (Grau MS^2) 114
7.8.6. Elementos Filtrantes Estéreis 114
7.8.7. O Filtro Coalescente Na Prática 114
7.9. Qualidade Do Ar Conforme A ISO 8573-1 115
7.9.1. Classes de Partículas Sólidas 115

7.9.2. Classes De Umidade e Água Líquida ... 115
7.9.3. Classes De Óleo Total ... 116
7.9.4. Qualidade Recomendada Por Aplicação ... 116
7.9.5. Boas Práticas De Traçado ... 117
8. DIMENSIONAMENTO DE VENTILADOR INDUSTRIAL ... 119
8.1. O Que Torna O Ventilador Diferente ... 119
8.2. Classificação e Faixa De Aplicação ... 119
8.3. As Pressões em Um Sistema com Ventilador ... 120
8.3.1. Pressão Dinâmica (FDP) ... 120
8.3.2. Pressão Total Do Ventilador (FTP) ... 120
8.3.3. Pressão Estática Do Ventilador (FSP) ... 120
8.4. Equação da Energia na Forma de Pressão ... 120
8.5. Perda De Carga Na Rede De Dutos ... 121
8.5.1. A Pressão Dinâmica (p_{din}) Como Moeda De Troca ... 121
8.5.2. Perda De Carga Distribuída Nos Trechos Retos ... 121
8.5.3. Perdas De Carga Singulares Ou Localizadas ... 122
8.5.4. Exemplo: Um Trecho Com Dois Acessórios ... 123
8.6. Duto De Seção Não Circular ... 124
8.6.1. Raio Hidráulico (R_H) ... 124
8.6.2. Diâmetro Hidráulico (D_H) ... 124
8.6.3. Diâmetro Equivalente (D_{eq}) ... 124
8.7. Curvas do Ventilador, do Sistema e o Ponto De Operação ... 125
8.7.1. Como A Curva Do Ventilador É Levantada? ... 125
8.7.2. A Região Proibida Da Curva ... 126
8.7.3. O Conflito Entre Rendimento E Estabilidade ... 126
8.8. Efeitos De Instalação ... 126
8.8.1. A Regra dos 6 Diâmetros Na Entrada e 3 Na Saída ... 127
8.8.2. Acessórios Que Devolvem Pressão: Bocal De Entrada E Cone De Saída ... 127
8.9. Cadeia De Potência ... 128
8.9.1. Potência Do Ar (Ap) ... 128
8.9.2. Potência De Freio (Bp) ... 128
8.9.3. Potência De Eixo (Sp) ... 128
8.9.4. Potência Nominal Do Motor (rp) ... 129
8.9.5. Correção De Densidade ... 129
8.9.5.1. Exemplo: Ventilador De Gás Quente Em Altitude (SI) ... 129
8.10. Roteiro de Dimensionamento ... 131

8.11. Especificação Completa Do Ventilador 131
8.12. Exercício Resolvido: Rede De Exaustão Localizada 132
8.12.1. Determinando Os Diâmetros 133
8.12.2. Velocidade Real 133
8.12.3. Pressão Dinâmica 134
8.12.4. Número de Reynolds 134
8.12.5. Fator De Atrito 134
8.12.6. Perda De Carga Distribuída 134
8.12.7. Perda De Carga Nas Singularidades 135
8.12.8. Perda De Carga Por Trecho 135
8.12.9. Balanceamento Dos Ramais 135
8.12.10. Determinando A Pressão Do Ventilador 136
8.12.11. Selecionando Um Ventilador 136
8.12.12. Calculando A Potência 137
8.12.13. Resumindo 138
9. DIMENSIONAMENTO DE COMPRESSORES E SEUS PERIFÉRICOS 139
9.1. Estabelecendo a Capacidade do Compressor 139
9.1.1. Fator de serviço ou Fator de Uso (Fu) 139
9.1.2. Fator De Simultaneidade (F_S) 140
9.1.3. Expansão 141
9.1.4. Vazamento 141
9.1.5. Consumo Intermitente 142
9.1.6. Encontrando a Vazão de Ar Comprimido 142
9.2. Determinar os Demais Periféricos 143
9.3. Determinando a Pressão do Compressor 143
9.3.1. Cálculo de Perda de Carga 144
9.3.1.1. Perda de Carga Distribuída 145
9.3.1.2. Perda de Carga Localizada, Pontual ou Acidental 146
9.4. Escolha do Diâmetro 147
9.5. Determinação da Quantidade de Compressores 148
9.6. Especificando os Secadores de Ar 149
9.6.1. Correção da Vazão 150
9.7. Especificando os Filtros 150
9.7.1. Correção da Vazão 150
9.8. Dimensionando o Reservatório de Ar 151
9.9. Exercício Resolvido 151

9.9.1. Levantamento de dados 152
9.9.2. Determinando A Vazão De Ar Necessária 153
9.9.3. Determinando O Diâmetro Da Rede 154
9.9.3.1. Critérios adotados 154
9.9.3.2. Como a vazão se reparte 154
9.9.3.3. Pré-dimensionamento pela velocidade 155
9.9.4. Calculando As Perdas De Carga Distribuída e Localizada 155
9.9.5. Perda De Carga Nos Periféricos 156
9.9.6. Determinando A Pressão Do Compressor 157
9.10. Selecionando o Compressor 157
9.11. Selecionando O Secador 158
9.12. Selecionando Os Filtros 158
9.13. Dimensionando o Reservatório 158
9.13.1. Regra Prática 159
9.13.2. Por Demanda De Pico 159
10. DIMENSIONAMENTO DE SOPRADORES 161
10.1. O Que Muda em Relação ao Compressor 161
10.2. O Serviço: Pressão De Descarga E Perda De Carga 161
10.2.1. Composição Da Pressão De Descarga 161
10.2.2. Perda De Carga: As Mesmas Equações, Dois Ajustes 162
10.3. Cálculo De Potência 163
10.3.1. A Parcela De Compressão 163
10.3.2. A Parcela De Atrito 163
10.4. Seleção e Verificações por Tecnologia 164
10.4.1. Onde Se Seleciona: Tabela Ou Curva 164
10.4.2. Soprador de Lóbulos 164
10.4.2.1. Escorregamento (Slip): 164
10.4.2.2. Temperatura: 165
10.4.3. Soprador de Parafusos 166
10.4.4. Sopradores Dinâmicos 166
10.4.5. Soprador Roots, Parafusos ou Turbo: A Mesma Aplicação, Três Máquinas 167
10.5. Aeração de Efluentes 168
10.5.1. Por Que É a Maior Aplicação Mundial? 168
10.5.2. As Duas Grandezas Que Governam O Problema 168
10.5.3. As Duas Interfaces Do Projeto 169
10.5.4. A Parcela de Processo da Aeração 169

10.6. Periféricos Obrigatórios Da Instalação, Típicos Do Deslocamento Positivo 170
10.7. Erros Comuns E Verificação Final 170
10.8. Roteiro de Dimensionamento 171
10.9. Exercício Resolvido: Soprador para Aeração de ETE 171
10.9.1. Dados de processo 171
10.9.2. Condições Do Local 171
10.9.3. Instalação Existente 171
10.9.4. Vazão Real De Admissão 172
10.9.5. Estimativa Inicial da Pressão de Descarga 173
10.9.6. Condição do Ar no Tubo de Descarga 173
10.9.7. Determinando o Diâmetro da Rede de Ar 173
10.9.8. Perda de Carga da Rede de Ar 174
10.9.9. Verificação Com A Pressão Calculada 175
10.9.10. Selecionando O Soprador 175
10.9.11. Calculando a Potência 177
10.9.12. Verificação Térmica 178
10.9.13. Síntese 178
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 179
11.1. Livros e Manuais Técnicos 179
11.2. Normas E Práticas Recomendadas 180
11.3. Catálogos E Publicações De Fabricantes 180
11.4. Materiais Didáticos E Fontes De Figuras 182
12. ANEXOS 183
12.1. Pressão Atmosférica em Função da Altitude 183
12.2. Propriedades do Ar Atmosférico 183
12.3. Diâmetros interno do tubo de aço 184
12.4. Perda De Carga Distribuída (Sistema Inglês) 184
12.4.1. Bitolas de 1/2" a 3" 184
12.4.2. Bitolas de 3.1/2" a 12" 186
12.5. Perda De Carga Distribuída (Sistema Métrico) 188
12.5.1. Bitolas de 1/2" a 2.1/2" 188
12.5.2. Bitolas de 3" a 12" 189
12.6. Comprimento Equivalente De Conexões 189
12.7. Fator De Utilização (f_u)Típico Por Consumidor 190
12.8. Fator De Simultaneidade (f_s) 191
12.9. Vazamento de Ar Comprimido 192

12.9.1. De onde vêm os números 192
12.9.2. O coeficiente de descarga 192
12.9.3. Vazão de ar livre em [L/s] para 2 a 7 [bar] 193
12.9.4. Vazão de ar livre em [l/s] para 8 a 30 [bar] 194
12.9.5. Vazão de ar livre em [PCM] para 30 a 100 [PSI] 195
12.9.6. Vazão de ar livre em [PCM] para 116 a 434 [PSI] 195
12.10. Fatores De Correção De Densidade Do Ar 196

Sobre o Autor e Coordenador do Curso



🎓 Formação Acadêmica

Micelli Camargo é Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Mestre em Ciências pela Universidade de São Paulo (USP/IPEN) na área de Tecnologia Nuclear, com especialização em Didática do Ensino Superior (Uniderp) e MBA Executivo em Marketing (FGV).

🏭 Experiência Profissional

Possui mais de 20 anos de experiência profissional, sendo 16 no setor de bombas e equipamentos industriais. Atuou como consultor e instrutor técnico em empresas de referência, como OMEL, Vallair e Embraseal, nas áreas de vendas técnicas, aplicação de equipamentos e treinamentos.

