

Índice

Capítulo 1 — Sistemas de unidades e propriedades dos fluidos	1
1.1 — Sistemas de unidades de medidas	1
1.1.1 — Unidades fundamentais e derivadas	1
1.1.2 — Sistemas básicos	2
1.2 — Propriedades dos fluidos	8
1.2.1 — Massa específica	8
1.2.2 — Volume específico	8
1.2.3 — Peso específico	8
1.2.4 — Densidade	9
1.2.5 — Pressão	11
1.2.6 — Viscosidade absoluta ou dinâmica	13
1.2.7 — Viscosidade cinemática	16
1.2.8 — Pressão de vapor	25
1.2.9 — Potencial de hidrogênio (pH)	28
1.2.10 — Tensão superficial	28
1.2.11 — Propriedades da água	28
Referências bibliográficas	29
Capítulo 2 — Análise dimensional e semelhança física	31
2.1 — Introdução	31
2.2 — Teorema π	31
2.3 — Cálculo dos grupos adimensionais	32
2.4 — Exemplo de análise dimensional	32
2.5 — Principais grupos adimensionais da mecânica dos fluidos	36
2.6 — Principais grupos adimensionais das máquinas hidráulicas	40
2.7 — Semelhança ou similaridade física aplicada	
a bombas dinâmicas	41
2.7.1 — Definição - Coeficientes de vazão e pressão	41
2.7.2 — Velocidade específica	42

2.7.3 — Eficiência e potência absorvida	43
Referências bibliográficas	44
 Capítulo 3 — Escoamento de fluidos em tubulações	45
3.1 — Classificação do escoamento	45
3.1.1 — Escoamento laminar ou turbulento	45
3.1.2 — Regime permanente e uniforme	47
3.1.3 — Escoamento compressível ou incompressível	47
3.2 — Conceitos básicos da mecânica dos fluidos	47
3.3 — Equação da continuidade	48
3.4 — Tubulações	52
3.4.1 — Normas ANSI	52
3.5 — Teorema de Bernouilli	55
3.6 — Adaptação do teorema de Bernouilli aos líquidos reais	58
3.7 — Perda de carga	58
3.7.1 — Perda de carga normal no regime laminar	58
3.7.2 — Perda de carga normal no regime turbulento	61
3.7.3 — Fórmulas teórico-experimentais para cálculo de perda de	
carga normal	64
3.7.4 — Perdas de carga localizadas	68
3.7.5 — Tabelas para cálculos de perda de carga	80
3.7.6 — Fórmulas de Hazen-Williams	88
3.7.7 — Fórmulas empíricas de perda de carga para pequenos	
diâmetros	91
3.8 — Associação de tubulações	94
3.8.1 — Tubulações em série	94
3.8.2 — Tubulações em paralelo	95
3.8.3 — Análise de redes de tubulações	96
3.9 — Determinação do diâmetro de tubulações	98
3.9.1 — Estimativa do diâmetro da tubulação de sucção	98
3.9.2 — Estimativa do diâmetro da tubulação de descarga	99
3.10 — Veia líquida com máquina hidráulica	101
3.11 — Teorema de Torricelli	103
Referências bibliográficas	104
 Capítulo 4 — Classificação e características gerais das bombas	105
4.1 — Classificação das bombas	105
4.2 — Características das bombas	106
4.2.1 — Turbobombas ou dinâmicas	106
4.2.2 — Volumétricas ou de deslocamento positivo	109
4.3 — Comparação entre bombas volumétricas e turbobombas	113
4.4 — Comentários gerais sobre turbobombas	
e bombas volumétricas	113
Referências bibliográficas	113

Capítulo 5 — Teoria básica das turbobombas 115

5.1 — Princípio de funcionamento	115
5.2 — Teoria do impelidor	117
5.3 — Curvas teóricas de funcionamento	120
5.4 — Curvas reais de funcionamento	123
5.4.1 — Curva característica - carga real (H) x vazão (Q)	123
5.4.2 — Curva característica - (potência absorvida x vazão)	125
5.5 — Curvas características para bombas axiais	127
Referências bibliográficas	128

