EDUCACIONAL

Pós Graduação Lato Sensu

Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais



Bombas Centrífugas

Micelli R. Camargo

BOMBAS CENTRÍFUGAS

Do Princípio de Funcionamento ao Diagnóstico de Falhas

Micelli Rodrigues Camargo

São Paulo, 23 de Março 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

Aviso técnico

Este material não substitui recomendações de fabricantes, normas, procedimentos de segurança (ABNT, ASME, API, etc.).

Índice:

APRESENTAÇÃO 12
ORGANIZAÇÃO DA PÓS-GRADUAÇÃO 13
APOIO INSTITUCIONAL 14
OBJETIVOS 14
1. INTRODUÇÃO 15
1.1. Definição das Bombas 15
1.2. Classificação Quanto à Transformação de Energia 15
1.2.1. Bombas Hidrostáticas, Volumétricas ou de Deslocamento Positivo 15
1.2.2. Bombas Hidrodinâmicas ou Bombas Rotodinâmicas 16
1.2.3. Comparativo entre Bombas Hidrostáticas e Hidrodinâmicas 16
1.3. Classificação das Bombas Quanto à Função 17
1.3.1. Bombas de Transferência 17
1.3.2. Bombas de Dosagem 18
1.3.3. Bombas de Pressurização 20
2. CLASSIFICAÇÃO DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS 21
2.1. Introdução 21
2.2. Classificação Quanto ao Regime de Escoamento Interno 22
2.2.1. Bombas Radiais (Centrífugas) 22
2.2.2. Bombas de Fluxo Misto 22
2.2.3. Bombas Axiais 23
2.2.4. Rotação Específica (Velocidade Específica) 23
2.2.5. Classificação na Prática Industrial 25
2.3. Classificação Quanto À Orientação do Eixo 25
2.3.1. Bombas de Eixo Horizontal 25
2.3.2. Bombas de Eixo Vertical 26
2.4. Classificação Quanto à Configuração Mecânica ou Suporte 27
2.4.1. Rotor em Balanço ou Cantilever 27
2.4.2. Rotor Entre Mancais (Bi-Apoiada) 28
2.4.3. Vertical Suspensa 28
2.5. Classificação Quanto ao Número de Rotores ou Estágios 29
2.5.1. Bombas Monoestágio 29
2.5.2. Bombas Multi-Estágio 29
2.6. Classificação Quanto às Conexões de Sucção e de Descarga 30
2.6.1. End-Top 30
2.6.2. Side-Side 31

2.6.3. Top-Top 31
2.6.4. Back Pull-Out (BPO) 32
3. FUNDAMENTOS DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS 33
3.1. Princípio de Funcionamento de Uma Bomba Centrífuga 33
3.2. Escorvamento ou Escorva da Bomba 35
3.3. Bombas Afogada e Não-Afogada 36
3.4. Procedimentos de Escorvamento em Bombas 37
3.4.1. Preenchimento Prévio da Tubulação de Sucção 38
3.4.2. Escorvamento por Tanque de Escorva 39
3.4.3. Uso de Bomba de Vácuo 39
3.4.4. Bombas Centrífugas Autoescorvantes 40
3.5. Limitação Física da Altura de Sucção 40
3.5.1. Limite Teórico 40
3.5.2. Influência da Massa Específica 41
3.5.3. Limitação Prática 41
3.5.4. Soluções para Alturas de Sucções Elevadas 41
3.5.4.1. Pressurização do reservatório 41
3.5.4.2. Utilização de bombas submersíveis 42
3.5.4.3. Bombas verticais de eixo prolongado 42
3.5.4.4. Sistemas com bomba de reforço (injeção) 42
3.5.4.5. Sistema de Injeção de Ar Comprimido (Air Lift) 42
4. COMPONENTES DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS 44
4.1. Rotor 44
4.2. Caixa Espiral, Voluta ou Corpo Espiral 46
4.3. Difusor 46
4.4. Eixo 47
4.5. Luva de Proteção do Eixo 47
4.6. Anéis de Desgastes ou Placas de Desgastes 47
4.7. Caixa de Vedação ou Caixa de Selagem 48
4.8. Elementos de Vedação 49
4.8.1. Gaxeta 49
4.8.2. Selos Mecânicos 49
4.8.3. Acoplamento Magnético Radial 50
4.8.4. Acoplamento 51
4.9. Materiais de Construção 52
4.9.1. Carcaça e Voluta 53

4.9.1.1. Ferro fundido cinzento e nodular 53
4.9.1.2. Aço carbono 53
4.9.1.3. Aços inoxidáveis 53
4.9.1.4. Ligas especiais 54
4.9.2. Rotor 54
4.9.2.1. Materiais para serviços com fluidos limpos e corrosivos 54
4.9.2.2. Materiais para serviços abrasivos 54
4.9.3. Anéis de Desgaste 55
4.9.4. Eixo 55
4.9.5. Luva de Proteção do Eixo (sleeve) 55
4.9.6. Materiais de Vedação 56
4.9.6.1. Elastômeros para vedações secundárias e anéis O 56
4.9.6.2. Faces do selo mecânico 57
4.9.7. Tabela Consolidada 57
4.9.8. Tabela Complementar — Materiais de Vedação 58
5. CURVAS E DESEMPENHO 60
5.1. As Curvas Características: Visão Geral 60
5.2. Curva Altura Manométrica (HB) versus Vazão (Q): 61
5.2.1. Como a Curva é Obtida? 61
5.2.2. Forma Típica da Curva HB × Q 62
5.3. Campo Básico de Funcionamento: Múltiplos Diâmetros 63
5.4. Curva do Sistema (CS) 64
5.5. Ponto de Operação (PO) 65
5.6. Campo Básico de Funcionamento: Múltiplas Rotações 65
5.7. Mapa de Seleção de Bombas 66
5.8. Curva Potência Absorvida (Pe) versus Vazão (Q) 66
5.8.1. Relação entre Potências e Rendimento 67
5.9. Curva Rendimento (η) versus Vazão (Q) e o BEP 67
5.9.1. Rendimento Hidráulico (ηH) 68
5.9.2. Rendimento Volumétrico (ηV) 69
5.9.3. Rendimento Mecânico (ηm) 69
5.9.4. Fatores Hidrodinâmicos 70
5.9.5. Consequências de Operar Fora do BEP 70
5.10. Curva NPSHr versus Vazão (Q) 72
5.11. Leis de Afinidade: Mudança das Curvas 73
5.11.1. Mudança de Curva pela Rotação 73

5.11.2. Mudança de Curva pelo Diâmetro 74
5.11.3. Resumo das Leis de Afinidade 75
5.12. Correção das Curvas pela Viscosidade 75
5.13. Associação de Bombas 77
5.13.1. Associação de Bombas em Paralelo 77
5.13.2. Associação de Bombas em Série 79
5.14. Cavitação 81
6. TIPOS ESPECIAIS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS 83
6.1. Bomba Centrífuga Multiestágios 83
6.1.1. Princípio Construtivo 83
6.1.2. Características de Desempenho 85
6.1.3. Aplicações Típicas 85
6.1.4. Curvas Características 85
6.1.5. Limitações e Cuidados Operacionais 86
6.2. Bomba Centrífuga Autoescorvante 87
6.2.1. Características Construtivas 87
6.2.2. Princípio de Funcionamento 88
6.2.3. Aplicações e Limitações 89
6.2.4. Curvas Características 90
6.3. Bomba Centrífuga Submersível 90
6.3.1. Princípio Construtivo 91
6.3.2. Vantagens e Limitações 92
6.4. Bomba Centrífuga Plástica 93
6.4.1. Materiais Utilizados e suas Aplicações 93
6.4.2. Características Construtivas e Limitações 94
6.4.3. Associação com Acoplamento Magnético 94
6.5. Bomba Centrífuga para Fluido Térmico (Óleo Térmico) 95
6.5.1. Solução Construtiva: O Projeto de Resfriamento 95
6.5.2. Aplicações e Cuidados Operacionais 96
6.6. Bomba Centrífuga Hermética e Semi-Hermética 96
6.7. Bomba Centrífuga Sanitária 97
6.7.1. Requisitos Normativos: 3A e EHEDG 97
6.7.2. Características Construtivas 97
6.7.3. Variantes para a Indústria Farmacêutica e Biotecnológica 98
6.8. Bomba de Polpa (Slurry Pump) 99
6.8.1. Curvas Características 100