👨‍🏫 Atuação como Professor e Coordenador de Curso

Com mais **de 25 anos de experiência docente**, lecionou Engenharia Mecânica em universidades de São Paulo. Atualmente dedica-se a cursos técnicos e treinamentos especializados para engenheiros e profissionais da indústria e à coordenação do curso de **Pós-Graduação Lato Sensu Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais**, até então inédita no Brasil.

📈 Engenharia & Cia

Em 2016, fundou o canal Engenharia & Cia, que hoje conta com mais de 50.000 inscritos no YouTube e 130.000 no LinkedIn. Desde então, já treinou mais de 1.200 alunos em cursos presenciais e online, além de desenvolver materiais técnicos e softwares exclusivos, como a Calculadora de Dimensionamento de Bombas.

💡 Missão Profissional

Combinando teoria sólida, prática de campo e experiência docente, Micelli Camargo dedica-se a transformar conhecimento técnico em aprendizado acessível e aplicável, contribuindo para a formação e atualização de engenheiros, técnicos e profissionais da indústria.

📩 contato@engenhariaecia.com
🌐 www.engenhariaecia.com
WhatsApp: +55 11 95696 7808

APRESENTAÇÃO

A Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais foi concebida com um objetivo muito claro: formar profissionais capazes de compreender, analisar, dimensionar e operar sistemas reais de movimentação de fluidos na indústria.

Diferentemente de programas tradicionais, o foco do curso não está na teoria pela teoria, mas na aplicação prática dos conceitos, conectando fundamentos físicos à realidade de campo, envolvendo tubulações, máquinas, medições, perdas e comportamento dos fluidos.

Dentro dessa estrutura, cada disciplina foi pensada como parte de uma sequência lógica de construção de conhecimento, e é exatamente nesse ponto que entra a disciplina Compressores, Sopradores e Ventiladores.

Ela tem como objetivo apresentar um método sistemático e fundamentado para dimensionar e selecionar máquinas de fluxo de gases em instalações industriais reais, partindo sempre da instalação: converter a vazão que o processo exige para a condição que a máquina de fato aspira, percorrer a rede somando as perdas, compor a pressão de trabalho e só então selecionar o equipamento.

É o mesmo raciocínio de projeto da disciplina de bombas, aplicado ao fluido compressível: a máquina é a última resposta, nunca a primeira.

A diferença desta disciplina está em tratar as três famílias no mesmo material. O ar é o mesmo fluido em toda a faixa de pressão, e o que separa um ventilador de um soprador e de um compressor é onde cada um opera e o que a compressibilidade cobra em cada faixa.

Por isso o material trata primeiro da escolha do tipo certo de máquina, por um mapa de aplicações e por eliminação de critérios, e só depois do dimensionamento, avançando em complexidade: do ventilador, em que a densidade é praticamente constante, ao sistema de ar comprimido, em que a pressão é requisito de processo e a rede precisa preservá-la, e ao soprador, em que a pressão é resultado do caminho e a temperatura de descarga decide a seleção.

A cada etapa, aproveitam-se os fundamentos já construídos e acrescentam-se apenas os pontos específicos de cada caso.

A disciplina consolida os fundamentos necessários, propriedades dos gases e do ar úmido, condições de referência de vazão, escoamento compressível e termodinâmica da compressão, e os aplica ao dimensionamento, com base nas normas e práticas recomendadas aplicáveis (ISO 1217, ISO 8573-1, ISO 12500, ISO 6358, AMCA 99, 201 e 210, e NR-13) e nos métodos consagrados dos fabricantes e das entidades de referência (Atlas Copco, CAGI, ACGIH, Twin City Fan, Howden Roots, Gardner Denver e OMEL).

A proposta didática privilegia:

- método único, da instalação à máquina: vazão do processo, perdas, pressão de trabalho e seleção;

- progressão de complexidade, do ventilador ao compressor e ao soprador, sem reapresentar o que já foi construído;
- exemplos resolvidos passo a passo, com a origem de cada dado declarada e todos os números derivados;
- seleção em catálogo real de fabricante, com leitura de curva, de tabela de capacidades e de folha de dados;
- verificações como parte inseparável do dimensionamento: potência e motor, limites térmicos, qualidade do ar e efeitos de instalação;
- identificação dos erros comuns de dimensionamento e de seleção, e de suas consequências em campo e na conta de energia.

ORGANIZAÇÃO DA PÓS-GRADUAÇÃO

Este Programa de Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais nasce como resultado de anos de atuação profissional, pesquisa aplicada e prática de campo, aliado a um convênio de cooperação acadêmica e institucional entre organizações de referência nas áreas de engenharia, educação superior e pesquisa científica.

O curso conta com uma parceria acadêmica e institucional estruturada, envolvendo as seguintes entidades, com atribuições claramente definidas:

- **Engenharia e Cia Educacional:**
  Empresa especializada em treinamentos técnicos, cursos, softwares e consultoria em engenharia mecânica e industrial, com foco em bombas, equipamentos industriais e sistemas de movimentação de fluidos.
  É a responsável pela concepção técnica do curso, definição da grade curricular, coordenação dos conteúdos e orientação prática, assegurando o alinhamento do programa com as demandas reais da indústria.
- **Instituto Sendtko de Ensino Superior:**
  É a instituição parceira responsável pela coordenação institucional e intermediação dos trâmites acadêmicos junto à instituição certificadora.
  O Instituto Sendtko possui experiência na estruturação de programas de pós-graduação lato sensu reconhecidos pelo MEC.
- **Faculdade de Governança, Engenharia e Educação de São Paulo (FGE-SP):**
  É a instituição de ensino superior responsável pelo registro, autorização e certificação do curso junto ao **Ministério da Educação (MEC)**, assegurando a regularidade acadêmica, a validade nacional do diploma e o cumprimento das exigências legais do ensino superior brasileiro.
- **STAR:**

O **Science, Technology and Advanced Research Institute** é uma instituição de pesquisa e ensino tecnológico registrada nos Estados Unidos que possibilita ao aluno a participação em um Programa de Pós-Bacharelado (Post-Baccalaureate Program), estruturado para o desenvolvimento de projetos técnicos aplicados, construção de portfólio profissional e ampliação da experiência internacional, obtendo assim uma segunda certificação, válida nos Estados Unidos da América.

APOIO INSTITUCIONAL

A Pós-Graduação em Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais conta também com o apoio institucional de empresas atuantes no setor, reforçando seu caráter aplicado, alinhado às demandas reais da indústria e às práticas de campo.

Entre elas:

- **OMEL Bombas e Compressores:**
  É uma empresa pioneira no Brasil no campo da tecnologia de bombeamento e controle de fluidos. Genuinamente nacional atuando desde 1952 no mercado e reconhecida pela tecnologia em projetos e qualidade de fabricação de bombas e sistemas especiais para as mais diversas aplicações.

  Entre os produtos oferecidos estão bombas centrífugas, bombas de vácuo, bombas dosadoras, sopradores tipo "roots", compressores de anel líquido, rotâmetros, sistemas de Vácuo e válvulas de mangote.

- **Vallair Bombas, Compressores, Instrumentação e Válvulas:**
  É uma empresa especializada em bombas de deslocamento positivo, tais como bombas pneumáticas, bombas peristálticas e bombas dosadoras, instrumentos pneumáticos e acessórios para estes produtos.

  Também faz parte do escopo de fornecimento da Vallair, produtos e soluções de bombeamento específicos para o setor de energia, petróleo e saneamento, por meio da distribuição exclusiva de sopradores, bombas centrífugas e dosadoras, bombas de vácuo, válvulas de mangote e rotâmetros da **OMEL.**

OBJETIVOS

Capacitar o aluno a dimensionar e selecionar ventiladores, compressores e sopradores para instalações industriais de forma sistemática, fundamentada e alinhada às normas e à prática de campo, partindo da instalação e chegando ao equipamento adequado, com verificação de potência, de temperatura e de qualidade do ar.

Ao final da disciplina, o aluno deverá ser capaz de:

1. Compreender as propriedades dos gases e do ar atmosférico, tratar o ar úmido pela lei de Dalton e converter vazões entre as condições de referência do mercado e a condição real do local, reconhecendo o que significam [Nm³/h], FAD, SCFM, ACFM e ICFM.
2. Distinguir escoamento incompressível de compressível e aplicar a termodinâmica da compressão: processos isotérmico, isentrópico e politrópico, trabalho e potência, relação de compressão, temperatura de descarga e compressão multiestágio com interresfriamento.
3. Selecionar o tipo de máquina adequado a cada aplicação, por um processo de eliminação por critérios, situando ventiladores, sopradores e compressores no mapa de pressão e vazão e reconhecendo as tecnologias de cada família.
4. Dimensionar ventiladores industriais: compor as três pressões pelo método da pressão dinâmica, calcular a perda de carga da rede de dutos, tratar seções não circulares, balancear os ramais, localizar o ponto de operação na curva e percorrer a cadeia de potência até o motor.
5. Dimensionar sistemas de ar comprimido: estabelecer a capacidade pelos fatores de utilização e de simultaneidade, definir a pressão de trabalho, escolher o diâmetro da rede pela velocidade e verificar a perda de carga, dimensionar o reservatório e definir a quantidade de compressores.
6. Especificar os periféricos do ar comprimido, resfriador posterior, separador, secadores, filtros e drenos, definindo a classe de qualidade do ar exigida pela aplicação conforme a ISO 8573-1.
7. Dimensionar sopradores, reconhecendo que ali a pressão é resultado e não dado: compor a pressão de descarga a partir da parcela de processo e da rede, calcular a perda de carga com as propriedades reais do gás na descarga, e selecionar na tabela ou na curva do fabricante.
8. Verificar os limites térmicos das máquinas de deslocamento positivo, comparando a elevação de temperatura estimada com as regras gerais e com os limites publicados pelo fabricante, e reconhecer quando a temperatura, e não a vazão ou a pressão, é o que decide a seleção.
9. Avaliar o custo de operação da instalação, quantificando o peso da perda de carga, do vazamento e do rendimento na conta de energia, e usar esse critério na comparação entre alternativas de compra.
10. Interpretar criticamente curvas de desempenho, tabelas de catálogo e folhas de dados, confrontando propostas no mesmo ponto de operação e identificando boas práticas e erros comuns de dimensionamento e de operação.