Capítulo 6 — Desempenho da bomba centrífuga e determinação do ponto de trabalho em função do sistema 129

6.1 — Curva carga (H) x vazão (Q)	129
6.1.1 — Curva inclinada (<i>rising</i>)	130
6.1.2 — Curva ascendente/descendente (<i>drooping</i>)	130
6.1.3 — Curva altamente descendente (<i>steep</i>)	130
6.1.4 — Curva plana (<i>flat</i>)	131
6.1.5 — Curvas tipo estável	131
6.1.6 — Curvas tipo instável	131
6.2 — Curva de potência absorvida x vazão	131
6.2.1 — Potência útil cedida ao fluido (Pot_c)	131
6.2.2 — Potência absorvida pela bomba (Pot_{abs})	132
6.3 — Curva rendimento total (η) x vazão (Q)	133
6.4 — Formas de apresentação das curvas características	133
6.5 — Características do sistema	134
6.5.1 — Conceituação da altura manométrica do sistema	135
6.5.2 — Cálculo da altura manométrica de sucção (hs)	136
6.5.3 — Cálculo da altura manométrica de descarga (hd)	137
6.5.4 — Cálculo da altura manométrica total (H)	139
6.6 — Determinação da curva do sistema	140
6.7 — Determinação do ponto de trabalho	142
Referências bibliográficas	142

Capítulo 7 — Fatores que modificam a curva do sistema 143

7.1 — Influência da natureza do líquido bombeado	143
7.2 — Influência da temperatura do líquido bombeado	143
7.3 — Influência do nível de líquido - alturas estáticas de sucção e descarga	144
7.4 — Influência de modificações nas pressões dos reservatórios de sucção e/ou descarga	146
7.5 — Influência de alterações nas linhas de sucção e descarga	146
Referências bibliográficas	147

Capítulo 8 — Fatores que modificam as curvas características	149
8.1 — Principais grupos adimensionais relacionados com o desempenho das bombas centrífugas	149
8.2 — Efeito da mudança de rotação nas curvas características	150
8.3 — Efeito da variação do diâmetro do impelidor nas curvas características	152
8.4 — Efeito da natureza do líquido	155
8.4.1 — Influência da massa específica	155
8.4.2 — Influência da viscosidade	155
8.4.3 — Correção das curvas características operando com líquidos viscosos	156
8.5 — Efeito de alterações na geometria do impelidor nas curvas características	161
8.6 — Efeito do tempo de serviço da bomba nas curvas características	162
Referências bibliográficas	162
Capítulo 9 — Modificação do ponto de trabalho	163
9.1 — Objetivos da modificação do ponto de trabalho	163
9.2 — Maneiras de modificar o ponto de trabalho	163
9.2.1 — Variação da curva do sistema	163
9.2.2 — Variação das curvas da bomba	164
9.2.3 — Recirculação	165
Capítulo 10 — Cavitação	167
10.1 — Descrição do fenômeno de cavitação	167
10.1.1 — Conceituação clássica de cavitação	167
10.1.2 — Comparação entre cavitação e vaporização	169
10.1.3 — Inconvenientes da cavitação	169
10.1.4 — Cavitação, erosão e corrosão	174
10.1.5 — Conceituação moderna de cavitação	174
10.2 — Análise da cavitação em bombas	176
10.3 — Equacionamento da cavitação em bombas	177
10.4 — Curva NPSH _r x vazão	178
10.5 — Cálculo do NPSH disponível	179
10.6 — Critérios de avaliação das condições de cavitação	180
10.6.1 — Cálculo da vazão máxima permitível de uma bomba em um sistema	180
10.6.2 — Altura máxima de sucção	182
10.7 — Fatores que modificam o NPSH disponível	183
10.7.1 — Altura estática de sucção (Z_s)	183
10.7.2 — Altitude do local da instalação	183

