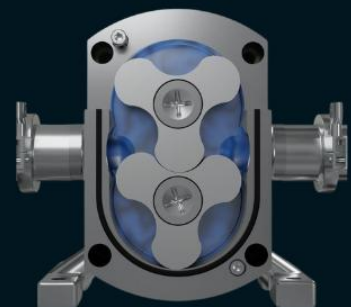
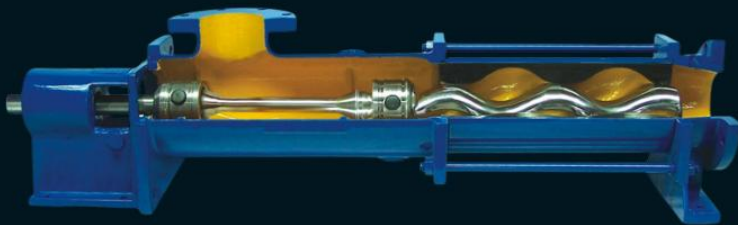




Pós Graduação Lato Sensu

Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais



Bombas de Deslocamento Positivo

Micelli R. Camargo

Bombas de Deslocamento Positivo

**Da concepção das bombas a suas
aplicações práticas.**

Micelli Rodrigues Camargo

São Paulo, 04 de maio 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.



Créditos

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

Índice:

APRESENTAÇÃO	11
ORGANIZAÇÃO DA PÓS-GRADUAÇÃO	12
APOIO INSTITUCIONAL	13
OBJETIVOS	14
1. INTRODUÇÃO ÀS BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO	15
1.1. O Princípio de Funcionamento das BDP	15
1.2. BDP versus BC - Diferença Fundamental	16
1.3. Terminologia - Três Nomes para a Mesma Família	17
1.4. Classificação das BDP - Rotativas e Alternativas	18
1.4.1. Bombas Alternativas	18
1.4.2. Bombas Rotativas	19
1.4.3. O Caso Especial: Bomba Peristáltica	19
1.5. O Papel das Folgas nas BDP Rotativas	20
1.5.1. Por que as Folgas Existem	20
1.5.2. Viscosidade e Folga - Uma Relação Crítica	21
1.5.3. Folgas e Escorvamento	21
1.6. Pulsação de Fluxo - Causas e Mitigação	22
1.6.1. Por que a Pulsação Ocorre	22
1.6.2. Consequências da Pulsação	22
1.6.3. Mitigação da Pulsação	22
1.7. Válvula de Alívio - Proteção Obrigatória	23
1.7.1. Localização e Configuração	23
1.7.2. Ajuste do Set Point	23
1.7.3. Válvulas de Alívio Bidirecionais	24
2. CURVAS E DESEMPENHO DAS BDP	25
2.1. A Curva Característica da BDP - Teórica e Real	25
2.1.1. A Curva Teórica - Reta Vertical	25
2.1.2. A Curva Real - O Efeito do Slip	26
2.1.3. Eficiência Volumétrica	27
2.2. Curva do Sistema (CS)	27
2.3. Ponto de Operação (PO)	28
2.4. Controle de Vazão em BDP	28
2.4.1. Variação de Rotação ou Número de Ciclos	30
2.4.2. Ajuste o Volume Deslocado por Ciclo	30
2.4.3. O Bypass - Controle por Desvio	31

2.5. Viscosidade e Desempenho nas BDP	31
2.5.1. Efeito sobre a Potência Necessária	32
2.5.2. Efeito sobre o Slip	32
2.5.3. Viscosidade e Seleção de Bomba	33
2.6. Pulsação - Análise e Quantificação	33
2.6.1. Índice de Pulsação	33
2.6.2. Perdas por Aceleração - Impacto no Dimensionamento	34
2.7. Válvula de Alívio - Dimensionamento e Posicionamento	35
2.7.1. Posicionamento Correto	35
2.7.2. Set Point - Ajuste Correto	35
2.7.3. Dimensionamento da Capacidade	36
2.7.4. Válvulas de Alívio Bidirecionais	36
2.8. Cavitação nas BDP	36
2.8.1. NPSH ou NPSP	37
2.8.2. Por Aceleração Local do Fluidos	38
2.8.3. Por Dificuldade De Preenchimento Volumétrico	39
3. BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO ROTATIVAS	Erro! Indicador não definido.
3.1. Bombas de Engrenagens Externas (Spur Gear Pump)	Erro! Indicador não definido.
3.1.1. Principais Componentes	Erro! Indicador não definido.
3.1.2. Princípio de Funcionamento	Erro! Indicador não definido.
3.1.3. Por que Engrenagens de Dentes Retos?	Erro! Indicador não definido.
3.1.4. Lubrificação pelo Produto Bombeado – Ponto Crítico	Erro! Indicador não definido.
3.1.5. Características Operacionais	Erro! Indicador não definido.
3.1.6. Curvas Características	Erro! Indicador não definido.
3.1.7. Cavitação Inerente ao Funcionamento	Erro! Indicador não definido.
3.1.8. Aplicações Típicas	Erro! Indicador não definido.
3.2. Bombas de Engrenagens Internas (Internal Gear Pump)	Erro! Indicador não definido.
3.2.1. Principais Componentes	Erro! Indicador não definido.
3.2.2. Princípio de Funcionamento	Erro! Indicador não definido.
3.2.3. Características Operacionais	Erro! Indicador não definido.
3.2.4. Curvas Características	Erro! Indicador não definido.
3.2.5. Pontos Críticos de Operação e Manutenção	Erro! Indicador não definido.
3.2.5.1. Folga axial - o parâmetro central de ajuste	Erro! Indicador não definido.
3.2.5.2. Lubrificação da bucha do pino	Erro! Indicador não definido.
3.2.5.3. Fluidos que solidificam que requerem aquecimento	Erro! Indicador não definido.
3.2.5.4. Desgaste do crescente	Erro! Indicador não definido.