1.CONCEITOS FUNDAMENTAIS

1.1. Introdução

Os conceitos de mecânica dos fluidos aqui reunidos de forma direta já foram estudados em profundidade em disciplina própria.

Nosso objetivo aqui é relembrar os principais pontos estudados e permitir que aqueles que não cursaram ainda a disciplina possa acompanhar a disciplina sem maiores dificuldades.

Tudo o que faremos adiante repousa sobre quatro blocos:

- São as propriedades do fluido quem definem como ele resiste ao escoamento e ao bombeamento,
- a estática, que fixa o conceito de pressão e de coluna de líquido,
- a cinemática, que descreve vazão, velocidade e regime de escoamento, e
- equação da energia que trata da inteiração do fluido ao longo do escoamento

Sem esses pilares não se calcula altura manométrica, curva do sistema, número de Reynolds ou NPSH.

1.2. Propriedades dos Fluidos

1.2.1. Conceito Técnico de Fluido e Os Estados da Matéria

Fluido, em engenharia, é toda substância que se deforma continuamente quando submetida a uma tensão de cisalhamento, por pequena que seja essa tensão. A definição não separa líquidos de gases: ambos são fluidos. O que os separa, para o propósito deste módulo, é a resposta a uma variação de pressão.

A matéria é usualmente descrita em três estados, sólido, líquido e gasoso, aos quais a física moderna acrescenta o plasma.

No estado sólido as moléculas ocupam posições fixas em uma estrutura reticulada, vibrando em torno de uma posição de equilíbrio. Fornecendo energia térmica, a agitação vence a ligação reticulada e a substância funde.

Fornecendo mais energia, a ligação intermolecular é rompida por completo e a substância passa ao estado gasoso, expandindo-se em todas as direções e misturando-se aos demais gases presentes.

A ordem de grandeza envolvida ajuda a fixar por que um gás se comporta como se comporta: um milímetro cúbico de ar à pressão atmosférica contém aproximadamente $2{,}55 \times 10^{16}$ moléculas. É a liberdade de movimento dessa população, e não sua quantidade, que responde por compressibilidade, difusibilidade e expansibilidade.

1.2.2. Princípio da Aderência (Condição de Não Deslizamento)

Princípio da aderência ou condição de não deslizamento está relacionado com o fluido que em contato com uma superfície sólida assume a mesma velocidade da superfície.

Junto à parede parada, a velocidade do fluido é nula, por outro lado, junto a uma parede em movimento, o fluido acompanha a parede.

É esse princípio que dá origem ao perfil de velocidades e às perdas de carga por atrito.

> ***Observação:*** *Somente em escoamento molecular, o princípio da aderência não está presente.*

1.2.3. A Experiência Das Duas Placas E A Lei De Newton

A relação entre esforço e deformação é mais bem compreendida pela experiência das duas placas.
Considere duas placas paralelas, separadas por uma pequena distância e com o fluido entre elas.
A placa inferior é fixa, enquanto a superior é móvel e submetida a uma força tangencial e passa a se mover com velocidade constante.

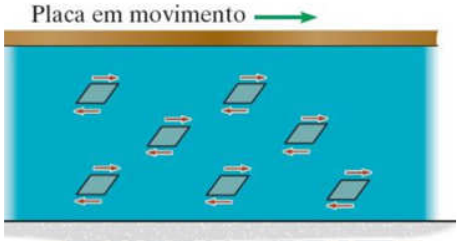


Figura 1: Experiência das duas placas (Fonte: Hibbeler)

Pelo princípio da aderência, o fluido junto à placa inferior tem velocidade nula e o fluido junto à placa superior move-se com a velocidade da placa.

Entre esses extremos há uma variação contínua de velocidade ao longo da espessura que traz as consequências:

- o movimento ocorre por deslizamento relativo entre camadas adjacentes.
- Essa diferença de velocidade entre camadas é a deformação por cisalhamento.

A **taxa de cisalhamento** mede a rapidez dessa deformação e é numericamente igual ao gradiente de velocidade normal ao escoamento, du/dy.

Para um grande grupo de fluidos, a tensão de cisalhamento é proporcional a essa taxa, com a viscosidade dinâmica como constante de proporcionalidade, esta é a chamada **Lei de Newton da viscosidade**:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \qquad (1)$$

onde τ = tensão de cisalhamento [Pa], **μ** = viscosidade dinâmica [Pa.s] e **du/dy** = taxa de cisalhamento [1/s].

1.2.4. Massa Específica, Peso Específico

A **massa específica ρ** (rô), também chamada de densidade, é a massa por unidade de volume, em [kg/m³].

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (2)$$

onde: **ρ** = massa específica [kg/m³], **m** = massa [kg], **V** = volume [m³].

O **peso específico** γ (gama) é o peso (**W**) por unidade de volume, em [N/m³] no SI.

Como o peso é W = m·g:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \rho \cdot g \tag{3}$$

onde: γ = peso específico [N/m³], **W** = peso (N), **ρ** = massa específica [kg/m³], **g** = aceleração da gravidade (9,81 [m/s²]).

1.2.5. Gravidade Específica

A **gravidade específica SG** (densidade relativa) é a razão entre a massa específica do fluido e a de uma referência: É adimensional.

$$SG = \frac{\rho_{fluido}}{\rho_{ref}} \tag{4}$$

onde: **SG** = gravidade específica (adimensional), ρ_{fluido} **e** ρ_{ref} = massas específicas do fluido e da referência em [kg/m³] no SI.

A referência para líquidos é a água à pressão atmosférica e a temperatura de 4 [ºC] que vale 1000 [kg/m³], enquanto para gás é o ar à pressão atmosférica 1,013 [bar] (101.300 [Pa]), e a temperatura de 15 [ºC] que vale 1,225 [kg/m³], assim temos:

$$SG_{líquido} = \frac{\rho_{líquido}}{1000} \tag{5}$$

$$SG_{gás} = \frac{\rho_{gás}}{1,225} \tag{6}$$

1.2.6. Viscosidade Dinâmica E Viscosidade Cinemática

A viscosidade quantifica a resistência interna do fluido ao escoamento. O coeficiente μ da Lei de Newton é a **viscosidade dinâmica (absoluta)**, em [Pa.s] (equivalente a [N.s/m²] ou [kg/m.s]).

É comum o uso da unidade centi-Poise, oriunda do sistema CGS de unidades, que está caindo em desuso, conforme relação 1 [cP] = 0,001 [Pa.s].

A viscosidade depende fortemente da temperatura: nos líquidos ela diminui quando a temperatura sobe (o óleo quente escoa mais fácil), por outro lado, nos gases, cresce.

Por isso a temperatura de operação é sempre um dado de entrada no dimensionamento.

A água tem viscosidade dinâmica equivalente a 1 [cP].

A **viscosidade cinemática** ν (ni) é a razão entre a dinâmica e a massa específica, em [m²/s].

De forma semelhante, é comum o uso da unidade cSt (centi-Stoke), também do CGS, onde 1 [cSt] = 0,000001 [m²/s].

A viscosidade cinemática da água é equivalente a 1 [cSt].

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{7}$$

onde: $\boldsymbol{\nu}$ = viscosidade cinemática [m²/s], **μ** = viscosidade dinâmica [Pa.s], **ρ** = massa específica [kg/m³], no SI.

1.2.6.1. Exemplo: Conversão de unidade de viscosidade

Um xarope tem viscosidade dinâmica de 200 [cP]. Em unidades do SI:

$$\mu = 200 \cdot 0{,}001 = 0{,}20\ [Pa \cdot s]$$

Resultado: μ = 0,20 [Pa.s], ou seja, 200 vezes a viscosidade da água.

> ***Ponto-chave:*** A viscosidade é a propriedade que mais impacta a escolha do tipo de bomba.
>
> Fluidos pouco viscosos favorecem a bomba centrífuga, à medida que a viscosidade cresce, o rendimento da bomba cai, o que torna a mudança para uma bomba de deslocamento positivo, mais atraente.

1.3. Estática dos Fluidos

1.3.1. Pressão E Unidades

Pressão é a força normal por unidade de área, conforme:

$$\boldsymbol{p = \frac{F}{A}} \tag{8}$$

onde: **p** = pressão [Pa], **F** = força normal (N) e **A** = área (m²).



Figura 2: Definição de pressão (Fonte: Hibbeler)

Existem várias unidades de pressão que surgiram por várias circunstâncias, as mais utilizadas hoje em dia são:

- 1 [bar] = 10^5 [Pa] = 100 [kPa] = 0,1 [MPa] ≅ 14,5 [PSI] ≅ 750 [mmHg] ≅ 10,3 [mca] ≅ 750 [Torr] ≅ 1,02 [kgf/cm²]

1.3.2. Pressão Absoluta, Atmosférica E Efetiva

Pressão atmosférica é a pressão exercida pela coluna de ar que existe no nosso planeta, e portanto exerce pressão sobre tudo e todos que estão na superfície.

Ao nível do mar vale cerca de 1 atm (~ 101,3 [kPa] ou 14,7 [PSI]) e diminui com a altitude, da ordem de 12 [Pa] por metro nos primeiros níveis.

Pressão absoluta (pabs) é a pressão medida a partir do vácuo absoluto (ou zero absoluto). No Brasil recebe o índice abs e em material norte-americano, a letra "a" na unidade como [psia] e [bar(a)].

Pressão efetiva é a pressão medida a partir da pressão atmosférica local, daí ser chamada também de *pressão relativa*. Ela é o que a maioria dos instrumentos indica.

No Brasil, a literatura não costuma usar índices, no entanto, em material americano é comum "g" acompanhar a unidade como [PSIG] ou [barg].

Vale a relação entre as escalas é determinada por:

$$p_{abs} = p + p_{atm} \quad (9)$$

onde $\mathbf{p_{abs}}$ = pressão absoluta, $\mathbf{p}$ = pressão efetiva e $\mathbf{p_{atm}}$ = pressão atmosférica local (todas na mesma unidade).