10.7.3 — Temperatura de bombeamento	183
10.7.4 — Tipo de líquido bombeado	183
10.7.5 — Tipo de entrada, comprimento, diâmetro e acessórios da tubulação de sucção	183
10.7.6 — Vazão	183
10.8 — Fatores que modificam o NPSH requerido e procedimentos para melhorar o desempenho das bombas quanto à cavitação	183
10.8.1 — Possibilidade de redução da perda na entrada da bomba (h_{fi})	184
10.8.2 — Possibilidade de redução das velocidades absoluta e relativa no olho do impelidor (V_1) e (V_{r1})	184
10.8.3 — Uso do indutor	186
10.8.4 — Variação da rotação	187
10.9 — Comportamento dos materiais quanto à cavitação	187
10.9.1 — Influência da composição química do material	188
10.9.2 — Influência das características metalúrgicas	188
10.9.3 — Influência das características mecânicas	189
10.9.4 — Influência de outras características do material	189
10.9.5 — As fases de danificação do material	189
10.10 — Termodinâmica da cavitação, NPSH para bombas operando com água em temperatura elevada, hidrocarboneto e condensado	190
10.10.1 — NPSH para bombas operando com água a temperaturas elevadas	191
10.10.2 — NPSH para bombas operando com hidrocarbonetos	193
10.10.3 — NPSH para bombas de condensado	195
10.11 — Cavitação em condições anormais de operação	197
10.11.1 — Distúrbios ou bloqueios parciais na linha de sucção ou entrada da bomba	197
10.11.2 — Vazamento excessivo através dos anéis de desgaste	197
10.11.3 — Cavitação na voluta	199
10.11.4 — Cavitação nas pás difusoras	199
10.11.5 — Fluxo em sentido inverso na tubulação de sucção	200
10.11.6 — Efeito de impurezas no líquido bombeado	201
Referências bibliográficas	201
Capítulo 11 — Semelhança física/Velocidade específica	203
11.1 — Conceito de velocidade específica	203
11.2 — Cálculo da velocidade específica (N_s)	205
11.3 — Aplicações da velocidade específica	206
11.3.1 — Primeira aplicação da velocidade específica	206
11.3.2 — Segunda aplicação da velocidade específica	208
11.3.3 — Determinação da rotação máxima permitível em função do tipo de bomba e das características do sistema	214
11.4 — Correções na determinação da velocidade específica máxima	219

11.5 — Velocidade específica de sucção	220
11.5.1 — Parâmetro de cavitação de Thoma (σ)	220
11.5.2 — Cálculo da velocidade específica de sucção (SSS)	221
11.5.3 — Consideração quanto à velocidade específica de sucção (SSS)	221
11.5.4 — Aplicações da velocidade específica de sucção (SSS)	222
11.5.5 — Limitação da velocidade específica de sucção (SSS)	228
11.5.6 — Análise do diâmetro da tubulação de sucção	228
Referências bibliográficas	229

Capítulo 12 — Turbobombas - classificação, descrição e análise dos componentes 231

12.1 — Impelidor (rotor)	232
12.2 — Carcaça	234
12.2.1 — Tipos de carcaça	234
12.2.2 — Classificação quanto à bipartição da carcaça	239
12.3 — Eixo e luva de eixo	243
12.3.1 — Eixo	243
12.3.2 — Luva de eixo	245
12.4 — Anéis de desgaste	246
12.5 — Vedação por gaxetas	250
12.5.1 — Bucha de garganta	251
12.5.2 — Conexão para líquido de selagem/anel de lanterna	251
12.6 — Vedação por selo mecânico	253
12.6.1 — Princípio dos selos mecânicos	253
12.6.2 — Selo mecânico duplo	257
12.6.3 — Selos balanceados e não balanceados	258
12.6.4 — Selos de produção padronizada para serviços leves	258
12.6.5 — Selos mecânicos/dispositivos auxiliares	259
12.7 — Mancais	263
12.7.1 — Tipos de mancais	263
12.7.2 — Mancais de rolamentos, tipos e aplicações	263
12.7.3 — Lubrificação de mancais de rolamentos	265
12.7.4 — Mancais de deslizamento	267
12.7.5 — Lubrificação de mancais de deslizamento	269
12.7.6 — Resfriamento da caixa do mancal	272
12.8 — Acoplamentos	272
12.8.1 — Acoplamentos rígidos	272
12.8.2 — Acoplamentos flexíveis	272
12.9 — Elementos de suporte e fixação	275
12.9.1 — Elementos de suporte para bombas horizontais	275
12.9.2 — Bases metálicas	277
12.9.3 — Elementos de suporte para bombas verticais	277
Referências bibliográficas	278