6.8.2. Desafio do Desgaste Abrasivo 100
6.8.3. Soluções Construtivas 100
6.8.4. Critério de Seleção: Borracha ou Liga Dura? 101
6.8.5. Influência da Polpa no Desempenho Hidráulico 102
6.8.6. Influência da Concentração de Sólidos 102
6.8.7. Velocidade do Fluido e Taxa de Desgaste 103
6.8.8. Velocidade Mínima de Transporte 103
6.9. Bombas Verticais Suspensas 104
6.9.1. Princípio Construtivo 104
6.9.2. Curvas Características 105
6.9.3. Campo de Aplicação 106
6.9.3.1. Abastecimento de água e saneamento básico 106
6.9.3.2. Geração de energia e processo industrial 106
6.9.3.3. Irrigação e agronegócio 107
6.9.3.4. Normas aplicáveis e critérios de seleção por setor 107
6.9.3.5. Bombas Verticais para Mineração 107
6.10. Bomba com Rotor Vortex 110
6.10.1. Princípio de Funcionamento 110
6.10.2. Características de Desempenho 111
6.10.3. Aplicações Típicas 111
6.11. Bomba Helicoidal Centrífuga (Híbrida) 111
6.11.1. Princípio Construtivo 112
6.11.2. Comportamento Hidráulico Híbrido 112
6.11.3. Curvas Características 113
6.11.4. Aplicações Industriais 113
6.11.5. Comparação com a Bomba Vortex 114
6.12. Bomba de Fluxo Axial (Bomba Hélice) 114
6.12.1. Princípio Construtivo 114
6.12.2. Características de Desempenho 115
6.12.3. Aplicações Típicas 116
6.13. Bombas Anfíbias 116
6.13.1. Conceito e Princípio de Funcionamento 116
6.13.2. Tipos de Rotores 117
6.13.3. Seleção de Materiais 117
6.13.4. Formas de Instalação 118
6.13.5. Aplicações Típicas 120

7. MANUTENÇÃO, DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DE FALHAS 121
7.1. Documentação Técnica 121
7.1.1. Vista Explodida 121
7.1.2. Desenho de Conjunto 123
7.2. Balanceamento do Rotor 124
7.2.1. Consequências do Desbalanceamento 124
7.2.2. Norma ISO 21940 (Graus de Balanceamento) 124
7.2.3. Como é Feito o Balanceamento 125
7.3. Alinhamento Motor-Bomba 126
7.3.1. Por que o Desalinhamento é Tão Prejudicial 127
7.3.2. Causas Principais de Desalinhamento 127
7.3.3. Métodos de Alinhamento: Comparativo 128
7.4. Retentores (Selos de Lábio) 129
7.4.1. Rugosidade do Eixo: A Janela Crítica 129
7.4.2. Velocidade Periférica: Limite por Material 130
7.4.3. Excentricidade e Interferência de Montagem 131
7.5. Gaxetas de Compressão 131
7.5.1. O Gotejamento Necessário 132
7.5.2. Diagnóstico de Falhas em Gaxetas 132
7.6. Selos Mecânicos: Teste de Integridade 133
7.7. Lubrificação de Mancais - Princípios e Gestão 134
7.7.1. Lubrificação por Óleo 134
7.7.2. Lubrificação por Graxa 134
7.7.3. Análise de Óleo como Ferramenta Preditiva 134
7.8. Falhas e Desgaste em Rotores 135
7.9. Tabela de Diagnóstico Operacional 136
8. OPERAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS 138
8.1. Partida a Seco: A Falha que Acontece em Segundos 138
8.1.1. A Física do Dano: Por que Segundos São Suficientes 138
8.1.2. Vulnerabilidade por Tipo de Vedação 139
8.1.3. Causas Comuns de Partida a Seco 140
8.1.4. Prevenção: Projeto e Procedimento 140
8.1.4.1. No projeto da instalação: 140
8.1.4.2. No procedimento operacional: 141
8.2. Sequência de Primeira Partida - Análise Passo a Passo 142
8.3. Aspectos Elétricos Relevantes para a Operação 143

8.3.1. Corrente de Partida e Seus Efeitos Mecânicos 143
8.3.2. Métodos de Partida 143
8.3.3. Proteções Elétricas Essenciais 144
8.4. Procedimentos de Partida 145
8.5. Procedimentos de Parada: Normal e Emergencial 146
8.5.1. Parada Normal: Controle do Golpe Hidráulico 146
8.5.2. Parada de Emergência: Riscos Específicos 147
8.6. Golpe de Aríete: Consequências e Mitigação 147
8.6.1. Mecanismo Físico 148
8.6.2. Consequências Práticas 148
8.6.3. Mitigação: Soluções de Projeto e Operacionais 148
8.7. Operação com Vazão Mínima: Limites e Proteções 149
8.7.1. O que Acontece em Baixa Vazão 149
8.7.2. Vazão Mínima Admissível 149
8.7.3. Linha de Recirculação - Projeto e Operação 150
8.8. Monitoramento durante Operação: Parâmetros e Alertas 150
8.8.1. O Conceito de Baseline Operacional 151
8.9. Operação de Bombas em Paralelo e em Série 151
8.9.1. Partida de Bomba em Paralelo 151
8.9.2. Partida de Bomba em Série 152
8.9.3. Parada com Múltiplas Bombas 152
9. BIBLIOGRAFIA 153
9.1. Livros 153
9.2. Normas Técnicas 153
9.3. Publicações da Hydraulic Institute 153
9.4. Fabricantes de Bombas Consultados 153
10. ANEXO 154
10.1. Massa Específica (ρ): 154
10.2. Peso Específico (γ): 154
10.3. Gravidade Específica (SG) ou Densidade Relativa: 154
10.4. Viscosidade Dinâmica (μ): 155
10.5. Viscosidade Cinemática (ν) ou Viscosidade Relativa: 155
10.6. Conceito de Pressão (p) 155
10.7. Pressão Hidrostática 156
10.8. Carga de Pressão 156
10.9. Pressão Absoluta, Manométrica e Vacuométrica 156

10.10. Pressão de Vapor (PV) 156
10.10.1.1. Pressão de Vapor da Água 157
10.10.1.2. Pressão de Vapor de Outros Fluidos 157

Sobre o Autor e Coordenador do Curso



🎓 Formação Acadêmica

Micelli Camargo é Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Mestre em Ciência 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 Linked In. 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 disciplina **Bombas Centrífugas** tem como objetivo apresentar, de forma aplicada, os princípios de funcionamento, os aspectos construtivos e o comportamento hidráulico das bombas centrífugas utilizadas em sistemas industriais de movimentação de fluidos.

Diferentemente de abordagens puramente descritivas, este material integra fundamentos físicos, interpretação de curvas características e análise de aspectos construtivos relevantes para a seleção, operação e diagnóstico de bombas em aplicações reais.

Ao longo da disciplina, o aluno terá contato com os principais componentes das bombas centrífugas, os critérios que influenciam seu desempenho, as limitações operacionais e as variações construtivas existentes para diferentes tipos de processo industrial.

A proposta didática privilegia a compreensão física do funcionamento da bomba, a interpretação correta das curvas características e a análise crítica das condições de operação, preparando o profissional para especificar, avaliar e aplicar bombas centrífugas com maior segurança técnica.

O enfoque adotado busca reduzir a distância entre teoria e prática, permitindo que o aluno compreenda não apenas como a bomba funciona, mas também porque determinados problemas ocorrem em campo e como evitá-los por meio de uma especificação adequada.

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 como 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:**
  A **Science, Tecnology and Advance Reseach Institute** é 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, através da distribuição exclusiva de sopradores, bombas centrífugas e dosadoras, bombas de vácuo, válvulas de mangote e rotâmetros da **OMEL.**

OBJETIVOS

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

- Compreender o princípio de funcionamento das bombas centrífugas sob o ponto de vista físico e energético
- Identificar os principais componentes construtivos das bombas centrífugas e suas funções
- Interpretar corretamente as curvas características
- Compreender o conceito de ponto de operação e sua relação com a curva do sistema
- Avaliar a influência das condições de sucção no desempenho da bomba
- Compreender o fenômeno da cavitação e suas implicações práticas
- Analisar o comportamento de bombas associadas em série e em paralelo
- Identificar os principais tipos construtivos de bombas centrífugas utilizados na indústria
- Reconhecer limitações operacionais relacionadas a materiais, vedação e condições de processo
- Desenvolver raciocínio técnico para análise de desempenho e diagnóstico de problemas básicos de operação

1.INTRODUÇÃO

1.1. Definição das Bombas

Bombas são máquinas hidráulicas que transformam energia mecânica fornecida por um motor elétrico, motor a combustão ou turbina em energia hidráulica.

A energia hidráulica recebida pelo líquido se caracteriza pela vazão produzida e o aumento de pressão, entre a sucção e descarga da bomba.

As bombas são utilizadas com o objetivo de transportar um líquido de um ponto para o outro, fornecer uma quantidade controlada de vazão ou manter um sistema pressurizado, daí vem a classificação que veremos a seguir:

1.2. Classificação Quanto à Transformação de Energia

As bombas podem transformar a energia mecânica recebida em energia hidráulica de duas maneiras distintas, e portanto, são classificadas como:

- **Bombas hidrostáticas, bomba de deslocamento positivo ou bombas volumétricas**:
  Essas são bombas que promovem o escoamento por meio do deslocamento volumétrico e não geram pressão propriamente dito, o aumento de pressão é correspondente à resistência ao escoamento.
- **Bombas hidrodinâmicas, rotodinâmicas ou bombas de fluxo**:
  Nessas máquinas, a energia é inicialmente transferida ao fluido na forma de energia cinética, por meio do aumento da velocidade do escoamento provocado pelo rotor. Em seguida, parte dessa energia cinética é convertida em energia de pressão no interior da própria bomba, principalmente no difusor ou na voluta.