Valores efetivos negativos indicam pressão abaixo da atmosférica que é uma condição que recebe o nome de *pressão de vácuo* ou *pressão vacuométrica*, comum em linhas de sucção, os instrumentos de Bourdon utilizados nessa condição são chamados de *vacuômetros.*

e forma similar, valores efetivos positivos indicam pressão acima da atmosférica, sendo chamadas de *pressão manométricas* e os instrumentos chamados de *manômetros*. Instrumentos que atuam tanto em faixas negativas quanto positivas são chamados de *vacuomanômetro ou manovacuômetros.*

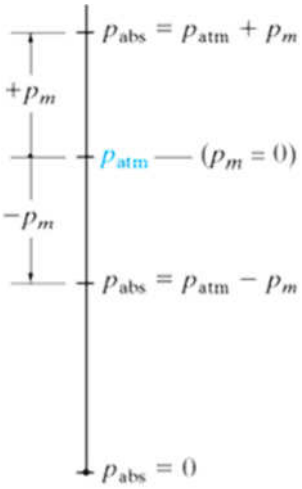


Figura 3: Escala de pressão (Fonte: Engenharia e Cia)

1.3.2.1. Exemplo: Conversão entre escalas de pressão

Um manômetro indica 2 [bar] (efetiva) ao nível do mar (p_{atm} = 1,013 [bar]). A pressão absoluta é:

$$p_{abs} = 2 + 1{,}013 = 3{,}013\ [bar]$$

> ***Resultado:*** p_{abs} = 3,01 [bar]. Cálculos de NPSH e de sucção sob vácuo devem ser feitos em pressão absoluta.

1.3.3. Princípio de Stevin e Carga de Pressão

O Princípio de Stevin estabelece que, num fluido homogêneo em repouso, a variação de pressão entre dois pontos é proporcional à diferença de altura: quanto maior a profundidade, maior a pressão.

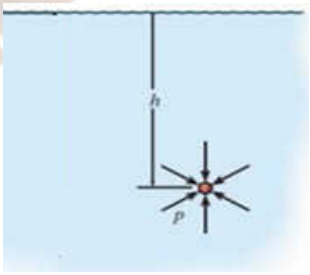


Figura 4: Pressão hidrostática em um ponto (Fonte: Hibbeler)

Da condição de equilíbrio de um elemento de fluido obtém-se a pressão hidrostática:

$$p = \rho \cdot g \cdot h = \gamma \cdot h \quad (10)$$

onde $\mathbf{p}$ = pressão hidrostática [Pa], $\boldsymbol{\rho}$ = massa específica [kg/m³], $\mathbf{g}$ = aceleração da gravidade (9,81 [m/s²]), $\mathbf{h}$ = profundidade [m] e $\boldsymbol{\gamma}$ = peso específico [N/m³].

Se a pressão no nível for diferente da pressão atmosférica, a equação fica:

$$p = p_{superfície} + \rho \cdot g \cdot h \quad (11)$$

Se a pressão na superfície for de vácuo, o valor entra negativo na equação (18).

Isolando h, obtém-se a **carga de pressão**, a pressão expressa como altura de coluna do próprio líquido, daí unidades como [mca] e [mmHg]:

$$h = \frac{p}{\gamma} \quad ou \quad h = \frac{p - p_{superfície}}{\gamma} \tag{12}$$

onde **h** = carga de pressão ou altura de coluna de líquido em [m], **p** = pressão [Pa] e γ = peso específico [N/m³], no SI.

Para ilustrar o conceito, veja a imagem seguinte, ambos líquidos promovem a mesma pressão no fundo, mesmo com carga de pressão tão diferentes, a diferença se deve justamente pela diferença da massa específica dos produtos.

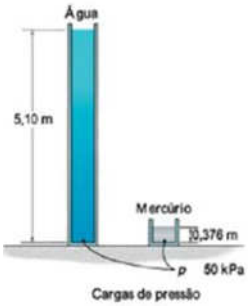


Figura 5: Carga de pressão (Fonte: Hibbeler)

1.3.3.1. Exemplo: pressão no fundo de um reservatório

Pressão efetiva no fundo de um reservatório de água com 15 [m] de coluna:

$$p = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 9{,}8 \cdot 15 = 147.000\ [Pa]$$

> ***Resultado:*** p = 147 [kPa] (aprox. 1,47 [bar]), o mesmo que 15 [mca], coerente com a definição de carga de pressão.

> ***Atenção:*** A cota onde o manômetro é instalado influencia a leitura pela própria coluna de líquido até ele. Em baixa pressão e, sobretudo, em vácuo, uma coluna de 1 [m] já representa erro relativo grande. Padronize a cota de medição.

1.4. Cinemática dos Fluidos

1.4.1. Vazão Volumétrica e Vazão Mássica

A **vazão volumétrica Q** é o volume que atravessa uma seção por unidade de tempo, definido por:

$$Q = \frac{\forall}{t} \tag{13}$$

onde **Q** = vazão volumétrica [m³/s], ∀= volume [m³] e **t** o tempo [s], no SI.

Uma maneira simples e rudimentar de medir a vazão é verificar quanto tempo leva para encher um determinado volume conhecido, útil em algumas situações práticas.

A vazão volumétrica está relacionada à velocidade média V e à área A, conforme:

$$Q = V \cdot A \tag{14}$$

onde **Q** = vazão volumétrica [m³/s], **V** = velocidade média [m/s] e **A** = área da seção transversal (m²).

A **vazão mássica** é uma propriedade similar, no entanto, relacionado à massa que atravessa uma área por unidade de tempo, conforme:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \rho \cdot Q \tag{15}$$

onde $\dot{m}$ = vazão mássica [kg/s], **ρ** = massa específica [kg/m³] e **Q** = vazão volumétrica [m³/s].

Em análise de sistemas gasosos, cuja compressibilidade é importante, usar vazão mássica é mais apropriado, no entanto, no campo dos compressores é comum o uso de vazão volumétrica.

1.4.1.1. Exemplo: Vazão a Partir de V e D

Água a 2 [m/s] por um tubo de 100 [mm] (0,10 m) de diâmetro interno:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = 0{,}785 \cdot 0{,}10^2 = 0{,}00785\ [m^2] \ \mid \ Q = V \cdot A = 2 \cdot 0{,}00785 = 0{,}0157\ \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

Resultado: Q = 0,0157 [m³/s], ou seja, cerca de 56,5 [m³/h].

1.4.2. Velocidade Média e Perfil de Velocidades

Por causa do princípio da aderência, a velocidade é nula na parede e máxima na linha de centro da tubulação, assim existe uma distribuição espacial de velocidade, chamada de *perfil de velocidades*, ilustrado a seguir:

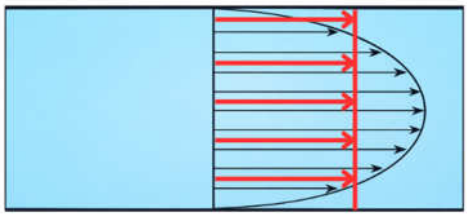


Figura 6: Perfil de velocidades e a velocidade média (vermelha) (Fonte: Engenharia e Cia)

Para o dimensionamento trabalha-se com a velocidade média V, tal que V·A reproduza a vazão real, é ela que normalmente entra nos cálculos, como do número de Reynolds e das perdas de carga.

1.4.3. Regimes de Escoamento e Número ee Reynolds

O escoamento pode ser laminar (camadas ordenadas), turbulento (mistura intensa) ou de transição.

O regime muda o cálculo da perda de carga, então precisa ser classificado, e é o que o número de Reynolds faz, comparando efeitos inerciais e viscosos:

$$\boldsymbol{Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu}} \qquad (16)$$

onde **Re** = número de Reynolds (adimensional), **ρ** = massa específica [kg/m³], **V** = velocidade média [m/s], **D** = diâmetro interno [m], **μ** = viscosidade dinâmica [Pa.s] e $\boldsymbol{\nu}$ = viscosidade cinemática [m²/s].

A classificação para tubos de seção circular, tanto para líquido quanto para gases é:

- Laminar: Re < 2000
- Transição: 2000 < Re < 2400
- Turbulento: Re > 2400

Observação: a faixa de valores listadas acima podem divergir dependendo da fonte. Alguns autores, como o Hibbeler, adotam apenas regime laminar e turbulento, com valor limite de 2300, sendo laminar abaixo ou turbulento acima.

1.4.3.1. Exemplo: Cálculo do número de Reynolds

Para a água do exemplo anterior (V = 2 [m/s], D = 0,10 [m], v = 0,000001 [m²/s]):

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{2 \cdot 0{,}10}{1 \times 10^{-6}} = 200000$$

> ***Resultado:*** Re = 200.000. Como Re > 2400, o escoamento é turbulento, o caso mais comum em bombeamento industrial de fluidos newtonianos.

1.4.4. Equação Da Continuidade

A equação da continuidade é a uma forma da *lei da conservação da massa*: a massa que entra em um volume de controle é igual à que sai.

Em regime permanente a vazão mássica é constante, para fluido incompressível (líquidos), a massa específica é constante e a expressão se reduz a:

$$\boldsymbol{Q_1 = Q_2} \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2} \tag{17}$$

onde: **Q** = vazão [m³/s], **V** = velocidade [m/s] e **A** = área (m²)

Mantida a vazão, reduzir o diâmetro aumenta a velocidade. Como a perda de carga cresce com o quadrado da velocidade, a escolha do diâmetro tem efeito forte sobre a altura manométrica.

1.4.4.1. Exemplo: efeito da redução de diâmetro

Durante o escoamento numa linha, ao reduzir o diâmetro à metade, a área cai a um quarto para manter Q = V·A, conforme demonstrado a seguir:

$$\boldsymbol{V_2 = V_1 \cdot \frac{A_1}{A_2} = V_1 \cdot \frac{\pi/4\, D_1^2}{\pi/4 \left(D_1/2\right)^2} = 4 \cdot V_1} \tag{18}$$

> ***Resultado:*** A velocidade fica 4 vezes maior. Como a perda de carga varia com o quadrado da velocidade, ela cresce numa proporção muito maior.