3.2.6.	Engrenagens Internas versus Engrenagens Externas.....	Erro! Indicador não definido.
3.2.7.	Aplicações Típicas	Erro! Indicador não definido.
3.3.	Bomba de Engrenagens Internas Gerotor.....	Erro! Indicador não definido.
3.4.	Bombas de Lóbulos ou de Pistões Circunferenciais.....	Erro! Indicador não definido.
3.4.1.	Introdução.....	Erro! Indicador não definido.
3.4.2.	Funcionamento	Erro! Indicador não definido.
3.4.3.	Componentes da Bomba de Lóbulos.....	Erro! Indicador não definido.
3.4.4.	Curvas Características e Correção por Viscosidade	Erro! Indicador não definido.
3.4.4.1.	Como ler o gráfico	Erro! Indicador não definido.
3.4.4.2.	O efeito da viscosidade no gráfico	Erro! Indicador não definido.
3.4.4.3.	Potência de Eixo necessária.....	Erro! Indicador não definido.
3.4.5.	Características Operacionais	Erro! Indicador não definido.
3.4.6.	Aplicações	Erro! Indicador não definido.
3.5.	Bombas de Palhetas (Sliding Vane Pumps).....	Erro! Indicador não definido.
3.5.1.	Introdução.....	Erro! Indicador não definido.
3.5.2.	Componentes Principais	Erro! Indicador não definido.
3.5.3.	Princípio de Funcionamento.....	Erro! Indicador não definido.
3.5.4.	Mecanismos de Força sobre as Palhetas.....	Erro! Indicador não definido.
3.5.5.	Compensação do Desgaste	Erro! Indicador não definido.
3.5.6.	Materiais das Palhetas.....	Erro! Indicador não definido.
3.5.7.	Características Operacionais	Erro! Indicador não definido.
3.5.8.	Aplicações Típicas	Erro! Indicador não definido.
3.6.	Bombas Helicoidais (Cavidade Progressiva)	Erro! Indicador não definido.
3.6.1.	Introdução.....	Erro! Indicador não definido.
3.6.2.	Componentes Principais	Erro! Indicador não definido.
3.6.3.	Princípio de Funcionamento.....	Erro! Indicador não definido.
3.6.4.	Geometria	Erro! Indicador não definido.
3.6.5.	Número de Estágios	Erro! Indicador não definido.
3.6.6.	Características Operacionais	Erro! Indicador não definido.
3.6.7.	Aplicações Típicas	Erro! Indicador não definido.
3.7.	Bombas de Parafusos.....	Erro! Indicador não definido.
3.7.1.	Princípio de Funcionamento.....	Erro! Indicador não definido.
3.7.2.	Curvas Características	Erro! Indicador não definido.
3.7.3.	Diferença Construtiva Fundamental	Erro! Indicador não definido.
3.7.4.	Parafuso Triplo.....	Erro! Indicador não definido.
3.7.5.	Parafuso Duplo.....	Erro! Indicador não definido.

3.8. Outros Tipos de Bombas Rotativas	Erro! Indicador não definido.
3.8.1. Bomba de Rotor Flexível.....	Erro! Indicador não definido.
3.8.2. Bomba de Disco Excêntrico	Erro! Indicador não definido.
3.8.3. Bomba Senoidal	Erro! Indicador não definido.
4. BOMBA PERISTÁLTICA – UMA BOMBA ESPECIAL.....	Erro! Indicador não definido.
4.1. Inspiração Biológica - A Peristalse.....	Erro! Indicador não definido.
4.2. Principais Componentes	Erro! Indicador não definido.
4.3. Princípio de Funcionamento.....	Erro! Indicador não definido.
4.4. Sapatas versus Roletes	Erro! Indicador não definido.
4.4.1. Sapata.....	Erro! Indicador não definido.
4.4.2. Roletes.....	Erro! Indicador não definido.
4.5. Curvas Características	Erro! Indicador não definido.
4.6. O Mangote	Erro! Indicador não definido.
4.6.1. Materiais	Erro! Indicador não definido.
4.6.2. Vida Útil.....	Erro! Indicador não definido.
4.7. Detector de Vazamento	Erro! Indicador não definido.
4.8. A Pulsação	Erro! Indicador não definido.
4.9. Características Operacionais	Erro! Indicador não definido.
4.10. Limitações	Erro! Indicador não definido.
4.11. Aplicações Típicas	Erro! Indicador não definido.
4.12. Sapatas Versus Roletes: O Que Dizem Os Fabricantes	Erro! Indicador não definido.
4.12.1. Fabricantes de Bombas de Sapatas Sobre os Roletes.....	Erro! Indicador não definido.
4.12.2. Fabricantes De Bombas De Roletes Sobre As Sapatas.....	Erro! Indicador não definido.
4.12.3. Visão do autor	Erro! Indicador não definido.
5. BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO ALTERNATIVAS	Erro! Indicador não definido.
5.1. Princípio Geral das Alternativas	Erro! Indicador não definido.
5.2. Bombas de Pistão ou de Êmbolo	Erro! Indicador não definido.
5.2.1. Diferença Conceitual e Terminológica	Erro! Indicador não definido.
5.2.2. Princípio de Funcionamento.....	Erro! Indicador não definido.
5.2.3. Mecanismos de Acionamento	Erro! Indicador não definido.
5.2.4. Configurações Multicilíndricas: Redução de Pulsação	Erro! Indicador não definido.
5.2.5. Perda de Carga por Aceleração e Desaceleração.....	Erro! Indicador não definido.
5.2.6. Câmaras Separadas: Proteção do Fluido de Processo	Erro! Indicador não definido.
5.2.7. Vantagens.....	Erro! Indicador não definido.
5.2.8. Limitações:	Erro! Indicador não definido.
5.2.9. Aplicações Típicas	Erro! Indicador não definido.