1.2.1. Bombas Hidrostáticas, Volumétricas ou de Deslocamento Positivo

Estas são as bombas que promovem a movimentação do fluido por meio de um deslocamento volumétrico, daí o nome “bomba volumétrica”.

Elas possuem um ou mais componentes que se movimenta “empurrando” o fluido em questão.

A pressão de descarga aumenta em função da resistência ao escoamento encontrado no sistema, em outras palavras, se você colocar um manômetro na descarga da bomba que descarrega o produto logo após o manômetro, você verificará que a pressão indicada no manômetro é praticamente zero, por outro lado, se você também colocar uma válvula após o manômetro, à medida que você for fechando o manômetro, a pressão irá subir gradativamente.

Academicamente, bomba de deslocamento positivo é aquela em que a transformação de energia mecânica em energia de pressão não acontece com variação de energia cinética (mudança de velocidade) quando o fluido passa pelo elemento ativo do equipamento.

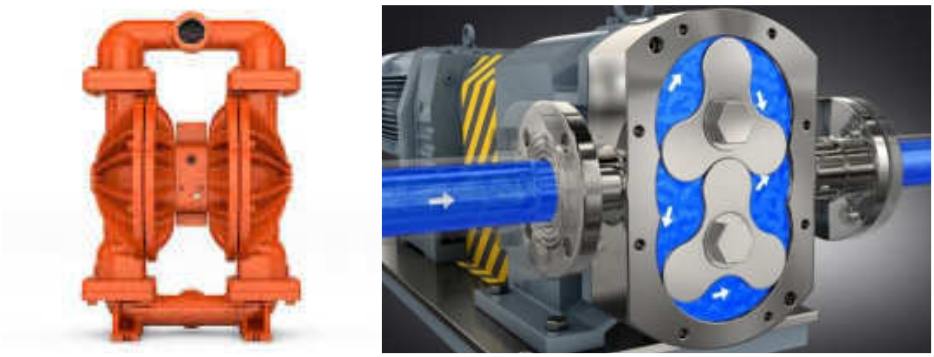


Figura 1: Bomba pneumática (à esquerda) e bomba de lóbulos (à direita) (Fonte: Vallair e Alfa)

Como exemplos, podemos citar as bombas de pistão, bombas de engrenagens, bombas de duplo diafragma operadas a ar (pneumáticas), bombas peristálticas, bombas de lóbulos, entre outros.

1.2.2. Bombas Hidrodinâmicas ou Bombas Rotodinâmicas

São bombas cujo princípio de elevação de pressão se baseia primeiro no aumento de velocidade do escoamento para posterior conversão em pressão.

Em outras palavras, a energia mecânica aumenta a energia cinética que posteriormente se transforma em energia de pressão.

Como exemplos, temos as bombas centrífugas, mistas e axiais.

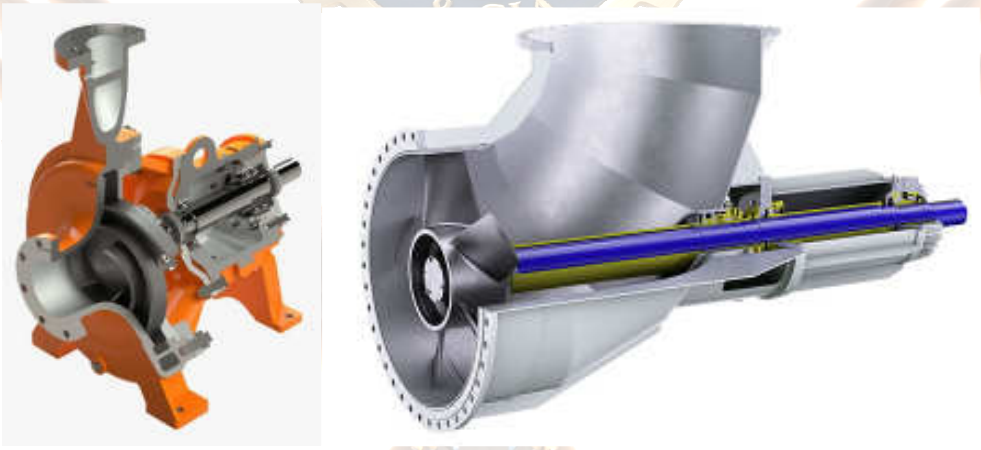


Figura 2: Bombas de fluxo – Centrífuga (à esquerda) e Axial (à direita) (Fonte: OMEL e Sulzer)

1.2.3. Comparativo entre Bombas Hidrostáticas e Hidrodinâmicas

O comportamento desses tipos de bombas é bem distinto e as principais características estão descritas a seguir:

Bombas Hidrostáticas	Bombas Hidrodinâmicas
Fluxo pulsante.	Fluxo contínuo.
Vazão "quase" não varia com a resistência ao fluxo.	Vazão varia com a resistência ao fluxo.
Não pode operar com vazão zero.	Pode operar com vazão zero.

Precisa de válvula de alívio.	Não precisa de válvula de alívio.
Viscosidade não afeta significativamente o funcionamento.	Viscosidade afeta significativamente, o funcionamento.

Observações:

1) Colocamos que a vazão "quase não varia porque bombas de deslocamento positivo, tem sua vazão atrelada ao deslocamento volumétrico que ela possui, o que em tese, seria proporcional ao seu tamanho e ao número de ciclo, no entanto, as bombas rotativas, que possuem folgas tem uma diminuição de vazão com o aumento da pressão devido ao fenômeno conhecido como "slip", "escorregamento" ou recirculação. Esse efeito diminui com o aumento da viscosidade.
   Bombas pneumáticas também tem uma variação de vazão em função do aumento da pressão devido ao maior equilíbrio de força entre o ar comprimido e a pressão de descarga.

   Outro tipo de bomba que também tem esse efeito é a bomba eletromagnética, no caso, o maior equilíbrio é entre a força eletromagnética gerada pelo solenoide e a pressão de descarga da bomba.

2) O fato das bombas de fluxo poderem trabalhar com vazão zero (shut off) não significa que essa prática seja recomendada. O que queremos dizer é que se isso acontecer não acontece problemas imediatos, como acontece nas bombas de deslocamento positivo, sem válvula de alívio presente, no entanto, se uma bomba centrífuga, por exemplo, ficar por tempo prologando trabalhando com vazão zero, a temperatura interna subirá, reduzindo a pressão máxima de resistência da bomba, podendo ser uma situação de risco potencial de explosão da bomba.

1.3. Classificação das Bombas Quanto à Função

Pensando no papel que a bomba irá desempenhar dentro de um sistema hidráulico, podemos classificá-la de acordo com sua função principal no processo.

Sob esse ponto de vista, as bombas podem ser agrupadas em três categorias:

- Bombas de transferência
- Bombas de dosagem
- Bombas de pressurização

Essa classificação não está relacionada ao princípio construtivo da bomba, mas sim ao objetivo operacional que ela precisa atender.

1.3.1. Bombas de Transferência

Bombas de transferência são aquelas cujo objetivo é mover um líquido de um ponto a outro do sistema, normalmente buscando realizar essa movimentação no menor tempo possível.

Nesse contexto, a variável de maior interesse é a vazão (Q). De forma simplificada, quanto maior a vazão que a bomba conseguir proporcionar dentro das condições do sistema, mais eficiente será a operação de transferência.

O foco, portanto, está na capacidade de escoamento, e não necessariamente na precisão ou na manutenção de uma pressão específica.

Podem ser utilizadas tanto:

- Bombas de fluxo (rotodinâmicas) – com destaque para a bomba centrífuga, que é a mais comum nesse tipo de aplicação;
- Bombas de deslocamento positivo – especialmente quando o fluido apresenta maior viscosidade ou características específicas que dificultam o uso de bombas centrífugas.

Aplicações típicas incluem:

- Movimentação de líquidos em geral
- Transferência entre tanques;
- Carregamento e descarregamento de caminhões;
- Sistemas de drenagem;
- Movimentação de fluidos em processos industriais.

1.3.2. Bombas de Dosagem

Bombas de dosagem são aquelas destinadas a fornecer quantidades precisas de um fluido em um fluxo controlado e ajustável.

Diferentemente das bombas de transferência, aqui o parâmetro mais importante não é a vazão elevada, mas sim a acuracidade e repetibilidade do volume bombeado.

Normalmente trabalham com vazões pequenas quando comparadas ao fluxo principal do processo.

Contudo, o valor absoluto pode não ser necessariamente baixo, ele é considerado pequeno dentro do contexto do sistema.

Exemplo:

Em uma estação de tratamento de água de grande porte, o volume de produto químico injetado pode ser significativo em termos absolutos, mas é pequeno quando comparado ao volume total de água tratada.

Devido à necessidade de manter vazão praticamente constante mesmo sob variações de pressão, as bombas de dosagem são, em sua maioria, *bombas de deslocamento positivo*, especialmente do tipo alternativo.