1.4.5. Escoamentos em Regime Permanente e Não-Permanente

Escoamento em regime permanente ou estacionário é aquele em que as suas propriedades, em cada ponto, não variam com o tempo.

Por outro lado, os **escoamentos em regime não-permanente ou transitórios** as propriedades, em cada ponto, mudam com o tempo.

Aqui cabem dois pontos importantes:

- Esses conceitos são aplicados a qualquer propriedade de interesse, portanto, se qualquer uma delas se alterar, o escoamento não é mais permanente.
- A análise de variação de propriedades é nos pontos de interesses. Em pontos diferentes não somente pode como normalmente acontece mudanças.

Esses pontos estão ilustrados a seguir:

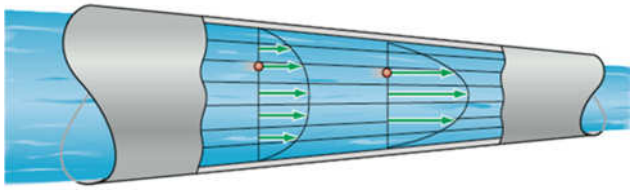


Figura 7 - Escoamentos em regime permanente (Fontes: Hibbeler)

Observe que há dois perfis de velocidades diferentes, se eles se mantiverem constantes com o tempo, o regime é permanente.

O dimensionamento convencional adota essa hipótese; transitórios (golpe de aríete) são tratados à parte.

2.PROPRIEDADES DOS GASES E DO AR ATMOSFÉRICO

2.1. Introdução

Todo erro grosseiro de especificação de um ventilador, soprador ou compressor que este autor já encontrou em campo tem uma de duas origens: a vazão foi informada em uma referência e usada em outra, ou a pressão manométrica foi lançada em uma equação que exigia pressão absoluta.

Nenhum dos dois é um erro de máquina. São erros de propriedade de gás.

Nas disciplinas anteriores deste curso, ao trabalhar com líquidos, a massa específica foi tratada como constante. Água, por exemplo, a 20 [ºC] tem aproximadamente 998 [kg/m^3] na sucção e na descarga da bomba, e é isso. Essa simplificação é legítima e economiza trabalho.

No caso de gases, se o escoamento for promovido por ventiladores, essa simplificação continua válida, no entanto, em outras situações não.

Em máquinas como compressores de gás ou sopradores, a massa específica do fluido muda dentro do próprio equipamento, muda com a altitude da planta, muda com a estação do ano e muda com a umidade do dia.

A vazão volumétrica, sozinha, deixa de ser uma informação suficiente para especificar qualquer coisa.

Este capítulo constrói, portanto, o vocabulário mínimo que os capítulos seguintes vão consumir sem cerimônia. Ele não é um capítulo de revisão de termodinâmica geral: é uma seleção deliberada das propriedades que aparecem nas planilhas de dimensionamento e nas folhas de dados de fabricante.

> ***Ponto-chave:*** Ao final deste capítulo o aluno deve ser capaz de receber uma folha de dados com a vazão em [SCFM], a pressão em [PSI] ou [barg], a altitude em [m] ou [pés] e converter tudo para as unidades e referências em que a equação de seleção do fabricante realmente opera, sem consultar ninguém.

2.2. Composição do Ar Atmosférico

O ar atmosférico é uma mistura de gases, e não uma substância química pura. Essa distinção não é acadêmica: por ser mistura, o ar pode ser separado em seus constituintes por processo físico, o que é exatamente a base industrial da produção de oxigênio e nitrogênio por destilação criogênica.

A composição volumétrica é dominada por dois componentes:

- Nitrogênio → 78 [%]
- Oxigênio → 21 [%]
- Demais gases (argônio, dióxido de carbono, neônio, vapor d'água e etc) → 1 [%]

Essa composição é relativamente constante desde o nível do mar até altitudes da ordem de 25 [km]. Duas consequências práticas decorrem disso.

A primeira é que se pode tratar o ar seco como um gás único, com uma constante específica própria, sem recorrer a cálculo de mistura.

A segunda é que o vapor de água, que não aparece na tabela acima com valor fixo, é justamente o componente variável, e é ele que causa a maior parte dos problemas operacionais em ar comprimido.

> ***Observação:*** *O ar atmosférico real contém sempre partículas sólidas em suspensão: poeira, areia, fuligem, cristais de sal. A concentração é maior em área urbana e industrial e menor em zona rural e em altitude.*
>
> *É por isso que o filtro de aspiração não é um acessório opcional, e sim o primeiro componente do trem de compressão.*

2.3. Comportamento dos Gases

Quatro comportamentos dos gases são citados recorrentemente na literatura técnica de pneumática e de sopradores.

Vale nomeá-los com precisão porque os quatro são usados como argumento em decisões de projeto.

2.3.1. Compressibilidade

É a propriedade de reduzir o volume ocupado quando submetido a uma força externa.

É ela que viabiliza toda a tecnologia tratada neste módulo, e é também a origem de duas limitações práticas conhecidas:

- o atuador pneumático não para com precisão em posições intermediárias, porque o esforço na haste comprime o ar já admitido;
- e a velocidade de um atuador pneumático não é uniforme ao longo do curso.

Esse efeito está ilustrado a seguir através do volume reduzido na condição 2:

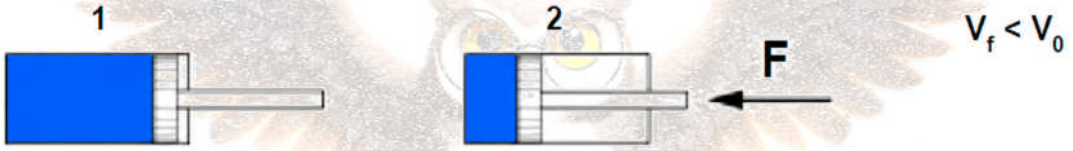


Figura 8: Efeito da compressibilidade no volume do gás (Fonte: Adaptado de Parker)

2.3.2. Elasticidade

É a propriedade de retornar ao volume original quando a força externa cessa.

Compressibilidade e elasticidade são frequentemente confundidas na literatura de nível introdutório. A distinção correta é: compressibilidade descreve a ida, elasticidade descreve a volta, conforme ilustrado a seguir:



Figura 9: Efeito da elasticidade no volume de um gás (Fonte: Adaptado de Parker)

2.3.3. Difusibilidade

É a propriedade de misturar-se homogeneamente com outros gases não saturados.

É a base física da ventilação geral diluidora, tratada em detalhe no capítulo de seleção: se o contaminante não se difundisse no ar do recinto, não haveria como diluí-lo.

Esse efeito está representado a seguir, ao abrir a válvula, os gases se misturam, formando uma mistura homogênea:

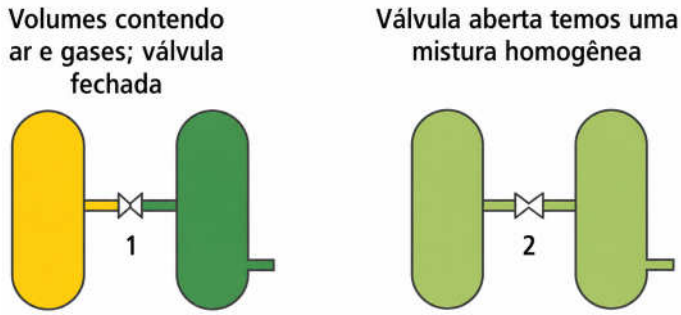


Figura 10: Efeito da difusividade dos gases (Fonte: Adaptado de Parker)

2.3.4. Expansibilidade

É a propriedade de ocupar integralmente o volume do recipiente que o contém.

Uma consequência operacional direta: um vazamento em rede de ar comprimido não se estabiliza nem se autolimita, como faria um vazamento de líquido em uma tubulação por gravidade.

Ele escoa continuamente enquanto houver diferença de pressão.

Esse efeito está representado a seguir, após abrir a válvula o gás expande ocupando todo o espaço disponível, ficando menos concentrado.

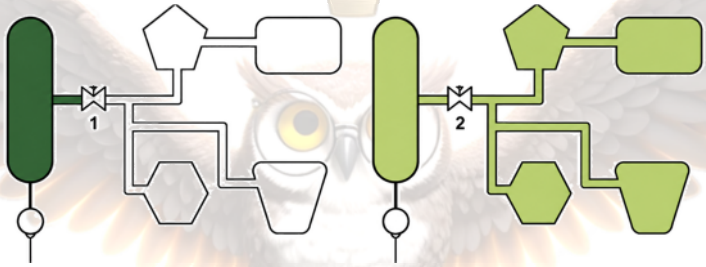


Figura 11: Efeito da expansibilidade dos gases (Fonte: Engenharia e Cia)

2.4. Temperatura Absoluta

Temperatura é uma medida da energia cinética média das moléculas. O movimento molecular cessa integralmente no zero absoluto, e é sobre esse fenômeno que se constrói a escala Kelvin, graduada com o mesmo intervalo da escala Celsius:

$$[\boldsymbol{K}] = \boldsymbol{T}[°\boldsymbol{C}] + \boldsymbol{237,15}\ ^{1} \tag{19}$$

No sistema de unidades inglesas, usado pelos padrões de cálculo de origem norte-americana que serão empregados no capítulo de sopradores, a escala absoluta correspondente é a Rankine:

$$[\boldsymbol{R}] = \boldsymbol{T}[°\boldsymbol{F}] + \boldsymbol{460} \tag{20}$$

> ***Atenção:*** Da mesma forma que a pressão, a temperatura em qualquer equação de estado é sempre absoluta (Kelvin ou Rankine).

[1] É comum arredondar para 237,2.

2.5. Propriedades dos Gases

2.5.1. Massa

Os gases também possuem massa que não conseguimos verificar através de uma balança.