5.3.	Bombas de Diafragma.....	Erro! Indicador não definido.
5.3.1.	Acionamento Mecânico Direto.....	Erro! Indicador não definido.
5.3.2.	Acionamento Hidráulico	Erro! Indicador não definido.
5.3.3.	Acionamento Eletromagnético.....	Erro! Indicador não definido.
5.3.4.	Diafragma Simples versus Diafragma Diversos	Erro! Indicador não definido.
5.3.5.	Materiais do Diafragma	Erro! Indicador não definido.
5.3.6.	Válvulas de Retenção.....	Erro! Indicador não definido.
5.3.7.	Vantagens e Limitações	Erro! Indicador não definido.
5.3.8.	Aplicações Típicas	Erro! Indicador não definido.
5.4.	Bomba Pneumática.....	Erro! Indicador não definido.
5.4.1.	Principais Componentes	Erro! Indicador não definido.
5.4.2.	Princípio de Funcionamento.....	Erro! Indicador não definido.
5.4.3.	Efeito Joule-Thomson: Congelamento no Escapamento	Erro! Indicador não definido.
5.4.4.	Energia Pneumática e Eficiência Energética.....	Erro! Indicador não definido.
5.4.5.	Bomba Pneumática Não-Requer Válvula de Alívio	Erro! Indicador não definido.
5.4.6.	Curva Característica da Bomba Pneumática.....	Erro! Indicador não definido.
5.4.6.1.	Influência da Viscosidade na Curva Característica	Erro! Indicador não definido.
5.4.6.2.	Influência da Massa Específica	Erro! Indicador não definido.
5.4.7.	Especificação da Bomba Pneumática.....	Erro! Indicador não definido.
5.4.8.	Acessórios: Amortecedor de Pulsação e Spill Stop.....	Erro! Indicador não definido.
5.4.9.	Vantagens das Bombas Pneumáticas.....	Erro! Indicador não definido.
5.4.10.	Limitações	Erro! Indicador não definido.
5.4.11.	Aplicações Típicas	Erro! Indicador não definido.
6.	BOMBAS DOSADORAS	Erro! Indicador não definido.
6.1.	Conceito de Dosagem	Erro! Indicador não definido.
6.2.	Parâmetros Específicos de Especificação	Erro! Indicador não definido.
6.3.	Tecnologias para Dosagem	Erro! Indicador não definido.
6.4.	Crterios de Seleção	Erro! Indicador não definido.
6.5.	Mecanismo de Ajuste de Vazão	Erro! Indicador não definido.
6.6.	Instalação de dosagem típica	Erro! Indicador não definido.
7.	SELEÇÃO E APLICAÇÕES DAS BDP.....	Erro! Indicador não definido.
7.1.	Metodologia das Perguntas.....	Erro! Indicador não definido.
7.1.1.	Pergunta 1: O Fluido é Bombeável por BDP?.....	Erro! Indicador não definido.
7.1.2.	Pergunta 2: Quais são as Restrições do Fluido?.....	Erro! Indicador não definido.
7.1.3.	Pergunta 3: Quais são os Requisitos de Processo?.....	Erro! Indicador não definido.
7.1.4.	Pergunta 4: Quais são as Restrições de Instalação?	Erro! Indicador não definido.

7.1.5.	Pergunta 5: Qual é o Segmento Industrial?	Erro! Indicador não definido.
7.1.5.1.	Indústria com Grau Sanitário: Alimentícia, Bebidas, Farmacêutica e Cosmética	Erro! Indicador não definido.
7.1.5.2.	Indústria Química e Petroquímica	Erro! Indicador não definido.
7.1.5.3.	Mineração e Saneamento	Erro! Indicador não definido.
7.1.5.4.	Petróleo, Gás e Geração de Energia	Erro! Indicador não definido.
7.1.5.5.	Indústria de Papel e Celulose	Erro! Indicador não definido.
7.1.6.	Pergunta 6: Fluido tem Características Especiais?	Erro! Indicador não definido.
7.1.6.1.	Fluidos Não Newtonianos	Erro! Indicador não definido.
7.1.6.2.	Fluidos com Gases Dissolvidos ou em Mistura Bifásica	Erro! Indicador não definido.
7.1.6.3.	Fluidos Sensíveis à Temperatura	Erro! Indicador não definido.
7.2.	Metodologia da Interação com o Fabricante	Erro! Indicador não definido.
7.2.1.	Informações que o Comprador Deve Fornecer	Erro! Indicador não definido.
7.2.2.	Perguntas que o Comprador Deve Fazer ao Fabricante	Erro! Indicador não definido.
7.3.	Resumo das BDP	Erro! Indicador não definido.
7.4.	Erros Comuns de Seleção e Como Evitá-los	Erro! Indicador não definido.
7.4.1.	Selecionar para Água quando o Fluido é Outro	Erro! Indicador não definido.
7.4.2.	Ignorar o Fator de Correção de Viscosidade	Erro! Indicador não definido.
7.4.3.	Confundir Pressão Máxima como Pressão de Operação	Erro! Indicador não definido.
7.4.4.	Copiar a Especificação de uma Bomba Existente	Erro! Indicador não definido.
7.4.5.	Não Verificar o Compressor para Bomba Pneumática	Erro! Indicador não definido.
8.	BIBLIOGRAFIA	Erro! Indicador não definido.
8.1.	Bibliografia Básica	Erro! Indicador não definido.
8.2.	Bibliografia Complementar	Erro! Indicador não definido.
8.3.	Documentação Técnica de Fabricantes	Erro! Indicador não definido.
8.4.	Recursos de Imagens	Erro! Indicador não definido.
9.	ANEXO	Erro! Indicador não definido.
9.1.	Massa Específica (ρ):	Erro! Indicador não definido.
9.2.	Peso Específico (γ):	Erro! Indicador não definido.
9.3.	Gravidade Específica (SG) ou Densidade Relativa:	Erro! Indicador não definido.
9.4.	Viscosidade Dinâmica (μ):	Erro! Indicador não definido.
9.5.	Viscosidade Cinemática (ν) ou Viscosidade Relativa:	Erro! Indicador não definido.
9.6.	Conceito de Pressão (p)	Erro! Indicador não definido.
9.7.	Pressão Hidrostática	Erro! Indicador não definido.
9.8.	Carga de Pressão	Erro! Indicador não definido.
9.9.	Pressão Absoluta, Manométrica e Vacuométrica	Erro! Indicador não definido.
9.10.	Pressão de Vapor (PV)	Erro! Indicador não definido.

- 9.10.1.1. Pressão de Vapor da Água Erro! Indicador não definido.
- 9.10.1.2. Pressão de Vapor de Outros Fluidos Erro! Indicador não definido.



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 **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, bombas, compressores, medições, perdas, transientes e comportamento reológico.