Entre os tipos mais comuns, destacam-se:

- Bombas peristálticas
- Bombas eletromagnéticas
- Bombas de pistão
- Bombas de diafragma

Todas pertencem à categoria de deslocamento positivo.

Dentre os tipos mais comuns de bombas dosadoras, temos as peristálticas, eletromagnéticas, de pistão e de diafragmas (representadas abaixo na sequência da esquerda para direita) todas as bombas de deslocamento positivo.

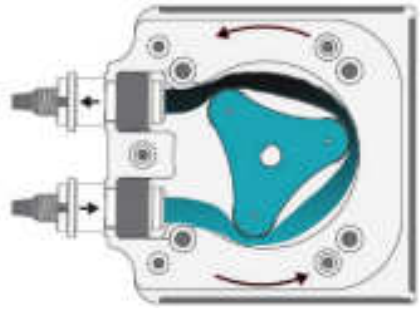


Figura 3: Bomba dosadoras peristáltica (Fonte: IQS)

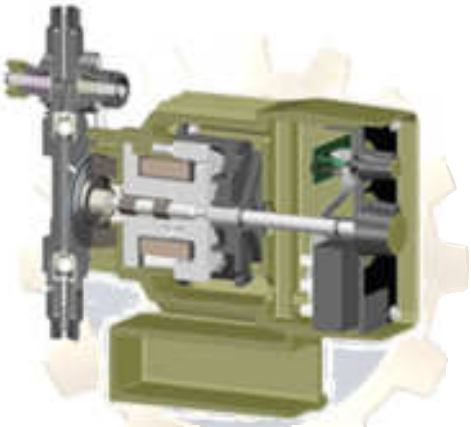


Figura 4: Bomba dosadora eletromagnética (Fonte: IQS)



Figura 5: Bomba dosadora de pistão (Fonte: OMEL)



Figura 6: Bomba dosadora de diafragma (Fonte: OMEL)

1.3.3. Bombas de Pressurização

Bombas de pressurização são aquelas cuja função principal é garantir ou manter um nível mínimo de pressão em um sistema hidráulico.

Diferentemente das bombas de transferência, em que a prioridade é a vazão e das bombas dosadora que o foco é a vazão controlada, aqui a variável dominante é a pressão disponível no ponto de consumo.

Essas bombas são empregadas quando:

- É necessário elevar a pressão da rede para atender pontos mais altos (ex.: edifícios);
- O sistema apresenta grandes perdas por atrito;
- Existe exigência de pressão mínima para o funcionamento adequado de equipamentos;
- Deseja-se manter pressão constante mesmo com variação de consumo.

Em sistemas prediais e industriais modernos, é comum a utilização de:

- Bombas centrífugas (simples ou multiestágio);
- Sistemas booster com controle automático;
- Conjuntos com inversor de frequência para manutenção de pressão constante.
- Sistema de combate a incêndio

Diferentemente das bombas de dosagem, o foco não é precisão volumétrica, e sim estabilidade de pressão ao longo do sistema.

É comum essas bombas possuir um acumulador hidráulico, como ilustrado a seguir, para reduzir a oscilação brusca de pressão.



Figura 7: Bomba pressurizadora de água (Fonte: Schneider)

Aplicações típicas incluem:

- Abastecimento de edifícios;
- Redes contra incêndio;
- Sistemas HVAC;
- Alimentação de caldeiras;
- Redes industriais pressurizadas.

2.CLASSIFICAÇÃO DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

2.1. Introdução

No capítulo anterior foi apresentada uma visão geral do universo das bombas, abordando sua classificação quanto à função e princípios construtivos.

A partir deste capítulo, inicia-se o estudo aprofundado das bombas centrífugas, agora sob a ótica de seus fundamentos físicos e do seu comportamento em aplicações industriais.

As bombas centrífugas pertencem ao grupo das **máquinas de fluxo**, também conhecidas como **máquinas rotodinâmicas**.

Máquinas de fluxo são aquelas em que ocorre interação contínua entre um rotor e um fluido em escoamento, havendo troca de energia por meio da variação do momento do fluido.

Dentro das máquinas de fluxo, as bombas são classificadas como **máquinas geradoras**, pois fornecem energia ao fluido. Nesse processo, a energia mecânica disponibilizada pelo eixo é transferida ao escoamento, ocorrendo inicialmente aumento de energia cinética no interior do rotor, seguido de conversão parcial dessa energia em pressão na voluta ou no difusor.

Essa característica, aumento intermediário de energia cinética antes da elevação de pressão, é o critério acadêmico que distingue as bombas rotodinâmicas das máquinas volumétricas, nas quais o aumento de pressão decorre do confinamento e deslocamento de volumes aprisionados.

Enquadram-se como bombas rotodinâmicas:

- Bombas centrífugas (radiais);
- Bombas de fluxo misto;
- Bombas axiais.

Do ponto de vista acadêmico, bombas centrífugas pertencem ao grupo das turbomáquinas hidráulicas. Entretanto, no ambiente industrial, o termo "turbomáquina" é frequentemente associado a equipamentos, de maior porte, mais sofisticados e complexos, como turbinas e turbocompressores, sendo as bombas tratadas como categoria própria.

Como este curso possui enfoque predominantemente prático, adotaremos prioritariamente a terminologia usual da indústria, recorrendo às nomenclaturas acadêmicas sempre que necessário para nivelamento conceitual.

As bombas centrífugas podem ser classificadas segundo diferentes critérios, cada um destacando um aspecto distinto do projeto ou da aplicação.

Conhecer essas classificações é fundamental para a correta seleção, especificação e comunicação técnica entre engenheiros, fabricantes e equipes de manutenção.

A seguir são apresentados os principais critérios utilizados na indústria, com destaque para as variações construtivas mais relevantes.

2.2. Classificação Quanto ao Regime de Escoamento Interno

A classificação mais fundamental das bombas rotodinâmicas baseia-se na direção predominante do escoamento ao atravessar o rotor.

Essa direção está diretamente relacionada à forma como o momento angular é transferido ao fluido e influencia de maneira significativa o comportamento da curva característica da bomba.

De acordo com esse critério, as bombas podem ser classificadas em radiais, de fluxo misto e axiais.

2.2.1. Bombas Radiais (Centrífugas)

Nas bombas radiais, o fluido entra no rotor predominantemente na direção axial e, ao interagir com as pás, é acelerado em direção radial, saindo perpendicularmente ao eixo de rotação, por efeito centrífugo.

Essa construção está representada na figura seguinte:



Figura 8: Bomba com fluxo radial (Fonte: Engenharia e Cia)

Essa mudança de direção está associada a uma variação significativa do momento angular, resultando em elevação expressiva da energia hidráulica.

Esse tipo de configuração favorece o desenvolvimento de alturas manométricas moderadas a elevadas, com vazões intermediárias.

Por essa razão, as bombas centrífugas radiais apresentam grande versatilidade e ampla aplicação industrial, sendo encontradas com frequência em refinarias, indústrias químicas, sistemas de saneamento e operações de mineração.

Devido ao equilíbrio entre vazão e pressão, constituem o tipo mais comum nas instalações de processo.

2.2.2. Bombas de Fluxo Misto

Nas bombas de fluxo misto, o escoamento apresenta simultaneamente componentes radial e axial. O fluido sofre aceleração ao longo de uma trajetória inclinada, resultando em transferência de energia que combina características das bombas radiais e axiais.

Essa construção está representada na figura seguinte:

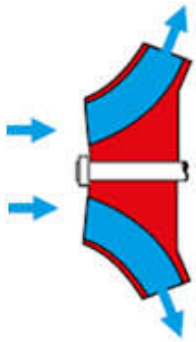


Figura 9: Bomba com fluxo misto (Fonte: Engenharia e Cia)

Esse arranjo proporciona uma combinação entre vazão e altura manométrica, desenvolvendo vazões superiores às bombas puramente radiais, porém com alturas menores que as bombas puramente axiais.

São frequentemente empregadas em sistemas que exigem grandes volumes com alturas intermediárias, como em irrigação, estações elevatórias e movimentação de água em larga escala.

2.2.3. Bombas Axiais

Nas bombas axiais, o escoamento ocorre predominantemente paralelo ao eixo de rotação. O rotor atua de forma semelhante a uma hélice, promovendo aumento de energia principalmente por variação da componente axial da velocidade do fluido.

Essa construção está representada na figura seguinte:

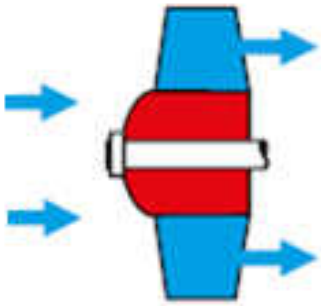


Figura 10: Bomba com fluxo axial (Fonte: Engenharia e Cia)

Esse tipo de bomba é caracterizado por altíssimas vazões e baixas alturas manométricas. Suas curvas características apresentam inclinação acentuada, indicando grande sensibilidade da vazão às variações de carga do sistema.

Embora menos comuns na indústria de processo, são amplamente utilizadas em drenagem de grandes volumes, circulação em sistemas de resfriamento e controle de cheias. Sua inclusão neste módulo é importante para completar o entendimento das máquinas de fluxo hidráulicas, ainda que o foco principal permaneça nas bombas centrífugas radiais.