Capítulo 13 — Esforços axiais em bombas de simples e múltiplos estágios	279
13.1 — Empuxo axial em bombas de simples estágio e dupla sucção	279
13.2 — Empuxo axial em bombas de simples estágio e simples sucção	280
13.2.1 — Furos de balanceamento	280
13.2.2 — Pás na parte posterior do impelidor	281
13.3 — Empuxo axial em bombas de múltiplos estágios	281
13.3.1 — Arranjo balanceado dos estágios	282
13.3.2 — Tambor de balanceamento	282
13.3.3 — Disco de balanceamento	283
13.3.4 — Combinação tambor/disco de balanceamento	283
Referência bibliográfica	284
Capítulo 14 — Seleção e especificação de bombas	285
14.1 — Seleção do tipo de bomba	286
14.1.1 — Turbobombas (centrífugas e axiais) - Características gerais - Limites de aplicação - Normas de projeto de construção	286
14.1.2 — Bombas rotativas - Características gerais e limites de aplicação	291
14.1.3 — Bombas regenerativas - Campo de aplicação e limitações	292
14.1.4 — Bombas alternativas - Campo de aplicação e limitações ..	293
14.1.5 — Critérios de seleção do tipo de bomba	294
14.2 — Seleção do modelo da bomba	296
14.3 — Escolha dos materiais de construção	297
14.4 — Determinação dos detalhes construtivos	298
14.5 — Elaboração da requisição de material	299
14.5.1 — Documentação requerida para proposta de fornecimento de bombas	304
14.5.2 — Documentação requerida para aprovação após a autorização de fornecimento da bomba	305
14.5.3 — Documentação mínima a ser contida no Manual de Instruções	306
14.6 — Preparo da lista de fornecedores e envio das respectivas consultas	306
14.7 — Análise das propostas e parecer técnico conclusivo	307
14.7.1 — Critérios técnicos	307
14.7.2 — Critérios econômico-financeiros	309
14.8 — Análise de desenhos e documentos do fabricante	309
14.9 — Instruções e testes finais de aceitação (na fábrica e/ou no campo)	310
Referências bibliográficas	310

Capítulo 15 — Seleção de materiais e componentes	311
15.1 — Seleção de materiais	311
15.2 — Principais materiais - características e limitações	312
15.2.1 — Ferro fundido	312
15.2.2 — Aço carbono	313
15.2.3 — Aço inoxidável	313
15.2.4 — Ligas contendo níquel	313
15.2.5 — Bronze	314
15.3 — Seleção dos materiais utilizados nos principais componentes das bombas	314
15.3.1 — Materiais para carcaça	314
15.3.2 — Material do impelidor	315
15.3.3 — Material para anéis de desgaste, eixos, luvas e sobrepostas	315
15.4 — <i>Pumps fittings</i>	316
15.4.1 — Nomenclatura	316
15.4.2 — Definição	316
15.5 — Escolha do material	316
15.5.1 — Influência do pH	317
15.5.2 — Formação de pares galvânicos	317
15.5.3 — Influência das características estruturais	318
15.5.4 — Influência do fator de carga	318
15.5.5 — Influência da evolução dos materiais	319
15.6 — Recomendações sobre peças sobressalentes	320
15.7 — Tabelas práticas de seleção de materiais	320
15.8 — Seleção de componentes	333
15.8.1 — Gaxetas x selos mecânicos	333
15.8.2 — Seleção do material das gaxetas	333
15.8.3 — Seleção dos selos mecânicos	337
15.8.4 — Seleção do material de juntas de vedação	350
15.8.5 — Seleção de mancais	352
15.8.6 — Seleção do plano de refrigeração de componentes	354
15.8.7 — Seleção de acoplamentos	358
Referências bibliográficas	359
Capítulo 16 — Associação de bombas	361
16.1 — Associação de bombas em série	361
16.1.1 — Obtenção da curva característica do conjunto	362
16.1.2 — Seleção de bombas em série	362
16.2 — Associação de bombas em paralelo	363
16.2.1 — Determinação do ponto de trabalho de bombas operando em paralelo	364
16.2.2 — Recomendações para seleção de bombas para operar em paralelo	367