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 Bombas de Deslocamento Positivo.

Após o estudo dos fundamentos da mecânica dos fluidos e das bombas centrífugas, o engenheiro se depara com uma realidade de campo que os currículos tradicionais raramente cobrem com profundidade: existe um universo inteiro de equipamentos que operam por um princípio completamente diferente da centrífuga, e que domina as aplicações onde viscosidade, pressão elevada, dosagem precisa, fluidos sensíveis ou condições severas de processo fazem a bomba centrífuga inadequada. Esses equipamentos são as bombas de deslocamento positivo.

O foco deste material está na compreensão do princípio de funcionamento de cada família de BDP, nas suas características operacionais reais e, sobretudo, nos critérios que determinam qual tecnologia é a mais adequada para cada aplicação industrial. A teoria é apresentada como ferramenta para embasar a decisão de campo, não como fim em si mesma.

A disciplina busca desenvolver a capacidade do engenheiro de identificar, entre engrenagens, parafusos, lóbulos, helicoidais, peristálticas, diafragmas e pneumáticas, o equipamento correto para um fluido, uma pressão e um processo específicos, e de interagir com fabricantes e fornecedores com fundamentação técnica sólida.

A proposta didática privilegia:

- compreensão do mecanismo de funcionamento antes da especificação técnica;
- análise crítica das características operacionais de cada tipo, incluindo limitações reais de campo;
- critérios de seleção baseados nas propriedades do fluido e nos requisitos do processo;
- erros comuns de especificação e como evitá-los na prática industrial.

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 a 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

Capacitar o aluno a compreender os princípios de funcionamento, as características operacionais e os critérios de seleção das bombas de deslocamento positivo, preparando-o para identificar a tecnologia adequada a cada aplicação industrial e interagir tecnicamente com fabricantes e fornecedores com fundamentação sólida.

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

- Compreender o princípio de deslocamento positivo e distingui-lo do princípio das bombas centrífugas em termos de comportamento hidráulico e aplicação.
- Classificar as BDP quanto ao tipo construtivo (rotativas e alternativas) e identificar as características que diferenciam cada família.
- Interpretar as curvas características das BDP, compreendendo a relação entre vazão, rotação, pressão e slip.
- Analisar a influência das propriedades do fluido (viscosidade, abrasividade, sensibilidade ao cisalhamento, presença de sólidos) na seleção e no desempenho da bomba.
- Calcular a perda de carga por aceleração e desaceleração em instalações com bombas alternativas e avaliar seu impacto no NPSHd disponível.
- Selecionar o tipo de BDP mais adequado para uma aplicação industrial a partir das propriedades do fluido e dos requisitos do processo.
- Reconhecer as limitações operacionais de cada tecnologia e os erros mais comuns de especificação.
- Avaliar criticamente argumentos técnicos e comerciais de fornecedores, identificando vieses e lacunas de informação.
- Especificar os acessórios de proteção e instalação necessários: válvulas de alívio, amortecedores de pulsação, válvulas de contrapressão e sistemas de detecção de falha.
- Diagnosticar problemas operacionais recorrentes e propor ações corretivas fundamentadas no princípio de funcionamento do equipamento.

1. INTRODUÇÃO ÀS BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO

Ao longo dos cursos de graduação em engenharia, as bombas costumam ser apresentadas com foco quase exclusivo nas bombas centrífugas, o tipo mais comum na indústria e o mais bem documentado na literatura técnica.

Entretanto, existe um universo igualmente relevante de equipamentos que operam por um princípio completamente diferente: as bombas de deslocamento positivo (BDP), também chamadas de bombas volumétricas ou bombas hidrostáticas.

Enquanto as bombas centrífugas (BC) aceleram o fluido por força centrífuga e convertem energia cinética em pressão, as bombas de deslocamento positivo funcionam por um mecanismo muito mais direto, elas empurram o fluido fisicamente, deslocando volumes definidos a cada ciclo de operação.

Essa diferença fundamental de princípio resulta em características operacionais completamente distintas, o que torna cada família de bombas adequada para um conjunto específico de aplicações.

Compreender essas diferenças, não apenas como curiosidade teórica, mas como ferramenta prática de análise e especificação, é o objetivo central deste módulo.

1.1. O Princípio de Funcionamento das BDP

O nome bomba de deslocamento positivo descreve exatamente o que acontece dentro do equipamento: um componente mecânico desloca positivamente, ou seja, empurra de forma direta, um volume de fluido da sucção para a descarga.

Independentemente do tipo construtivo, seja engrenagens girando, um pistão subindo e descendo, um diafragma oscilando ou um tubo sendo comprimido, o princípio é sempre o mesmo: cria-se uma câmara de volume variável.

Quando essa câmara aumenta de volume na região de sucção, a pressão interna cai e o fluido do reservatório é empurrado para dentro pela pressão do sistema de sucção.

Quando a câmara diminui de volume na região de descarga, o fluido é comprimido e forçado para fora através da linha de descarga.

Em toda BDP: aumento de volume → queda de pressão → sucção | diminuição de volume → aumento de pressão → descarga

Ilustramos o funcionamento logo a seguir:

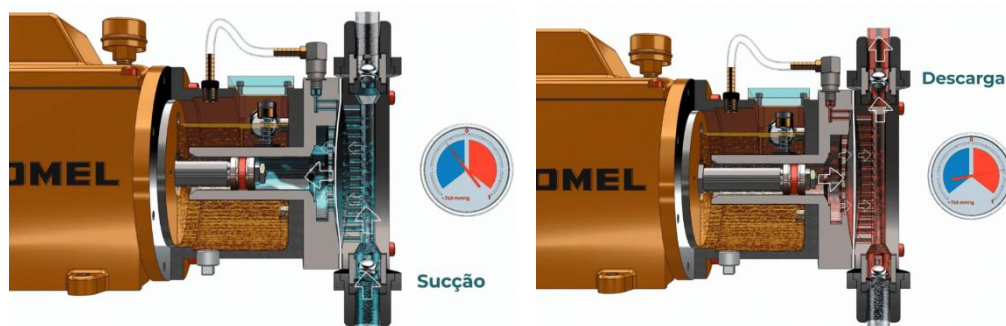


Figura 1: Funcionamento da bomba de diafragma [sucção à esquerda e descarga à direita] (Fonte: OMEL)

Esse mecanismo tem uma consequência imediata e muito importante: ao contrário da bomba centrífuga, cuja pressão máxima é limitada pela geometria do rotor e pela velocidade de rotação, a BDP continuará gerando pressão enquanto o motor tiver potência para girar, até que algo ceda.