2.2.4. Rotação Específica (Velocidade Específica)

A classificação das bombas quanto ao regime de escoamento pode ser feita de forma qualitativa, observando-se a direção predominante do fluxo no rotor (radial, misto ou axial).

Entretanto, essa distinção também pode ser realizada de forma quantitativa por meio da rotação específica, também chamada de velocidade específica. Em outras palavras, por meio de uma escala, conseguimos definir qual geometria de rotor tende a trazer um rendimento melhor ao escoamento.

Existem diferentes formas de definir a rotação específica na literatura técnica. Algumas delas são dependentes do sistema de unidades adotado e amplamente utilizadas em catálogos e processos de seleção prática.

Academicamente, a forma adimensional da rotação específica, conhecida como n_{QA}, definida por é mais usual:

$$n_{QA} = \frac{\omega\sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}} \quad (1)$$

onde:

- ω= velocidade angular [rad/s]
- Q= vazão no ponto de melhor eficiência em [m³/s]
- H= altura manométrica no mesmo ponto em [m]
- g= aceleração da gravidade

No entanto, do ponto de vista prático, os fabricantes utilizam uma definição, levemente diferente, sem o uso da aceleração da gravidade, conforme segue:

$$n_q = n\frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (2)$$

A rotação específica não representa a rotação real de operação da bomba. Trata-se de um número indicativo da geometria hidráulica do rotor e do regime de escoamento predominante, conforme ilustrado a seguir:

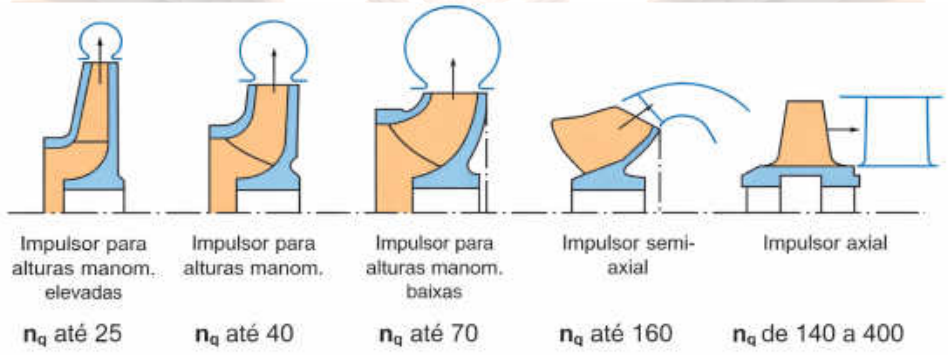


Figura 11: Geometria de rotores de acordo com a rotação específica (Fonte: Engenharia e Cia)

Interpretação física

- Valores baixos de n_q indicam predominância de escoamento radial, associada a maiores alturas manométricas e menores vazões.
- Valores intermediários caracterizam bombas de fluxo misto.
- Valores elevados estão associados a escoamento predominantemente axial, com altas vazões e baixas alturas.

Assim, a rotação específica fornece a base quantitativa para a classificação apresentada anteriormente, conectando geometria, desempenho hidráulico e forma da curva característica.

2.2.5. Classificação na Prática Industrial

Embora a literatura técnica classifique as bombas rotodinâmicas em radiais, de fluxo misto e axiais, na prática industrial essa distinção raramente é adotada de forma explícita.

No mercado, as bombas são usualmente agrupadas em duas categorias principais:

- Bombas centrífugas;
- Bombas axiais.

As bombas de fluxo misto, na maioria das aplicações, são tratadas como uma variação das bombas centrífugas, em função da similaridade construtiva e operacional.

Além disso, existem configurações hidráulicas especiais que, embora apresentem características distintas do rotor radial clássico, são comercialmente enquadradas como bombas centrífugas.

É o caso das bombas com *rotor vórtex* ou *bomba de rotor recuado* nas quais o escoamento ocorre predominantemente por indução e formação de vórtice no interior da carcaça.

Do ponto de vista físico, essas bombas possuem comportamento hidráulico particular, entretanto, por utilizarem princípio rotodinâmico e apresentarem configuração construtiva semelhante às centrífugas convencionais, são classificadas no mercado como bombas centrífugas.

Também se enquadram nesse contexto as bombas helicoidais centrífugas, que apresentam geometria intermediária entre rotores radiais e helicoidais, mantendo aspecto construtivo externo semelhante às bombas centrífugas tradicionais.

Embora tenha escoamento com aspectos centrífugos seu comportamento hidráulico aproxima-se, em certos aspectos, das bombas de deslocamento positivo, especialmente no que se refere à capacidade de bombeamento de fluidos com sólidos ou maior viscosidade.

Assim, observa-se que a classificação acadêmica e a classificação comercial não são necessariamente coincidentes, sendo importante que o profissional compreenda ambas as abordagens.

2.3. Classificação Quanto À Orientação do Eixo

A orientação do eixo define a disposição espacial do conjunto bomba-motor em relação ao piso e influencia diretamente o layout da instalação, o acesso para manutenção e a adequação ao espaço disponível.

2.3.1. Bombas de Eixo Horizontal

São as mais comuns no ambiente industrial. O eixo é paralelo ao piso e o conjunto motor-bomba é instalado sobre uma base (baseplate), geralmente em concreto ou aço estrutural.

Esse arranjo facilita o acesso aos componentes para inspeção, manutenção e alinhamento.

Apresentam ampla faixa de tamanho e potência, sendo encontradas desde pequenas unidades de utilidades até grandes bombas de processo em refinarias e petroquímicas.

Essas bombas estão ilustradas a seguir, ambas da OMEL.



Figura 12: Bombas de eixo horizontal (Fonte: OMEL E KSB)

As bombas com rotor em balanço podem ser encontradas na versão monobloco ou mancalizada conforme ilustrado a seguir.



Figura 13: Bombas monobloco (esquerda) e mancalizadas (direita) (Fonte: KSB e OMEL)

Monobloco é o termo utilizado para o equipamento que tem um único bloco, no caso das bombas, a estrutura do motor elétrico é aproveitada para sua a montagem, ficando os rolamentos do motor responsáveis por suportar todo esforço hidrodinâmico e estático da bomba.

Normalmente, são bombas de menor porte, exceto bombas sanitárias, que podem ser encontradas com motores de até 150 CV.

Já as bombas mancalizada, possuem mancais próprios, sendo características de bombas de maior porte e/ou maior pressão.

2.3.2. Bombas de Eixo Vertical

O eixo é perpendicular ao piso. Essa configuração é adotada quando há restrição de espaço em planta, quando o conjunto hidráulico precisa ficar submerso ou quando a bomba deve ser instalada em poços, caixas d'água ou bombas submersíveis.

Uma variação importante é a bomba vertical InLine, na qual sucção e descarga estão alinhadas na mesma tubulação, eliminando a necessidade de base e reduzindo o espaço ocupado. É comum em sistemas de circulação de fluidos, HVAC e sistemas de pressurização predial.



Figura 14: Bombas de eixo vertical Inline (esquerda) e submersível (direita) (Fonte: OMEL e Adelino)

A tabela a seguir resume as principais diferenças entre as duas orientações:

Característica	Eixo Horizontal	Eixo Vertical
Posição do eixo	Paralelo ao piso	Perpendicular ao piso
Manutenção	Mais simples	Exige mais espaço vertical
Instalação	Mais comum em geral	Comum em poços, caixas d'água, drenagem
Aplicações típicas	Processo industrial, HVAC, química	Estações elevatórias, mineração, petróleo

2.4. Classificação Quanto à Configuração Mecânica ou Suporte

A configuração mecânica define a forma como o rotor é suportado pelo eixo e pelos mancais. Essa escolha afeta diretamente a rigidez do conjunto girante, a distribuição de esforços nos mancais e a facilidade de manutenção.

As três configurações principais são:

- Rotor em balanço
- Rotor entre mancais
- Vertical suspensa

2.4.1. Rotor em Balanço ou Cantilever

Nessa configuração, os mancais estão posicionados em uma extremidade do eixo, e o rotor fica na outra extremidade, sem apoio do outro lado, funcionando como uma viga em balanço engastada em uma das pontas.

Essa é a configuração mais comum para bombas de processo de médio e pequeno porte. O suporte dos mancais pode ser do tipo monobloco, no qual os rolamentos do próprio motor elétrico absorvem os esforços da bomba, ou do tipo mancalizado, com caixa de mancais independente.

- **Monobloco:** motor e bomba formam um único bloco; os rolamentos do motor suportam todo o esforço hidrostático e dinâmico da bomba. É a solução mais compacta e econômica, indicada para bombas de menor porte.
- **Mancalizado (back pull-out):** a bomba possui caixa de mancais própria, independente do motor. Permite a retirada do conjunto rotativo (rotor + eixo +

vedação + mancais) sem necessidade de desmontar a tubulação, característica conhecida como back pull-out, exigida por normas como API 610 e ISO 5199 para bombas de processo.