Mas uma experiência simples permite fazer essa verificação. Imaginemos dois recipientes herméticos com ar. Se um deles (à esquerda) tiver todo o ar removido, a balança irá pender para o outro lado. Isso é representado a seguir:

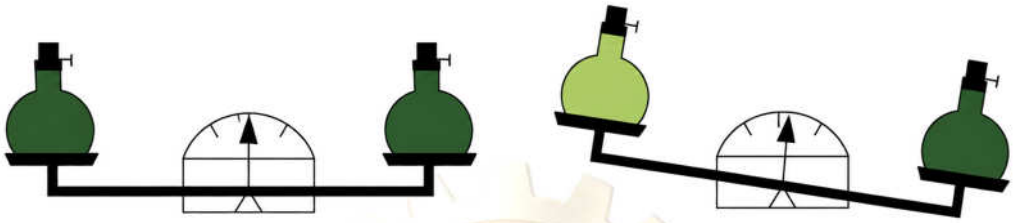


Figura 12: Demonstração da massa de ar (Fonte: Engenharia e Cia)

Se o recipiente for de um litro, a balança irá indicar 1,23 [g].

2.5.2. Massa Específica e Volume Específico

Massa específica, ou densidade, é a massa contida na unidade de volume:

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{21}$$

onde **m** = massa em [kg] e **V** = volume em [m^3].

Essa é a propriedade mais utilizada para análises com líquidos. Para gases ou vapor é mais comum o uso do volume específico. Essa propriedade é seu inverso, isto é, o volume ocupado pela unidade de massa:

$$\mathbf{v} = \frac{V}{m} \tag{22}$$

onde **m** = massa em [kg] e **V** = volume em [m^3].

Para um gás, ambos dependem simultaneamente da pressão e da temperatura, o que se obtém reescrevendo a equação de estado apresentada adiante. O comportamento qualitativo, que convém memorizar, é direto: a massa específica cresce com a pressão e decresce com a temperatura.

A consequência de projeto é permanente ao longo de todo o módulo. Máquinas de gás transferem energia proporcionalmente à massa de fluido movimentada, mas são construídas e catalogadas em termos de volume deslocado.

A massa específica é o fator de conversão entre as duas coisas, e ela não é constante.

> ***Ponto-chave:*** Um ventilador que movimenta 10.000 [m³/h] de ar a 20 [ºC] e um ventilador que movimenta 10.000 [m³/h] de ar a 200 [ºC] não estão fazendo o mesmo trabalho, não exigem a mesma potência e não podem ser o mesmo equipamento.
>
> A vazão volumétrica é a mesma, no entanto, a vazão mássica, não.

2.6. Viscosidade de Gases

Como já viscosidade é a medida da resistência interna de um fluido ao cisalhamento, ou seja, da dificuldade com que ele escoa. Nos gases ela é baixíssima em comparação com líquidos, o que traz duas consequências opostas.

- **A favor**: a perda de carga por atrito viscoso em uma tubulação de gás é pequena, e é por isso que redes de ar comprimido podem ser longas sem penalidade proibitiva.
- **Contra**: um fluido de baixa viscosidade escoa por passagens muito pequenas, e portanto vazamentos são fáceis, frequentes e difíceis de localizar. Vazamento em rede pneumática não é anomalia, é condição normal de operação a ser gerenciada.

> ***Atenção:*** A viscosidade de um gás aumenta com a temperatura, comportamento oposto ao dos líquidos. Alunos que vêm do módulo de bombas tendem a transportar a intuição errada: em bomba, aquecer o fluido facilita o escoamento, em máquina que opera um gás, não.

2.7. Calores Específicos e o Expoente Isentrópico

Calor específico é a quantidade de calor necessária para produzir variação unitária de temperatura em uma unidade de massa da substância, expressa no Sistema Internacional (SI) em [J/(kg·K)].

Para gases é necessário distinguir dois valores, porque o processo de aquecimento pode ocorrer a pressão constante ou a volume constante:

- c_p = calor específico a pressão constante
- c_v = calor específico a volume constante

O calor específico a pressão constante é sempre maior que o a volume constante. A razão física é clara: aquecendo o gás a pressão constante, ele se expande, e parte da energia fornecida é consumida no trabalho de expansão em vez de elevar a temperatura. Sobra menos energia para aquecer, e portanto é preciso fornecer mais.

A razão entre os dois (k) é chamada **expoente isentrópico** ou **expoente adiabático**, e depende do número de átomos por molécula da substância.

$$k = \frac{c_p}{c_v} \tag{23}$$

Para o ar, gás essencialmente diatômico: $k\,(ar) = 1,4$

Rigorosamente, o calor específico não é constante: cresce com a temperatura. Para efeito de dimensionamento industrial adota-se um valor médio na faixa de operação, prática que o próprio manual de fabricante segue.

2.8. Equação de Estado dos Gases Ideais

2.8.1. As Leis Particulares

Historicamente, a equação de estado foi construída a partir de observações particulares, cada uma mantendo uma variável fixa.

Vale conhecê-las porque a literatura de fabricante ainda as cita por nome.

Lei	Condição	Relação
Boyle	Temperatura constante (isotérmica)	$p_1 V_1 = p_2 V_2$
Charles	Pressão constante (isobárica)	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$
Gay-Lussac	Volume constante (isocórica)	$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$
Dalton	Mistura de gases	$p_{total} = \sum p_{parciais}$
Poisson	Sem troca de calor	$p_1 V_1^K = p_2 V_2^K$
Geral	Transformação qualquer	$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$

A hipótese de Avogadro completa o conjunto: volumes iguais de gases diferentes, nas mesmas condições de pressão e temperatura, contêm o mesmo número de moléculas.

Um mol de qualquer substância contém 6,022 x 10^{23} moléculas, e portanto o volume molar de todos os gases, em condições idênticas, é o mesmo.

2.8.2. A Lei Geral e As Duas Formas de Escrevê-La

Combinando as leis de Boyle, Charles e Gay-Lussac com a hipótese de Avogadro, chega-se à equação de estado, também chamada de equação de Clapeyron.

Ela pode ser escrita em base molar:

$$\boldsymbol{p \cdot V = n \cdot R \cdot T} \quad (24)$$

Onde **p** = pressão absoluta [Pa], **V** = volume [m^3], **n** = número de mols, **R** = constante universal dos gases = 8,314 [J/(mol·K)] e **T** = temperatura absoluta [K].

Ou em base mássica, forma bem mais conveniente para engenharia de máquinas de fluxo:

$$\boldsymbol{p \cdot V = m \cdot R_{esp} \cdot T \quad ou \quad p \cdot v = R_{esp} \cdot T \quad ou \quad p = \rho . R_{esp} \cdot T} \quad (25)$$

Onde: **m** = massa de gás [kg], **v** = volume específico [m^3/kg] e $\mathbf{R_{esp}}$ = constante específica do gás [J/(kg·K)]

A constante específica depende exclusivamente das propriedades do gás, e é obtida dividindo a constante universal pela massa molar. Para os dois gases que interessam neste módulo:

Gás	**Constante** específica [J/(kg·K)]
Ar seco	287
Vapor de água	462

O número de mols, quando necessário, obtém-se da razão entre a massa de gás e sua massa molar:

$$\boldsymbol{n = \frac{m}{M}} \quad (26)$$

Onde **m** = massa de gás [kg], **M** = massa molar [kg/mol] e **N** = número de mols [mol]

2.8.3. A Forma Combinada e Por Que Ela É A Mais Usada

Na prática de seleção de equipamento raramente se calcula a massa de gás. O que se faz, quase sempre, é converter uma vazão conhecida em uma condição para outra condição.

Para isso a forma mais útil da equação de estado é a combinada, válida para uma mesma massa de gás transportada de um estado 1 para um estado 2:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \tag{27}$$

Aplicada a vazões em regime permanente, com a vazão mássica constante, a mesma relação vale substituindo volumes por vazões volumétricas:

$$\frac{p_1 Q_1}{T_1} = \frac{p_2 Q_2}{T_2} \tag{28}$$

> ***Ponto-chave:*** Esta é a equação mais utilizada de todo o módulo. Ela é o que permite converter [Nm³/h] em [m³/h] real, corrigir vazão por altitude, corrigir por temperatura de admissão e comparar a capacidade de dois equipamentos catalogados em referências diferentes. Vale memorizá-la.

2.8.3.1. Exemplo 2.1: Conversão de vazão normal para vazão real de sucção

Um processo requer 500 [Nm³/h] de ar, referidos ao estado normal de 1,013 [bar] e 0 [ºC] . O compressor que vai atender esse processo aspira ar atmosférico ao nível do mar a 25 [ºC]. Qual a vazão volumétrica real que o compressor precisa aspirar?

Resolução:

- Estado 1: p_1 = 1,013 [bar]; T_1 = 273,2 [K]; Q_1 = 500 [Nm³/h].
- Estado 2 (sucção real): p_2 = 1,013 [bar]; T_2 = 298,2 [K]; Q_2 a determinar.

Como as pressões são iguais, a relação se reduz à lei de Charles:

$$Q_2 = Q_1 \cdot {}^{T_1}/_{T_2} = 500 \cdot ({}^{298,2}/_{273,2}) = 545{,}8 \left[{}^{m^3}/_{h}\right]$$

Interpretação física: o ar a 25 [ºC] é menos denso que o ar a 0 [ºC] , de modo que é preciso aspirar um volume maior para entregar a mesma massa. Um compressor selecionado para 500 [m³/h] com base apenas no número informado pelo processo entregaria cerca de 8,4 [%] menos ar do que o exigido.

> ***Atenção:*** O desvio de 8,4 [%] neste exemplo vem de uma diferença de apenas 25 [ºC]. Somado ao efeito de altitude, que na cidade de São Paulo já vale 8 a 10 [%], o erro combinado ultrapassa facilmente 15 [%], muito além de qualquer margem de projeto razoável.

2.9. Gás Real e o Fator de Compressibilidade

A equação de estado apresentada descreve o gás ideal, isto é, um gás cujas moléculas não ocupam volume próprio e não exercem forças de atração mútua. Nenhum gás real satisfaz essas hipóteses.