Essa característica é ao mesmo tempo sua maior virtude (capacidade de gerar altas pressões com vazões pequenas) e seu maior risco operacional (necessidade obrigatória de proteção contra sobrepressão).

Vale ressaltar que o aumento de pressão das BDP é proporcional à resistência ao movimento, ou seja, a altura de elevação mais as perdas de carga na instalação. Isso significa dizer que, caso a bomba esteja instalada numa bancada de teste, sem nenhuma restrição, a pressão de descarga será praticamente zero, diferentemente das bombas centrífugas, que apresentam um aumento de pressão.

1.2. BDP versus BC - Diferença Fundamental

Para o engenheiro que já domina as bombas centrífugas, a transição para as BDP exige uma mudança de perspectiva sobre como a bomba interage com o sistema. A pergunta mais esclarecedora é: o que acontece quando a válvula de descarga é fechada com a bomba em funcionamento?

Na bomba centrífuga, fechar a válvula de descarga é uma operação segura e corriqueira, a bomba simplesmente opera no ponto de shut-off, com vazão zero e pressão máxima definida pela curva do fabricante. Nenhum componente é danificado nessa condição (salvo aquecimento do fluido se mantida por tempo prolongado).

Na BDP, fechar a válvula de descarga com a bomba em operação é uma situação crítica. Como a bomba continua deslocando volume positivamente, a pressão na linha de descarga subirá continuamente até que algum componente do sistema ceda, seja a tubulação, uma junta, a carcaça da bomba ou o próprio motor, que sobrecarrega e queima.

Por isso, toda instalação com BDP exige obrigatoriamente uma válvula de alívio ou de segurança que limite a pressão máxima do sistema.

Atenção: A válvula de alívio nas bombas de deslocamento positivo não é um opcional de projeto, é um item de segurança obrigatório.

Operação sem válvula de alívio pode resultar em ruptura de tubulação, falha catastrófica da bomba ou queima do motor.

Em campo, é muito comum encontrar instalações com válvulas de alívio removidas, com o ressalvo mal dimensionado ou com o set point errado, qualquer uma dessas situações representa risco real.

Fogem dessa regra as bombas pneumáticas e bombas eletromagnéticas, cujas energias motoras são, respectivamente, a energia pneumática e eletromagnética.

Nesses casos, acontecerá um equilíbrio de forças entre a força motriz e a força decorrente da pressão, paralisando a bomba sem maiores riscos de segurança, exceto danos possíveis danos elétricos de sobrecarga na bomba eletromagnética.

A tabela a seguir resume as principais diferenças de comportamento entre as duas famílias de bombas:

Característica	Bomba de Deslocamento Positivo (BDP)	Bomba Centrífuga (BC)
Mecanismo de geração de pressão	Deslocamento físico de um volume de fluido, a bomba empurra o fluido	Aceleração do fluido pelo rotor e conversão em pressão na voluta (Bernoulli)
Comportamento com aumento de pressão do sistema	A vazão se mantém aproximadamente constante, a bomba continua empurrando	A vazão cai à medida que a pressão do sistema aumenta, a bomba não impõe vazão
Comportamento a válvula fechada	Pressão sobe continuamente até ruptura de algum componente ou atuação da válvula de alívio	A bomba atinge a pressão de shut-off e mantém essa pressão, sem risco imediato de ruptura
Válvula de alívio / segurança	Obrigatória em qualquer instalação, é a proteção primária do sistema	Normalmente dispensável, a curva H×Q limita naturalmente a pressão máxima
Variação de viscosidade do fluido	Afeta as folgas internas e a eficiência volumétrica, exige ajuste para fluidos muito viscosos ou muito leves	Reduz significativamente o desempenho, queda de vazão, altura e rendimento acima de 20 a 30 [cSt]
Pulsação de fluxo	Presente em todas as BDP alternativas e em algumas rotativas, intensidade depende do número de câmaras	Escoamento praticamente contínuo e sem pulsação
Capacidade de autoescorvamento	A grande maioria das BDP é autoescorvante, consegue remover ar da linha de sucção	Bombas centrífugas convencionais não são autoescorvantes, exigem escorvamento externo
Sensibilidade a sólidos em suspensão	Depende do tipo: algumas BDP (peristáltica, diafragma) toleram bem; outras (engrenagens, palhetas) são sensíveis	Depende do tipo de rotor, rotores abertos toleram mais; fechados são mais sensíveis
Faixa de aplicação típica	Fluidos viscosos, abrasivos, sensíveis ao cisalhamento, dosagem precisa, altas pressões com baixas vazões	Fluidos limpos de baixa viscosidade, grandes vazões, baixas a médias pressões

1.3. Terminologia - Três Nomes para a Mesma Família

As bombas de deslocamento positivo aparecem na literatura técnica e nos catálogos de fabricantes com três denominações diferentes, que são usadas de forma intercambiável:

- **Bomba de deslocamento positivo (BDP):** nomenclatura mais precisa do ponto de vista do princípio de funcionamento, descreve o mecanismo de funcionamento, por meio do deslocamento de um determinado componente que pode ser rotativo ou alternativo.
- **Bomba volumétrica:** nomenclatura que enfatiza a característica de deslocar um volume definido por ciclo, daí o termo volumétrica. Como a vazão é proporcional à rotação (ou frequência de ciclo), conhecer o volume deslocado por rotação permite calcular a vazão com precisão.
- **Bomba hidrostática:** nomenclatura que reforça o princípio físico: a transferência de energia se dá por variação de pressão estática, sem aceleração significativa do fluido. Na hidrodinâmica, quando não há aceleração, a análise é feita por equações estáticas, daí o termo hidrostática.

BDP = Bomba Volumétrica = Bomba Hidrostática → são a mesma coisa, apenas com ênfases diferentes no princípio físico.