Essas bombas estão ilustradas na figura seguinte:

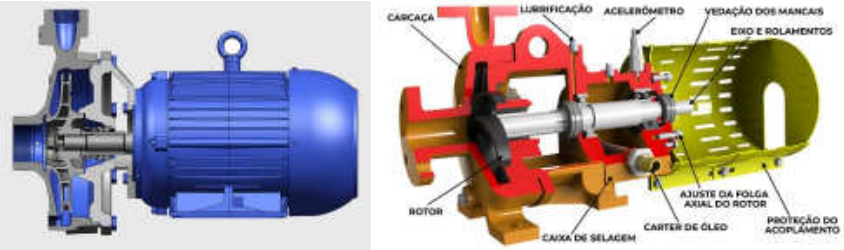


Figura 15: Bomba centrífuga com rotor em balanço (Fonte: Wortec e OMEL)

2.4.2. Rotor Entre Mancais (Bi-Apoiada)

O rotor está posicionado entre dois conjuntos de mancais, um em cada extremidade do eixo. Essa configuração oferece maior estabilidade dinâmica e é indicada para bombas de maior porte, alta pressão ou aquelas sujeitas a cargas hidráulicas mais intensas.

A maioria das bombas bi-apoiadas possui sucção dupla (dupla entrada no rotor), o que reduz o empuxo axial resultante e favorece o equilíbrio de forças. Esse aspecto será detalhado no capítulo de projetos especiais.

São as configurações típicas de bombas de processo pesado, como as do tipo API 610 BB (Between Bearings), ilustradas a seguir:



Figura 16: Bomba centrífuga com rotor em entre mancais (Fonte: RuhrPumpen e Wortec)

2.4.3. Vertical Suspensa

Nessa configuração, o motor está posicionado na parte superior (fora do fluido), e o conjunto hidráulico fica submerso em uma coluna. Um eixo longo (line shaft) conecta o motor ao rotor, transmitindo torque ao longo de toda a profundidade da instalação.

O mancal superior suporta o peso do conjunto girante e o empuxo axial resultante da operação. Ao longo da coluna, mancais intermediários de deslizamento, geralmente lubrificados pelo próprio fluido bombeado, mantêm o alinhamento do eixo.

É a configuração típica de bombas para estações elevatórias, poços profundos e sistemas de drenagem em mineração, conforme ilustradas a seguir:



Figura 17: Bomba centrífuga vertical suspensa (Fonte: OMEL e Weir)

A tabela a seguir resume as características de cada configuração:

Configuração	Característica principal	Aplicações típicas
Rotor em balanço (cantilever)	Mancais posicionados atrás do rotor; eixo em balanço	Processo industrial geral, química, utilidades
Rotor entre mancais (bi apoiada)	Mancal em cada extremidade; melhor equilíbrio de forças	Bombas de grande porte, alta pressão, oil & gás
Vertical suspensa	Motor na superfície; conjunto hidráulico submerso em coluna	Estações elevatórias, poços, drenagem profunda

2.5. Classificação Quanto ao Número de Rotores ou Estágios

O número de rotores define a quantidade de estágios da bomba e está diretamente relacionado ao nível de pressão que se deseja alcançar.

2.5.1. Bombas Monoestágio

Possuem apenas um rotor. São a solução mais comum para a maioria das aplicações industriais de baixa e média pressão.

Apresentam construção simples, menor custo de aquisição e facilidade de manutenção. Várias delas já foram ilustradas anteriormente.

2.5.2. Bombas Multi-Estágio

Possuem dois ou mais rotores dispostos em série no mesmo eixo. Cada estágio adiciona pressão ao fluido, sendo a altura manométrica total a soma das contribuições de cada rotor.

Os difusores são os componentes responsáveis por conduzir o escoamento da saída de um estágio para a entrada do próximo, promovendo ao mesmo tempo a conversão de velocidade em pressão entre cada par de rotores.

Essa configuração é adotada quando a pressão necessária ultrapassa a capacidade de um único estágio, sem que haja aumento significativo da vazão. É a solução típica para:

- Sistemas de alimentação de caldeiras de alta pressão;

- Bombas de injeção em poços de petróleo;
- Abastecimento de edifícios de grande altura;
- Sistemas de osmose reversa;
- Mineração em grandes profundidades.

Elas podem ser construídas tanto na configuração horizontal, como vertical, conforme ilustrado a seguir:



Figura 18: Bomba centrífuga multiestágio (Fonte: Schneider, Sulzer e Hermetic)

Observação: Aumentar o número de estágios é equivalente, do ponto de vista hidráulico, a colocar bombas monoestágio em série, com a vantagem de utilizar um único motor de acionamento e ocupar menos espaço.

Entretanto, bombas multi-estágio são mais complexas para manutenção e exigem atenção especial ao empuxo axial resultante, que cresce proporcionalmente com o número de estágios.

2.6. Classificação Quanto às Conexões de Sucção e de Descarga

A posição das conexões de sucção e descarga define como a bomba se integra à tubulação da instalação, impactando o layout da planta, a facilidade de montagem e, em alguns casos, o desempenho hidráulico.

A nomenclatura adotada pela indústria, por influência do Instituto Americano de Petróleo (API - American Petroleum Institute), utiliza termos em inglês para identificar a direção de cada bocal:

- **End:** conexão axial, paralela ao eixo da bomba.
- **Top:** conexão vertical, perpendicular ao eixo, na parte superior.
- **Side**: conexão horizontal, perpendicular ao eixo, na lateral.

A classificação é expressa sempre pela sucção primeiro, seguida da descarga. As combinações mais comuns na indústria são:

2.6.1. End-Top

Sucção axial (End) e descarga vertical (Top). É a configuração mais comum nas bombas de processo padrão ANSI e ISO.

A sucção em posição axial favorece a entrada do fluido com menor turbulência, enquanto a descarga vertical facilita a integração com sistemas de tubulação aérea.

Dois exemplos estão ilustrados a seguir:



Figura 19: Bombas centrífugas End-Top (Fonte: Flowserve)

2.6.2. Side-Side

Sucção e descarga horizontais, opostas entre si. É a configuração típica de bombas Inline, em que sucção e descarga ficam alinhadas na mesma tubulação horizontal, eliminando a necessidade de desvio no trecho.

Muito utilizada em circuitos de circulação, climatização (HVAC) e instalações compactas.



Figura 20: Bombas Side-Side horizontal (esquerda) e Inline (direita) (Fonte: Flowserve)

2.6.3. Top-Top

Sucção e descarga ficam na parte superior da bomba. Essa configuração é comum em bombas de grande porte, como as do tipo API de dupla sucção, nas quais o acesso pela parte superior permite a remoção da tampa e do rotor sem necessidade de desconectar as tubulações, reduzindo significativamente o tempo de manutenção.

Um exemplo é apresentado a seguir:



Figura 21: Bomba centrifuga top-top (Fonte: Sulzer e Sundybe)

2.6.4. Back Pull-Out (BPO)

Embora não seja uma configuração de bocais propriamente, o conceito de back pull-out é intimamente relacionado à disposição das conexões.

Nesse projeto, as conexões de sucção e descarga permanecem fixas na carcaça dianteira, enquanto o conjunto rotativo (rotor, eixo, vedação e mancais) é retirado pela parte traseira da bomba, sem necessidade de movimentar a tubulação, conforme ilustrado a seguir:

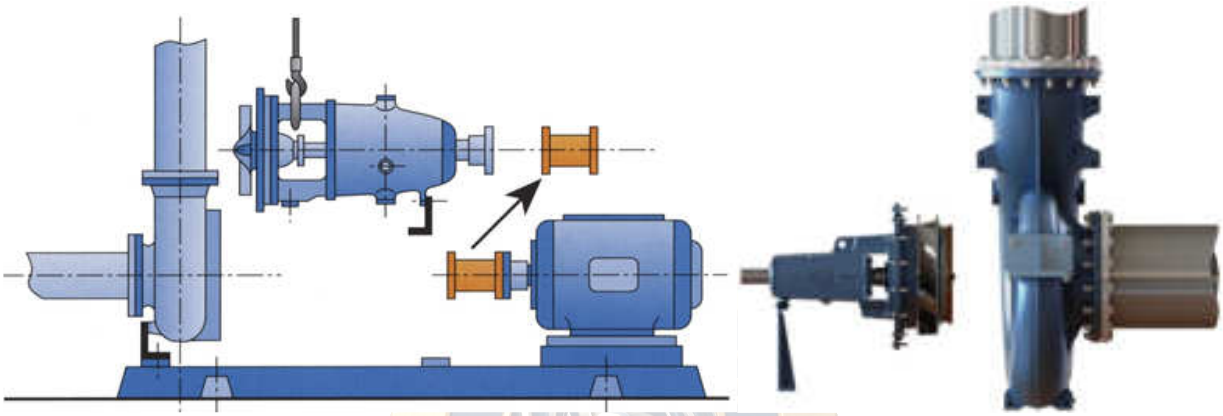


Figura 22: Bomba centrifuga "back pull out" (Fonte: Empowering Pumps e Equipe)

Essa característica é exigida pelas normas API 610 e ISO 5199 para bombas de processo crítico.