O desvio é contabilizado por um fator adimensional:

$$p \cdot V = Z \cdot m \cdot R_{esp} \cdot T \tag{29}$$

Onde **m** = massa de gás [kg], **V** = volume [m^3], **p** = pressão absoluta [Pa], **Z** = fator de compressibilidade [adimensional], $\mathbf{R_{esp}}$ = constante específica do gás [J/(kg·K)] e **T** = temperatura absoluta [K].

O fator de compressibilidade Z vale exatamente 1 para o gás ideal. Para gases reais afasta-se de 1 tanto mais quanto maior a pressão e quanto mais próxima a temperatura estiver da temperatura crítica da substância.

Para a faixa coberta por este módulo, ar atmosférico, admissão próxima da pressão ambiente, descarga tipicamente até 20 [bar] em ar comprimido industrial, o desvio do gás ideal é pequeno o suficiente para que os manuais de fabricante e os padrões de cálculo de uso corrente adotem Z igual a 1 sem ressalva.

Nossa abordagem segue a mesma prática, com a ressalva explícita a seguir.

> ***Atenção:*** Z deixa de ser desprezível em três situações que o engenheiro deve reconhecer: 1) compressão a pressões elevadas, como em compressores de reciclo de gás em processo;
>
> 2) gases de massa molar alta ou próximos da condensação, como refrigerantes e hidrocarbonetos pesados;
>
> 3) serviço de gás natural em alta pressão.
>
> Nesses casos o cálculo exige tabela ou correlação de Z, e a equação de estado ideal produz erro de projeto, não apenas imprecisão.

2.10. Misturas de Gases

Quando o fluido de trabalho não é ar seco, mas uma mistura, duas ferramentas resolvem a maior parte dos casos práticos.

A primeira é a lei de Dalton: a pressão total exercida por uma mistura de gases é a soma das pressões parciais de seus componentes, entendendo-se por pressão parcial aquela que o componente exerceria se ocupasse sozinho todo o volume.

$$p_{total} = p_1 + p_2 + \ldots + p_n \tag{30}$$

A segunda é a massa molar aparente da mistura, obtida pela média ponderada das massas molares dos componentes por suas frações molares. Dividindo a constante universal por essa massa molar aparente, obtém-se a constante específica da mistura, e todo o ferramental do item anterior volta a valer.

A lei de Dalton será reencontrada de forma decisiva no tratamento do ar úmido, que será apresentado mais afrente, onde o vapor de água é tratado exatamente como um componente da mistura, com pressão parcial própria.

2.11. Condições de Referência e Unidades de Vazão

Este é o item mais importante do capítulo, e o único em que este autor recomenda releitura antes da prova.

A vazão volumétrica é o volume de fluido que atravessa uma seção por unidade de tempo, e pode ser calculada pelo produto da área da seção pela velocidade média do escoamento. A unidade do SI é o [m3/s], embora [l/s], [m3/h] e [CFM] sejam de uso mais comum na indústria.

O problema é que, para um gás, informar apenas o valor volumétrico não define nada. Um metro cúbico de ar a 1 [bar] e 0 [ºC] e um metro cúbico de ar a 1 [bar] e 40 [ºC] contêm massas diferentes. Por isso a indústria criou condições de referência — e, infelizmente, criou mais de uma.

2.11.1. Estado Normal e Estado Padrão

Chama-se estado de referência o conjunto de pressão, temperatura, altitude e umidade ao qual uma vazão foi recalculada. Os valores convencionais mais encontrados são:

Referência	Pressão	Temperatura	Umidade relativa
Estado normal (base Nm^3)	1,013 [bar]	0 [ºC]	0 [%]
ISO 1217 (entrada padrão)	1 [bar]	20 [ºC]	0 [%]
CAGI (referência EUA)	14,5 [psia]	68 [ºF]	0 [%]

> ***Atenção:*** Não existe um único estado padrão universal. A temperatura de referência varia entre 0, 15 e 20 [ºC] conforme a norma adotada. Comparar dois catálogos sem antes verificar a referência de cada um é comparar coisas diferentes.

> Em concorrência técnica, essa é uma das formas mais comuns de um equipamento parecer superior ao outro sem ser.

2.11.2. As Siglas e O Que Cada Uma Mede

As quatro siglas abaixo aparecem em folhas de dados e catálogos, e a confusão entre elas é responsável por boa parte dos erros de especificação.

Sigla	Significado	Onde se mede
SCFM	Standard cubic feet per minute É a vazão no padrão de referência	Referência de papel, não existe fisicamente
Nm^3/h	Normal metro cúbico por hora É o equivalente métrico do SCFM	Referência normalizada
ICFM	Inlet cubic feet per minute É a vazão na entrada do equipamento	Após o filtro de sucção
ACFM	Actual cubic feet per minute É a vazão real nas condições locais	Nas condições efetivas do site
FAD	Free Air Delivery É a vazão recalculada para ar livre na condição padrão de admissão	Saída do compressor, referida à admissão

> ***Ponto-chave:*** SCFM e Nm^3/h são unidades de referência de comparação
>
> ACFM é chamada de **vazão efetiva (Q_{ef})** quando está em outras unidades.

2.11.3. Referências Padronizadas ou de Referências

Uma pergunta natural, diante de tantas réguas: quem estabelece cada uma delas?

A resposta explica por que a confusão persiste. Parte das referências é normatizada, com documento, procedimento de ensaio e valores fixados e parte é convenção de mercado, adotada por entidades ou pelo uso, sem norma que a sustente.

Referência	Condições	Quem define	Situação
Estado normal (Nm³/h, NL/s)	1,01325 [bar] 0 [°C] ar seco[2]	DIN 1343	Normatizada
Atmosfera padrão	1,01325 [bar] 15 [°C] ar seco	ISO 2533	Normatizada; usada em aeronáutica e em ventilação
FAD	condição de admissão da própria máquina, no local	ISO 1217, ensaio de aceitação	Normatizada, com procedimento de medição
Ar padrão do ventilador	$\rho_{Ar} = 1{,}2\ [kg/m^3]$	AMCA e ANSI/ASHRAE, ensaio de ventilador	Normatizada para ensaio
SCFM	14,5 [psia], 68 [°F], Ar seco	convenção adotada por CAGI e PNEUROP	NÃO é norma: é convenção setorial
ACFM e ICFM	condição real do local e condição no flange de admissão	uso corrente do mercado	NÃO normatizadas; a definição varia entre fontes

> ***Atenção:*** Nem o estado normal é único. A DIN 1343 fixa 1,01325 [bar], mas a IUPAC, desde 1982, define o estado padrão a 0 [°C] e 1,00 [bar], e há literatura química que segue essa segunda régua.
>
> São 1,3 [%] de diferença na mesma sigla. Por isso escrever apenas [Nm³/h] em uma especificação não basta: a condição de referência tem de vir declarada ao lado do número.

> ***Ponto-chave:*** O que é normatizado tem procedimento de ensaio por trás, e por isso pode ser exigido em contrato e verificado em recebimento: é o caso da ISO 1217 para a capacidade do compressor e do ensaio AMCA para a curva do ventilador.
>
> O que é convenção só tem valor se as duas partes estiverem usando a mesma. Na dúvida, a especificação deve trazer a vazão acompanhada da pressão, da temperatura e da umidade de referência, e não a sigla sozinha.

2.11.4. Conversão Entre Referências

A conversão geral é a própria equação de estado combinada. Escrita explicitamente para levar a vazão da referência padrão para a condição real, e incluindo o efeito da umidade, tem a forma:

$$\boldsymbol{ACFM = SCFM \cdot \frac{p_{std}}{p_{real} - p_{sat} \cdot \varphi} \cdot \frac{T_{real}}{T_{std}}} \qquad (31)$$

Se quisermos generalizar:

$$\boldsymbol{Q_{ef} = Q_{std} \cdot \frac{p_{std}}{p_{real} - p_{sat} \cdot \varphi} \cdot \frac{T_{real}}{T_{std}}} \qquad (32)$$

[2] Ar significa umidade relativa $\varphi = 0$.

Onde $\mathbf{p_{std}}$, $\mathbf{T_{std}}$ = pressão e temperatura absolutas da referência padrão (std), $\mathbf{p_{real}}$, $\mathbf{T_{real}}$ = pressão e temperatura absolutas na condição real, $\mathbf{p_{sat}}$ = pressão de saturação do vapor de água na temperatura real, $\boldsymbol{\varphi}$ = umidade relativa, na forma decimal, $\mathbf{Q_{ef}}$ = vazão efetiva em outra unidade não padrão e $\mathbf{Q_{std}}$ = vazão na condição padrão

O termo $(\boldsymbol{p_{sat} \cdot \varphi})$ merece atenção. Ele subtrai da pressão total a parcela ocupada pelo vapor de água, deixando apenas a pressão parcial do ar seco.

É a lei de Dalton em aplicação direta: o vapor de água ocupa espaço na mistura e reduz a massa de ar seco efetivamente admitida.

Para o caso particular do ar seco, com φ igual a zero, a expressão se reduz à forma que a maioria dos catálogos apresenta:

$$\boldsymbol{ACFM = SCFM \cdot \frac{p_{std}}{p_{real}} \cdot \frac{T_{real}}{T_{std}}} \qquad (33)$$

2.11.4.1. Exemplo 2.2: Vazão Normal e Vazão de Ar Livre (FAD)

Um fabricante informa a capacidade de um compressor em 100 [NL/s], referida ao estado normal de 1,013 [bar] e 0 [ºC].

O cliente trabalha com a referência de ar livre (FAD), definida pela condição padrão de admissão de 1,00 [bar] e 20 [ºC]. Qual a vazão de ar livre correspondente?

Aplicando a equação (32), considerando Q_{FAD} como Q_{ef}, vem:

$$Q_{ef} = Q_{std} \cdot \frac{p_{std}}{p_{real}} \cdot \frac{T_{real}}{T_{std}} = 100 \frac{1{,}013}{1} \frac{(20 + 273{,}2)}{(0 + 273{,}2)} = 108{,}7\ [L/s]$$

Interpretação: a diferença de quase 9 [%] não representa nenhum ganho de desempenho. É apenas mudança de régua.