Observação: Em inglês, os termos equivalentes são: Positive Displacement Pump (PDP), ou simplesmente volumetric pump. Em catálogos americanos e normas API, o termo PDP é o mais comum.

1.4. Classificação das BDP - Rotativas e Alternativas

As bombas de deslocamento positivo são divididas em duas grandes famílias, com base na natureza do movimento do elemento de bombeamento, a saber, bombas alternativas e rotativas. Cada uma delas com características específicas que serão abordados a seguir:

1.4.1. Bombas Alternativas

Nas bombas alternativas, o elemento de bombeamento executa movimento de vai-e-vem, admite fluido em um curso e o expelle no curso seguinte. Por isso, o escoamento resultante é naturalmente pulsante: há intervalos entre os pulsos de descarga que geram variação de pressão e vazão na linha.

Esse comportamento provoca uma perda de carga adicional que deve ser considerada no momento do dimensionamento.

Para minimizar a pulsação em bombas alternativas, utilizam-se configurações com múltiplos cilindros ou câmaras defasadas, chamadas de duplex (2 cilindros), triplex (3 cilindros) e assim por diante.

Mesmo assim, em aplicações sensíveis, são necessários amortecedores de pulsação.

- Pistão e êmbolo
- Diafragma com diferentes mecanismos de acionamento como:
 - Mecânico
 - Hidráulico
 - Por ar comprimido
 - Pistão eletromagnético

Um exemplo de bomba de pistão está ilustrado a seguir:

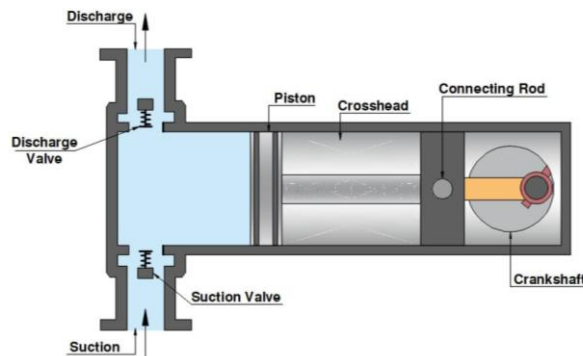


Figura 2: Bomba de pistão (Fonte: ISQ Directory)

1.4.2. Bombas Rotativas

Nas bombas rotativas, o elemento de bombeamento executa movimento de rotação contínuo. Rotores, engrenagens, lóbulos, parafusos ou palhetas giram dentro de uma carcaça e criam câmaras de volume variável que transportam o fluido da sucção para a descarga de forma contínua.

A principal consequência do movimento contínuo é o escoamento relativamente estável, a pulsação, embora presente, é muito menor do que nas bombas alternativas.

Quanto maior o número de câmaras ativas por rotação, menor a pulsação resultante.

Entre os tipos mais comuns, podemos citar:

- Engrenagens externas e internas
- Lóbulos e pistão circunferencial
- Palhetas
- Parafuso (duplo e triplo)
- Helicoidal, cavidade progressiva ou parafuso simples
- Rotor flexível

Uma bomba de engrenagens externas está representada logo a seguir:

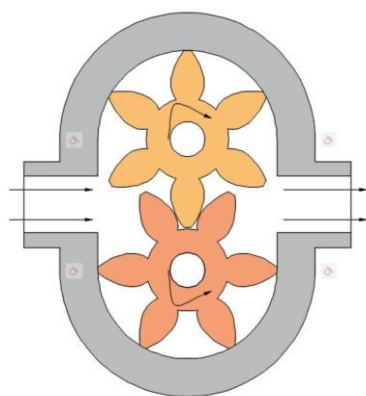


Figura 3: Bomba de engrenagens externas (Fonte: ISQ Directory)

1.4.3. O Caso Especial: Bomba Peristáltica

A bomba peristáltica ocupa uma posição singular nessa classificação: é construtivamente rotativa, possui um rotor que gira continuamente, mas apresenta comportamento hidráulico típico de bomba alternativa, com pulsação significativa.

O motivo é o próprio mecanismo de bombeamento: o rotor comprime sequencialmente um tubo flexível (mangote), gerando pulsos de descarga a cada passagem de cada sapata ou rolete pelo mangote.

O número de sapatas ou roletes determina a frequência da pulsação, quanto mais, menor a amplitude dos pulsos, mas a pulsação nunca é eliminada completamente.

Por esse comportamento híbrido, decidimos tratar bomba peristáltica como uma categoria à parte, e não se enquadra plenamente em nenhuma das duas famílias tradicionais.

Esse detalhe tem implicação prática: ao contrário das demais BDP rotativas, a instalação de atenuadores de pulsação é praticamente obrigatória em sistemas com bomba peristáltica.

Uma bomba dosadora, está ilustrado a seguir:

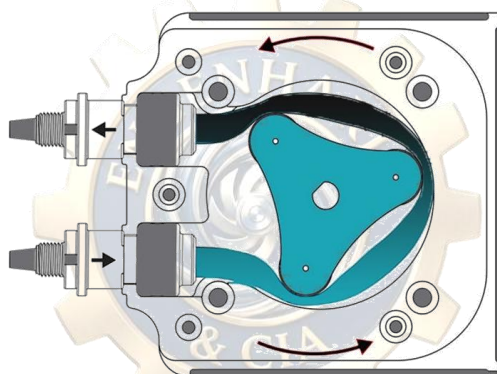


Figura 4: Bomba peristáltica dosadora (Fonte: ISQ Directory)

Observação: Os detalhes de cada bomba serão apresentados em capítulo próprio mais a frente, nesse material.

1.5. O Papel das Folgas nas BDP Rotativas

Um conceito que aparece repetidamente no estudo das BDP rotativas, e que tem impacto direto no desempenho, na seleção e na manutenção, é o das folgas internas.

Compreender por que as folgas existem e o que acontece quando estão inapropriadas é fundamental para qualquer profissional que lide com esses equipamentos.

1.5.1. Por que as Folgas Existem

Em uma BDP rotativa perfeita, as câmaras seriam totalmente estanques e todo o fluido admitido na sucção seria descarregado na descarga. Na prática, isso é impossível: os componentes rotativos precisam de espaço para girar sem contato direto uns com os outros e com a carcaça. Esse espaço necessário é a folga.