A tabela a seguir resume as principais configurações de bocais:

Sucção	Descarga	Nomenclatura	Aplicação / Observação
Axial (End)	Vertical (Top)	End-Top	A mais comum em bombas ANSI e ISO de processo
Horizontal (Side)	Horizontal (Side)	Side-Side	Comum em bombas inline e instalações compactas
Vertical (Top)	Vertical (Top)	Top-Top	Bombas de grandes diâmetros; fácil remoção do rotor sem desconectar tubulações
Axial dupla (End-End)	Horizontal (Side)	Back-Pull-Out	Projeto API/ISO; permite retirada do conjunto rotativo pela parte traseira

3.FUNDAMENTOS DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

3.1. Princípio de Funcionamento de Uma Bomba Centrífuga

Existem vários princípios físicos que estão envolvidos no funcionamento de uma bomba centrífuga, sendo os principais, o efeito centrífugo, o princípio de Bernoulli (equação de Bernoulli) e a equação da continuidade.

Quando o motor (elétrico, a combustão ou turbina) é acionado ele gira e transmite rotação ao rotor e antes mesmo do líquido entrar no rotor, ele já sofre influência sua influência.

Vamos explicar, a partir da figura seguinte:



Figura 23: Funcionamento da bomba centrífuga (Fonte: Adaptado de OMEL)

A região 1 representa uma seção onde ainda o escoamento não sofreu nenhuma influência do rotor, enquanto a região 2 representa a seção de entrada do rotor.

Na região 1, o fluido encontra-se na linha de sucção, sob pressão próxima à pressão do reservatório.

À medida que ele vai se aproximando do olho do rotor (região 2), ocorre aumento da velocidade do escoamento por influência do rotor. Aqui entra o *princípio de Bernoulli* que diz de forma simplificada:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante} \qquad (3)$$

Ou seja, se a velocidade aumenta, a pressão estática tem que diminuir para que a energia permaneça constante. Lembrando que aqui, o rotor ainda não entregou energia de fato ao rotor.

Assim, no trecho $1 \rightarrow 2$:

- A velocidade aumenta;
- A pressão estática diminui;
- Forma-se a região de baixa pressão no olho do rotor.

Essa redução de pressão é o que permite que a pressão do reservatório empurre o fluido para dentro da bomba, embora frequentemente se diga que é a bomba que succiona o produto.

Já no rotor, região $2 \rightarrow 3$, tem-se a fase ativa de fato do processo, ou seja, no interior do rotor, por ação da força centrífuga promovida pelas pás, o fluido recebe energia mecânica do eixo.

O rotor impõe movimento rotacional ao fluido, promovendo:

- Aumento significativo da velocidade;
- Aumento da energia cinética;
- Aumento da energia total do escoamento.

Popularmente atribui-se esse efeito à "força centrífuga", que desloca o fluido da região central para a periferia. De forma prática, pode-se entender que o rotor transforma energia mecânica do motor em aumento de energia cinética do fluido.

Um ponto importante a destacar que o sentido do giro do rotor é sempre com a parte mais externa da pá "empurrando" o fluido, conforme ilustrado na figura seguinte:



Figura 24: Sentido de rotação bomba centrífuga (Fonte: OMEL)

O motivo da rotação seguir esse sentido não é tão intuitivo e gera muitas dúvidas nos estudantes e usuários de bombas. A explicação tem base vetorial, através do chamado *triângulos de velocidades*, tópico que não iremos aprofundar nesse curso.

A entrar no rotor, o fluido começa a ganhar energia, aumentando sua velocidade até atingir a periferia do rotor (região 3), onde o fluido encontra-se com elevada velocidade.

Ao sair do rotor, o fluido entra na voluta que tem seção crescente e muito superior as regiões anteriores. É aqui que entra a equação da continuidade, que diz:

$$Q = A \cdot v \tag{4}$$

Como a vazão Q é constante quando a bomba está em regime, o aumento da área A implica numa redução da velocidade v.

Portanto, no trecho 3 → 4:

- A área aumenta;
- A velocidade diminui;
- A energia cinética é convertida em energia de pressão.

Novamente entra em cena Bernoulli, a redução da velocidade resulta em aumento da pressão estática.

É nessa etapa que ocorre a efetiva elevação de pressão que permite vencer a carga do sistema.

A variação de velocidades está ilustrada a seguir:

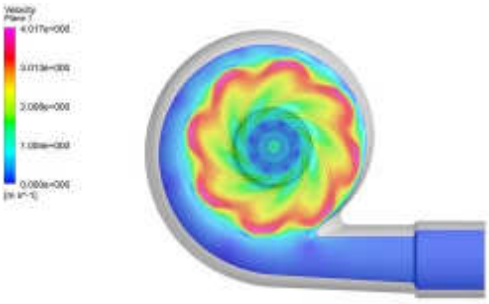


Figura 25: Variação de velocidades em uma bomba centrífuga (Fonte: Fetch CFD)

Note a escala de cores, quanto mais vermelho, maior é o valor da velocidade.

Ponto Didático Fundamental

O rotor é responsável por transferir energia ao fluido enquanto a voluta é responsável por converter energia de velocidade em pressão.

Sem o rotor, não há fornecimento de energia e sem a voluta não há conversão adequada de velocidade em pressão.

Ambos são elementos fundamentais para o funcionamento da bomba centrífuga.

Síntese Física do Processo

- 1 → 2: Aceleração e queda de pressão
- 2 → 3: Transferência de energia e aumento de velocidade
- 3 → 4: Desaceleração e aumento de pressão

Observação:

Nesta explicação utilizamos a equação de Bernoulli de forma simplificada, por ser mais intuitiva e facilitar a compreensão da relação entre velocidade e pressão ao longo do escoamento.

Entretanto, o fenômeno real envolve a adição de energia mecânica ao fluido pelo rotor, sendo a análise rigorosa descrita pela equação de Euler das turbomáquinas. Além disso, existem perdas internas associadas a atrito, recirculação e choques hidráulicos, que são consideradas por meio do rendimento da bomba.

Assim, a abordagem apresentada tem caráter didático, permitindo compreender os mecanismos principais de aceleração, transferência de energia e conversão de velocidade em pressão, sem entrar na modelagem completa do escoamento interno.

3.2. Escorvamento ou Escorva da Bomba

É comum, na prática industrial, observar que uma bomba centrífuga não bombeia fluido imediatamente após a partida. Em muitos casos, o equipamento gira normalmente, porém não há vazão na descarga.

Esse comportamento está diretamente relacionado à presença de ar ou gases no interior da bomba ou na linha de sucção.

Bombas centrífugas convencionais são projetadas para operar com líquidos e não possuem capacidade significativa de deslocamento de gases. Quando o rotor gira imerso em ar:

- A densidade do fluido é muito menor;
- A energia transferida é insuficiente para gerar diferença de pressão significativa;
- Não se estabelece gradiente de pressão capaz de admitir líquido pela sucção.

Além disso, caso exista mistura de ar e líquido, podem ocorrer instabilidades hidráulicas que falaremos mais adiante.

Por essa razão, é necessário remover o ar do interior da bomba e da linha de sucção antes da partida. Esse procedimento é denominado **escorvamento**.

O escorvamento consiste no preenchimento completo da bomba e da tubulação de sucção com líquido, garantindo que o rotor opere submerso e que a redução de pressão no olho do rotor seja suficiente para estabelecer o escoamento contínuo.

O procedimento de escorva dependerá do tipo de instalação, que veremos a seguir:

3.3. Bombas Afogada e Não-Afogada

A condição de instalação da bomba em relação ao nível do reservatório de sucção influencia diretamente o comportamento hidráulico do sistema.

Dá-se o nome de *altura geométrica de sucção* (h_{suc}) à diferença de cota entre o nível do reservatório e a linha de centro da bomba.

No presente contexto, considera-se o nível do reservatório como referência horizontal, denominado *Plano Horizontal de Referência (PHR)* ou *datum*.

Diz-se que a bomba é *afogada* quando está instalada abaixo do nível do reservatório de sucção.

Nessa situação:

- A coluna líquida exerce pressão positiva na entrada da bomba;
- A pressão na sucção, normalmente, é superior à pressão atmosférica, razão pela qual essa condição é chamada de *instalação com sucção positiva.* Embora, dependendo das perdas de carga a pressão possa se tornar negativa;
- O rotor tende a permanecer naturalmente preenchido com líquido;
- h_{suc} é negativa.

Essa é a condição mais favorável para operação, pois há maior pressão absoluta disponível na sucção.

A bomba é considerada *não-afogada* quando está instalada acima do nível do reservatório de sucção.

Nessa condição, a pressão disponível na entrada da bomba é influenciada diretamente pela altura geométrica de sucção.

Pela relação fundamental:

$$P = \rho g h \tag{5}$$

à medida que o fluido sobe uma coluna de altura h, parte da pressão disponível é consumida para vencer essa elevação.