16.3 — Fluxo com ramificações	367
Referência bibliográfica	370
Capítulo 17 — Testes	371
17.1 — Classificação dos testes	371
17.1.1 — Quanto ao local	371
17.1.2 — Quanto à rotação	371
17.1.3 — Quanto ao líquido	371
17.1.4 — Quanto ao acompanhamento	371
17.1.5 — Quanto à finalidade	372
17.2 — Teste hidrostático	372
17.3 — Teste de desempenho	372
17.3.1 — Execução do teste de desempenho	374
17.4 — Teste de cavitação	377
17.4.1 — Arranjos propostos pelo Hydraulic Institute	377
17.4.2 — Execução do teste e determinação do NPSH requerido ...	378
17.5 — Correção de velocidade	380
17.6 — Teste em modelo	381
17.7 — Teste de escorva	382
17.8 — Limites aceitáveis de vibração e ruído	384
17.8.1 — Limite de vibração	384
17.8.2 — Limite de ruído	385
Referências bibliográficas	385
Capítulo 18 — Instalação	387
18.1 — Introdução	387
18.2 — Preparo para o embarque	387
18.3 — Inspeção de recebimento	388
18.4 — Armazenamento	388
18.5 — Localização da bomba	388
18.6 — Fundações	389
18.7 — Alinhamento	390
18.8 — Tubulações auxiliares	390
18.8.1 — Cuidados com a tubulação de sucção	391
18.8.2 — Cuidados com a tubulação de descarga	393
18.8.3 — Tubulações auxiliares	393
Referências bibliográficas	393
Capítulo 19 — Operação	395
19.1 — Operação com fluxo reduzido	395
19.2 — Escorva	398

19.2.1 — Escorva com utilização de válvula de pé	398
19.2.2 — Escorva por meio de tanque de escorva	399
19.2.3 — Escorva por meio de ejetor	401
19.2.4 — Escorva por meio de bomba de vácuo	402
19.3 — Partida de uma bomba centrífuga	402
19.4 — Parada de uma bomba centrífuga	403
Referência bibliográfica	404
Capítulo 20 — Manutenção	405
20.1 — Manutenção preventiva	405
20.1.1 — Inspeções diárias	405
20.1.2 — Inspeções mensais	406
20.1.3 — Inspeções semi-anuais	406
20.1.4 — Inspeção anual	406
20.2 — Manutenção preditiva	406
20.3 — Manutenção corretiva	406
20.3.1 — Diagnóstico	406
20.3.2 — Correção	414
Referência bibliográfica	414
Capítulo 21 — Alinhamento	415
21.1 — Definição	415
21.2 — Tipos de desalinhamento	415
21.3 — Medição e correção do desalinhamento radial ou paralelo	416
21.3.1 — Correção do desalinhamento radial no plano vertical	418
21.3.2 — Correção do desalinhamento radial no plano horizontal ...	418
21.4 — Medição e correção do desalinhamento axial ou angular	419
21.4.1 — Correção do desalinhamento angular no plano vertical	420
21.4.2 — Correção do desalinhamento angular no	
plano horizontal	421
21.5 — Desalinhamento misto (radial + angular)	422
21.6 — O método reverso	423
21.6.1 — Alinhamento no plano vertical	424
21.6.2 — Alinhamento no plano horizontal	424
21.7 — Tolerâncias no alinhamento	425
21.8 — Dilatação a quente	425
Referências bibliográficas	425
Capítulo 22 — Vibrações	427
22.1 — Conceituação de vibração	427
22.2 — Vibração composta	429