A folga permite que uma pequena quantidade de fluido recircule internamente, da região de alta pressão (descarga) para a região de baixa pressão (sucção). Essa recirculação interna é denominada slip ou escorregamento, e representa a perda volumétrica da bomba. Quanto maior a folga, maior o slip e menor a eficiência volumétrica.

O slip é o equivalente à recirculação em bombas centrífugas.

1.5.2. Viscosidade e Folga - Uma Relação Crítica

A viscosidade do fluido é o parâmetro que mais influencia o comportamento do slip. Um fluido mais viscoso resiste mais ao escoamento através das folgas, o slip é menor e a eficiência volumétrica é maior. Um fluido menos viscoso escoa facilmente pelas folgas, o slip aumenta e a eficiência cai.

Isso tem uma implicação prática importante: alguns modelos de BDP rotativas, como por exemplo, as de engrenagens internas, exigem ajuste mecânico das folgas axiais em função da viscosidade do fluido.

Configurar a bomba para uma viscosidade mais alta e operar com fluido de viscosidade menor resulta em folgas excessivas, alto slip e perda significativa de desempenho. O contrário, configurar para viscosidade baixa e operar com fluido viscoso, gera cisalhamento excessivo, aquecimento e desgaste acelerado.

Atenção: Nunca teste uma bomba de engrenagens com água se o fluido de processo for óleo ou produto viscoso. A água não lubrifica adequadamente os componentes internos dessas bombas, causando desgaste severo em poucos minutos. O teste deve ser sempre realizado com o fluido de processo ou com um fluido de viscosidade equivalente.

1.5.3. Folgas e Escorvamento

As folgas também influenciam a capacidade de autoescorvamento das BDP rotativas. Para que a bomba consiga remover o ar da linha de sucção (escorvamento), ela precisa gerar uma depressão suficiente na câmara de sucção.

Com folgas grandes, necessárias para fluidos muito viscosos, o ar escoa facilmente pelo slip e a bomba tem dificuldade em criar o vácuo necessário para escorvar.

Por isso, BDP rotativas com grandes folgas funcionam melhor em instalações afogadas (nível do reservatório acima da bomba), onde o fluido entra naturalmente na bomba antes da partida.

Em instalações não afogadas com altura de sucção significativa, deve-se verificar a capacidade de escorvamento da bomba para as condições específicas da instalação.

Alguns fabricantes de bombas de lóbulos, como a Borger, possuem modelos de lóbulos com ponta de borracha que tocam a carcaça e geram uma vedação mais eficiente. Um exemplo está ilustrado a seguir:



Figura 5: Bomba de lóbulos com ponta de borracha (Fonte: Borger)

1.6. Pulsação de Fluxo - Causas e Mitigação

A pulsação é uma característica inerente às BDP alternativas e à bomba peristáltica, e, em menor grau, está presente em todas as BDP rotativas. Compreender suas causas e consequências é essencial para o projeto adequado de instalações com esses equipamentos.

1.6.1. Por que a Pulsação Ocorre

Nas BDP alternativas a pulsação é direta: durante o curso de admissão, não há descarga; durante o curso de descarga, a vazão é máxima. O resultado é um fluxo intermitente, pulsos de pressão separados por intervalos de baixa ou nula descarga.

Nas BDP rotativas, a pulsação ocorre porque a área de passagem entre câmaras varia ao longo da rotação. À medida que uma câmara abre para a descarga, há um pulso de pressão.

Tem-se um fluxo mais suave, quanto maior o número de câmaras ativas por rotação (mais pás, mais lóbulos, mais fios de parafuso), maior a frequência dos pulsos e menor sua amplitude.

1.6.2. Consequências da Pulsação

A pulsação não é apenas uma questão de conforto operacional, ela tem consequências técnicas reais:

- **Fadiga em tubulações e conexões:** variações cíclicas de pressão são cargas de fadiga que, ao longo do tempo, podem causar falhas em soldas, flanges e suportes de tubulação.
- **Danos a instrumentos:** manômetros, medidores de vazão e transmissores de pressão são sensíveis a pulsações, podem ter vida útil reduzida ou leituras imprecisas.
- **Imprecisão em dosagem:** em bombas dosadoras, a pulsação pode comprometer a precisão da dose entregue ao processo.
- **Vibração e ruído:** pulsações intensas excitam frequências naturais da tubulação e da estrutura, gerando vibração e ruído característicos.

1.6.3. Mitigação da Pulsação

As principais estratégias para reduzir o impacto da pulsação em instalações com BDP são:

- **Amortecedor (atenuador) de pulsação:**
dispositivo instalado na linha de descarga (e às vezes na sucção) que contém uma câmara de gás pressurizado separada do fluido por uma membrana.
O gás absorve os picos de pressão e os libera nos vales, suavizando o fluxo.
É a solução mais eficaz e praticamente obrigatória em instalações com bombas peristálticas e bombas alternativas de grande porte.
- **Múltiplos cilindros ou câmaras defasadas:**

aumentar o número de câmaras ativas e defasá-las angularmente reduz a amplitude da pulsação.

Uma bomba triplex (3 cilindros a 120°) pulsa muito menos que uma simplex (1 cilindro).

- **Inversores de frequência:**
o controle preciso da rotação permite ajustar a frequência dos pulsos para evitar ressonância com as frequências naturais da instalação.
- **Dimensionamento adequado da tubulação:**
tubulações mais rígidas, com suportes bem espaçados e sem comprimentos livres excessivos, são menos susceptíveis à excitação por pulsação.

1.7. Válvula de Alívio - Proteção Obrigatória

A válvula de alívio (também chamada de válvula de segurança) é o dispositivo que protege o sistema contra sobrepressão nas instalações com BDP.

Seu funcionamento é simples: quando a pressão na linha de descarga ultrapassa o valor de ajuste (set point), a válvula abre e desvia parte do fluido de volta para a linha de sucção ou para o reservatório, limitando a pressão máxima do sistema.