Um comprador que compare 100 [NL/s] de um fabricante com 105 [L/s] FAD de outro concluirá erradamente que o segundo é maior, quando na verdade é menor.

> ***Observação:*** *A expressão acima despreza o efeito da umidade. Para incluí-lo, aplica-se a forma completa apresentada no item anterior, obtendo a pressão de saturação em tabela psicrométrica na temperatura de admissão.*

2.12. Ar Úmido

O ar atmosférico pode ser tratado como mistura de ar seco e vapor de água. A umidade varia entre dois extremos: ar completamente seco e ar saturado. A capacidade do ar de conter vapor de água não é ilimitada, e o limite depende fortemente da temperatura: a cada temperatura corresponde uma pressão máxima de vapor, chamada pressão de saturação.

2.12.1. Umidade Relativa e Umidade Absoluta

Umidade absoluta é a massa de vapor de água contida por unidade de massa de ar seco, ou por unidade de volume de mistura, conforme a convenção adotada.

Umidade relativa (ø) é a razão entre a pressão parcial de vapor (p_{vapor}) efetivamente presente e a pressão de saturação (p_{sat}) na mesma temperatura:

$$\varphi = \frac{p_{vapor}}{p_{sat}} \quad (34)$$

Sendo uma razão entre duas pressões, é adimensional e habitualmente expressa em porcentagem.

Aplicando a equação de estado separadamente ao ar seco e ao vapor, com as respectivas constantes específicas de 287 e 462 [J/(kg·K)], obtêm-se as massas de cada componente na mistura, que é o caminho de cálculo para a quantidade de condensado.

A quantificação do volume de água condensada é normalmente uma preocupação de fabricantes de equipamentos, para a classificação de secadores, por exemplo.

Para o usuário de equipamentos, a escolha vem da capacidade do secador, que o fabricante informa em termos de vazão de ar para uma dada pressão e temperatura. Informando ainda, fatores de correção para condições diferentes.

2.12.2. Ponto de Orvalho

Ponto de orvalho é a temperatura na qual o ar se torna saturado de vapor d'água. Se ele for resfriado abaixo dessa temperatura, parte desse vapor condensa, formando água líquida.

É esse fenômeno que podemos observar entre a madrugada e o início da manhã, quando superfícies expostas ficam molhadas. A água observada é proveniente do vapor d'água presente no ar, que condensou à medida que a temperatura caiu durante a noite.

Com o nascer do sol e o aumento da temperatura, essa água tende a evaporar novamente. Quando o ponto de orvalho é determinado à pressão atmosférica, falamos em **ponto de orvalho atmosférico**.

O ponto de orvalho também depende da pressão. Ao comprimirmos o ar, aumenta a pressão parcial do vapor d'água e, consequentemente, aumenta a temperatura na qual ocorre a saturação. Em outras palavras, quanto maior a pressão, maior o ponto de orvalho e mais facilmente a água pode condensar.

Quando o ponto de orvalho é expresso nas condições de pressão do ar comprimido, recebe o nome de **ponto de orvalho sob pressão**, ou **PDP** (do inglês, *pressure dew point*).

2.12.2.1. Ponto de Orvalho versus Umidade Relativa

Agora podemos apresentar uma visão didática sobre o ponto de orvalho e a umidade relativa.

Uma outra forma de entender a umidade relativa é como uma relação entre a quantidade de vapor d'água existente e a capacidade que o ar tem de guardar água na forma de vapor e essa capacidade depende da temperatura e da pressão que o ar está submetido. Quanto maior a temperatura e menor a pressão, maior será essa capacidade.

Vamos dar um exemplo: Digamos que numa dada condição, uma certa quantidade de ar de um recipiente tenha capacidade para ter 10 partículas de água na forma de vapor, mas só tenha 8. Nessa situação temos umidade relativa $\emptyset = 80\ [\%]$.

Alguma condição mudou (pressão subiu e/ou temperatura baixo) e esse mesmo ar agora tenha capacidade para 8 partículas de vapor e não mais 10. Agora $\emptyset$ = 100 [%],

Se a condição muda novamente, e a capacidade do ar passa para 6 partículas. A umidade relativa continua 100 [%], mas duas partículas se condensam.

Essas situações são ilustradas na figura seguinte:

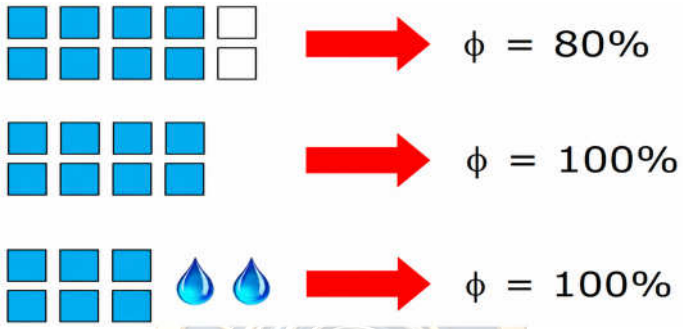


Figura 13: Umidade relativa em 3 condições diferentes (Fonte: Engenharia e Cia)

É justamente por causa disso que o ar comprimido apresenta água em alguns pontos, principalmente nos reservatórios.

Esse também é o princípio de funcionamento do secador de ar por refrigeração que resfria o ar numa dada condição para condensar o vapor existente. A temperatura atingida é o que distingue as máquinas de vários fabricantes.

2.12.3. Consequência Operacional

A quantidade de água que um compressor produz por hora é calculável, e pode ser levantamento importante para o dimensionamento de um separador água-óleo, da capacidade de drenagem ou para quantificar a carga de efluente para fins ambientais e de licenciamento.

Portanto, trata-se de cálculo secundário do processo de dimensionamento de compressores, podendo nem ser necessário em várias situações.

Por hora basta registrar a cadeia de causa e efeito, porque ela justifica metade dos componentes de um sistema de ar comprimido:

1. O ar atmosférico admitido contém vapor de água.
2. A compressão eleva a pressão parcial do vapor, aproximando a mistura da saturação.
3. A compressão eleva também a temperatura, que temporariamente aumenta a capacidade de retenção.
4. O resfriamento posterior derruba a temperatura, e o vapor excedente condensa.
5. A região imediatamente após o resfriador é, portanto, o ponto de maior formação de condensado da instalação.
6. Sem remoção, essa água segue para a rede e provoca corrosão, arraste e falha de componente.

> ***Atenção:*** Filtro não remove vapor de água. Filtro remove partícula sólida e água já condensada em fase líquida. Para retirar vapor é obrigatório secador. Essa confusão é comum em campo e resulta em rede aparentemente bem filtrada com água chegando ao ponto de uso.

2.13. Velocidade Do Som e O Número De Mach

A velocidade de propagação de uma perturbação de pressão em um gás, a velocidade do som, depende das propriedades do meio e da temperatura absoluta:

$$c = \sqrt{\kappa \cdot R_{esp} \cdot T} \tag{35}$$

Onde c = velocidade do som [m/s], k = expoente isentrópico (k = 1,4 para o ar) [adimensional], R_{esp} = constante específica do gás [J/(kg·K)] e T = temperatura absoluta [K].

O número de Mach (Ma) é a razão entre a velocidade média do escoamento (V) e a velocidade do som no meio (C), ou seja, muda em função do fluido em questão:

$$Ma = \frac{V}{c} \tag{36}$$

Essa grandeza adimensional é o critério que separa formalmente o escoamento incompressível do compressível. A convenção de engenharia adota (Ma = 0,3) como fronteira.

Abaixo disso, a variação de densidade é da ordem de poucos [%] e o erro de tratar o escoamento como incompressível é tolerável.

> ***Ponto-chave:*** É este número que explica por que ventilador pode ser calculado com o ferramental de mecânica dos fluidos incompressível aprendido no módulo de bombas, enquanto compressor não pode.

3. ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL E TERMODINÂMICA DA COMPRESSÃO

3.1. Introdução

O capítulo anterior estabeleceu como descrever o estado de um gás. Este estabelece o que acontece quando esse gás escoa e quando é comprimido.

É o capítulo mais teórico do módulo e, ao mesmo tempo, aquele de que todos os cálculos de compressor dependem: temperatura de descarga, potência absorvida, número de estágios e eficiência saem daqui.

Duas perguntas organizam o texto:

1) Quando um escoamento pode ser tratado como incompressível?
   Resposta que decide se o aluno usa o ferramental do Capítulo 1 ou precisa de outro.
2) Quanto custa comprimir um gás, e por quê?
   a resposta depende do caminho termodinâmico seguido.

Do ponto de vista de dimensionamento de compressores, normalmente, esses conceitos não são necessários para a maioria dos cálculos, no entanto, o seu conhecimento pode facilitar a identificação do funcionamento e de análises de sistemas com compressores, em geral.

Vamos apresentar aqui, a título de informação, inclusive com as fórmulas correspondentes, no entanto, não iremos aplicá-las do ponto de vista prático, durante a execução dos exercícios de dimensionamento.

3.2. Incompressível ou Compressível?

Todo gás é compressível. A pergunta prática não é essa, e sim se a variação de densidade ao longo do escoamento é grande o bastante para invalidar as equações escritas com densidade constante.

Como já vimos o critério é o número de Mach, no entanto, o número de Mach também é aplicado para classificar o regime de escoamento, conforme:

Regime	Faixa de Mach	Característica
Incompressível	Ma < 0,3	As consequências do escoamento compressível são desprezíveis.
Compressível	Ma > 0,3	As consequências do escoamento compressível não são desprezíveis.
Subsônico	Ma < 1	Perturbações de pressão se propagam para montante e para jusante
Sônico	Ma = 1	A velocidade do escoamento iguala a do som; condição de escoamento crítico
Supersônico	Ma > 1	Perturbações não se propagam para montante; surgem ondas de choque