22.3 — Fase de vibração	430
22.4 — Instrumentos de medição	431
22.4.1 — Sensor sísmico de velocidade	431
22.4.2 — Sensor sísmico de aceleração (acelerômetros)	431
22.4.3 — Sensor sem contato	431
22.4.4 — Medidores de freqüência	431
22.4.5 — Medidores de ângulo de fase	431
22.4.6 — Medidor de órbitas	432
22.4.7 — Analisador de tempo real	432
22.5 — Método de medição	432
22.5.1 — Medição sobre os mancais	432
22.5.2 — Medição sobre outras partes estacionárias	432
22.5.3 — Medida no eixo sem contato direto	433
22.5.4 — Medida no eixo por contato direto	433
22.6 — Critérios de severidade da vibração	433
22.6.1 — Critério de T.C. Rathbone	433
22.6.2 — Critério de Michael Blake	434
22.6.3 — Critério da IRD	434
22.6.4 — Critério de Steve Maten	435
22.6.5 — Critério do API	436
22.6.6 — Critério da ISO	436
22.7 — Correlação vibração x causa	437
22.8 — Acompanhamento da vibração em bombas	437
22.9 — Velocidades críticas	438
Referências bibliográficas	439
 Capítulo 23 — Informações práticas para manutenção de bombas centrífugas	441
23.1 — Informações quanto à carcaça	441
23.2 — Informações quanto ao conjunto rotativo	442
23.3 — Informações quanto aos anéis de desgaste	443
23.4 — Informações quanto à bucha de garganta	444
23.5 — Informações quanto a mancais de deslizamento	444
23.6 — Informações quanto a mancais de rolamento	444
23.7 — Retentores	445
23.8 — Acoplamento	446
Referências bibliográficas	446
 Capítulo 24 — Bombas alternativas	447
24.1 — Classificação das bombas alternativas	447
24.1.1 — Quanto ao acionador	447
24.1.2 — Quanto à posição do(s) cilindro(s)	447
24.1.3 — Quanto ao número de cilindros de líquido	447

24.1.4 — Quanto à ação de bombeamento	447
24.1.5 — Quanto ao órgão movimentador do líquido	448
24.1.6 — Quanto ao curso do pistão	448
24.2 — Características construtivas	448
24.3 — Nomenclatura das bombas alternativas	450
24.4 — Cálculo da vazão	450
24.4.1 — Volume deslocado	450
24.4.2 — Vazão média por segundo	450
24.4.3 — Vazão instantânea	451
24.5 — Controle da vazão	452
24.6 — Especificação de bombas alternativas	452
24.7 — Testes	455
24.7.1 — Teste hidrostático	456
24.7.2 — Teste de desempenho	456
24.8 — Instalação	456
24.9 — Operação	457
24.9.1 — Partida de bombas alternativas de força	457
24.9.2 — Partida de bombas alternativas de ação direta	457
24.9.3 — Procedimentos de parada de bombas alternativas	457
24.10 — Manutenção	458
24.10.1 — Problemas operacionais e possíveis causas	458
24.10.2 — Dados práticos de manutenção	460
Referências bibliográficas	461
 Capítulo 25 — Bombas rotativas	463
25.1 — Classificação - características construtivas	463
25.2 — Cálculo da vazão e potência das bombas rotativas	466
25.3 — Controle da vazão	466
25.4 — Especificação das bombas rotativas	467
25.5 — Testes	467
25.5.1 — Teste hidrostático	467
25.5.2 — Teste de desempenho	467
25.6 — Instalação	
25.7 — Operação	469
25.7.1 — Partida de bombas rotativas	469
25.7.2 — Paradas de bombas rotativas	469
25.8 — Manutenção	469
25.8.1 — Problemas operacionais e possíveis causas	469
25.8.2 — Dados práticos de manutenção	471
Referências bibliográficas	474