Assim, considerando um reservatório aberto:

- No nível do reservatório, a pressão é aproximadamente atmosférica;
- À medida que o fluido sobe na tubulação de sucção, a pressão diminui;
- A partir do nível de produto a pressão interna da tubulação será negativa, razão pela qual essa condição é chamada de *instalação com sucção negativa*;
- h_{suc} é positiva.

Além da redução associada à altura geométrica, existem ainda:

- Perdas de carga por atrito na linha de sucção;
- Perdas localizadas em válvulas e conexões.

Portanto, na condição não afogada torna o sistema mais crítico do ponto de vista hidráulico, especialmente em relação ao risco de cavitação, tema que será abordado em tópico específico.

Na figura seguinte ilustramos esses dois tipos de instalação.



Figura 26: Bombas afogadas (à esquerda) e não-afogadas (à direita) Fonte (Engenharia e Cia)

Observação Importante:

Os termos "positivo" e "negativo" costumam gerar grande confusão pois depende da referência ou ponto de vista adotado.

Do ponto de vista da *pressão na linha de sucção*:

- Bomba afogada → pressão positiva
- Bomba não-afogada → pressão negativa com certeza

Do ponto de vista da *altura geométrica de sucção*, com o nível do reservatório como referência:

- Bomba afogada → h_{suc} é negativo
- Bomba não-afogada → h_{suc} é positivo

Do ponto de vista da *altura geométrica de sucção*, com a linha de centro da bomba como referência, adotadas por fabricantes de bombas:

- Bomba afogada → h_{suc} é positivo
- Bomba não-afogada → h_{suc} é negativo

Portanto, ao se deparar com qualquer menção a positivo ou negativo, é indispensável verificar qual parâmetro ou qual a referência que foram adotados.

3.4. Procedimentos de Escorvamento em Bombas

Se a bomba centrífuga não lida adequadamente com ar, surge naturalmente a seguinte pergunta:

Como é possível dar partida em uma bomba instalada acima do nível do reservatório?

Essa situação é comum em diversas aplicações industriais e como já mencionado, as bombas centrífugas convencionais não são capazes de ligar com gases, consequentemente, a bomba gira, mas não bombeia.

Por essa razão, torna-se necessário aplicar algum procedimento de escorvamento, cujos principais, veremos a seguir:

3.4.1. Preenchimento Prévio da Tubulação de Sucção

Consiste no enchimento manual da bomba e da linha de sucção com líquido antes da partida por meio de tampão na bomba ou no cotovelo da instalação, como ilustrado a seguir:



Figura 27: Cotovelo com tampão para escorva (Fonte: Suporte Irrigação e Alex Brasil)

Para que o líquido permaneça na tubulação após o enchimento, é necessária a instalação de uma Válvula de pé com crivo na extremidade da sucção, conforme ilustrado a seguir:

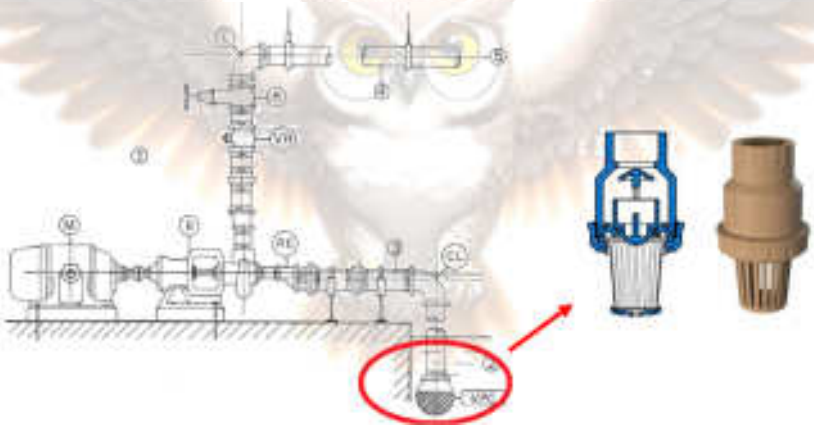


Figura 28: Instalação com válvula de pé (Fonte: Alex Brasil e Amboretto)

Essa válvula impede o retorno do líquido ao reservatório quando a bomba é desligada, mantendo o sistema escorvado para partidas subsequentes.

O inconveniente dessa solução é que em algum momento a válvula apresentará problema e líquido voltará para tanque e numa nova partida, o equipamento trabalhará a seco, problema importante de partida que vamos abordar em momento oportuno.

Outro ponto importante, não é um procedimento apropriado para as instalações de bombeamento que lidam com produtos químicos perigosos.

3.4.2. Escorvamento por Tanque de Escorva

Muito comum em sistemas de combate a incêndio e em instalações industriais críticas.

Na instalação existe um reservatório que fornece produto durante o processo de escorvamento. Um tipo clássico está representado na figura seguinte (sem instrumentações e acessórios), conhecido como tanque de escorva.

O tanque de escorva, instalado em série ao escoamento, é um reservatório hermético contendo uma bolsa de ar aprisionada. Durante o processo de escorvamento, a saída de líquido provoca expansão do ar interno, reduzindo sua pressão conforme a Lei de Clapeyron (PV ≈ constante).

Essa redução de pressão auxilia o preenchimento da bomba e da linha de sucção.



Figura 29: Bombas não-afogadas com tanque de escorva (Fonte: Engenharia e Cia e Yon)

Nesse arranjo:

- O tanque integra a linha de sucção;
- Fornece volume inicial para preenchimento da bomba;
- Atua por variação de pressão do gás aprisionado;
- Após o estabelecimento do escoamento, o sistema passa a operar normalmente.

Esse método aumenta a confiabilidade de partida.

3.4.3. Uso de Bomba de Vácuo

Em instalações maiores, ou em equipamentos portáteis pode-se utilizar uma bomba de vácuo auxiliar, como por exemplo:

- Bomba de vácuo de anel líquido,
- Bomba de vácuo de palhetas,
- Bomba de vácuo de diafragmas,
- Entre outras

Esse sistema remove o ar da linha de sucção, criando condição para admissão do líquido.

É uma solução robusta e comum em estações elevatórias, no entanto, trata-se de um sistema mais custoso, tanto em relação a investimento, como custos de manutenção.

Uma bomba centrífuga com bomba de vácuo de diafragma acoplada está representada a seguir:

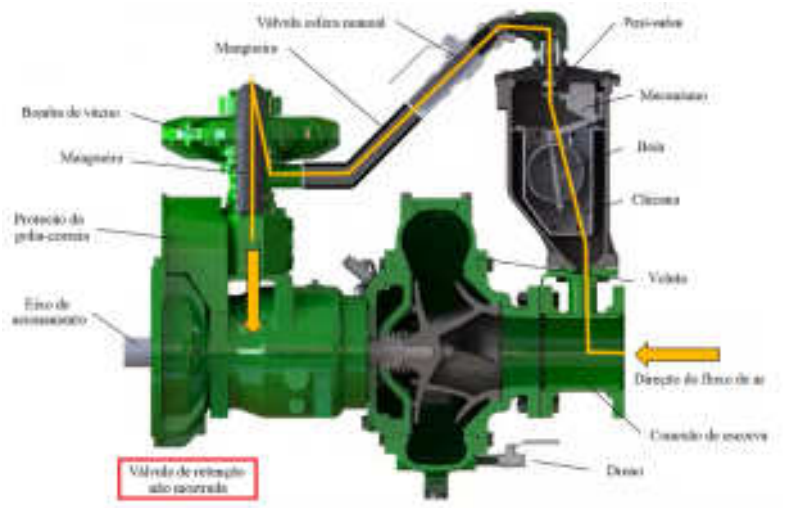


Figura 30: Bombas centrífuga com bomba de vácuo de diafragma acoplada (Fonte: Pioneer)

3.4.4. Bombas Centrífugas Autoescorvantes

Trata-se de bombas centrífugas com configuração construtiva especial, capazes de remover o ar da linha de sucção durante a própria partida.

Seu princípio de funcionamento será abordado em tópico específico a seguir.

3.5. Limitação Física da Altura de Sucção

Uma vez definida a *altura geométrica de sucção* h_{suc}, surge uma questão fundamental:

> **Existe um limite físico para o valor máximo de h_{suc} em instalações com bomba não-afogadas?**

A resposta é sim.

Essa limitação não é imposta pela bomba, mas pela pressão atmosférica disponível e pela relação entre pressão e coluna de líquido.

3.5.1. Limite Teórico

Considerando:

- Reservatório aberto à atmosfera;
- Nível do mar;
- Pressão atmosférica ≈ 101,3 kPa;
- Água à temperatura ambiente com $\rho \approx 1000\ [kg/m^3]$,

Nessas condições a pressão atmosférica equivale a aproximadamente **10,3 metros de coluna d'água [mca]**, obtido a partir do conceito de *carga de pressão* $h = \frac{P}{\rho g}$, derivada do *princípio de Stevin*.

Isso significa que, teoricamente, o valor máximo de h_{suc} positivo (instalação não-afogada) nunca pode ultrapassar cerca de 10 metros.

Acima desse valor, é o equivalente a sistemas com pressão absoluta negativa, o que é incompatível com a realidade do nosso universo.