1.7.1. Localização e Configuração

A válvula de alívio deve ser instalada entre a bomba e a primeira válvula de bloqueio da linha de descarga. Se for instalada após uma válvula de bloqueio que possa ser fechada, a válvula de alívio perde a função, a pressão pode subir entre a bomba e a válvula de bloqueio sem proteção.

Existem dois tipos de instalação:

- **Válvula de alívio interna (integral):**
alguns fabricantes de BDP incorporam a válvula de alívio dentro da própria carcaça da bomba. É conveniente e garante que a bomba nunca opere sem proteção.
A desvantagem é que o fluido aliviado retorna à sucção da própria bomba, se a condição de sobrepressão persistir, o fluido circula em loop, aquece progressivamente e pode causar danos por temperatura.
- **Válvula de alívio externa:**
instalada na tubulação, com retorno ao reservatório de sucção (não à linha de sucção da bomba). É a solução preferível para operação contínua, pois evita o aquecimento progressivo do fluido em situações de alívio prolongado.

Atenção: As válvulas de alívio mais comuns são unidirecionais e portanto devem estar instaladas de forma adequada de acordo com a rotação da bomba.

1.7.2. Ajuste do Set Point

O set point da válvula de alívio deve ser ajustado para um valor acima da pressão máxima de operação normal, tipicamente 10 a 20% acima, mas abaixo da pressão

máxima admissível (MAWP) dos componentes mais fracos do sistema (tubulação, flanges, carcaça da bomba).

Atenção: Uma válvula de alívio ajustada muito baixo abrirá durante a operação normal, desperdiçando energia e causando desgaste prematuro da válvula.

Ajustada muito alta, não protege adequadamente o sistema. O ajuste correto é uma decisão de engenharia, não um valor padrão de fábrica a ser usado sem análise.

1.7.3. Válvulas de Alívio Bidirecionais

Algumas BDP podem operar nos dois sentidos de rotação, o que inverte a sucção e a descarga. Nesse caso, uma válvula de alívio unidirecional convencional protege apenas um sentido de operação.

Para proteção em ambos os sentidos, são necessárias válvulas de alívio bidirecionais (mais caras e menos comuns) ou duas válvulas opostas em paralelo.

Observação: Inversão de rotação em BDP sem proteção adequada é uma causa comum de falha em campo.

Ao inverter o sentido de rotação, o lado que era descarga vira sucção, e a válvula de alívio convencional instalada na antiga descarga passa a estar na linha de sucção, onde não tem função protetora.

A troca de fase durante a instalação do motor é uma causa comum de inversão de rotação das bombas.

2. CURVAS E DESEMPENHO DAS BDP

O comportamento de uma bomba de deslocamento positivo frente às variáveis do sistema, pressão, vazão, rotação e viscosidade, é fundamentalmente diferente do comportamento das bombas centrífugas.

Quem projeta instalações ou analisa problemas operacionais com BDP a partir dos conceitos aprendidos para bombas centrífugas cometerá erros sistemáticos.

Este capítulo apresenta os conceitos e ferramentas necessários para a análise correta do desempenho das BDP.

Inicialmente, faremos um paralelo com as bombas centrífugas, a fim de destacar as principais diferenças entre elas e, posteriormente, quando cada bomba for abordada, o diagrama correspondente.

2.1. A Curva Característica da BDP - Teórica e Real

As curvas características de qualquer bomba são gráficos que relacionam várias propriedades com a vazão entregue. A principal delas é com diferencial de pressão gerado (eixo vertical), para uma dada rotação.

É a impressão digital do equipamento, tudo que a bomba pode ou não pode fazer está representado nesse gráfico.

Os fabricantes das bombas centrífugas costumam representar suas bombas por meio de gráficos que relacionam suas propriedades com a vazão (normalmente o eixo horizontal), sendo a principal, a altura manométrica versus vazão, conforme ilustrado a seguir:

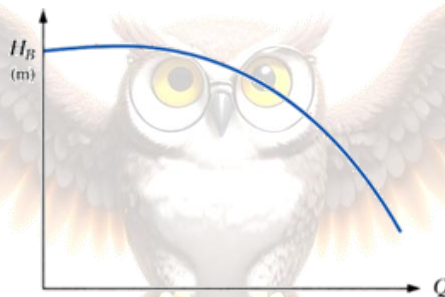


Figura 6: Curva $H_B \times Q$ típica das bombas centrífugas (Fonte: Engenharia e Cia)

2.1.1. A Curva Teórica - Reta Vertical

Para uma BDP, a curva mais comum é da pressão de descarga versus vazão, ao invés da altura manométrica (carga de pressão).

Se formos traçar um diagrama para a BDP ideal equivalente ao da BC, teríamos algo semelhante ao representado a seguir:

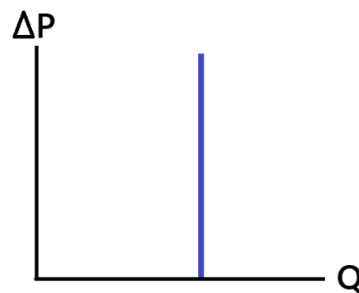


Figura 7: Curva teórica $\Delta P \times Q$ típica das BDP (Fonte: Engenharia e Cia)

Esse tipo de diagrama não é comum, já que não apresenta informações relevantes, no entanto, é didaticamente apropriada para o pleno entendimento do seu comportamento.

2.1.2. A Curva Real - O Efeito do Slip

A curva teórica apresentada anteriormente representa as BDP de forma teórica, na prática isso vai depender do tipo de bomba.

A curva real para a maioria das BDP alternativas se aproxima da bomba teórica, no entanto, para as BDP rotativas não. Existem também variação a depender do acionamento que veremos mais adiante.

As BDP rotativa, como já citado anteriormente, elas possuem folgas entre os elementos rotativos e a carcaça que permitem o slip. Por conta disso, a vazão bombeada não é constante .

O resultado é uma curva real levemente inclinada para esquerda à medida que a pressão aumenta: a maior diferença de pressão intensifica o fluxo pelo slip, reduzindo a vazão líquida entregue. A inclinação da curva real depende de dois fatores principais:

- **Magnitude das folgas:**
folgas maiores resultam em maior slip e curva mais inclinada. Folgas aumentam com o desgaste ao longo do tempo, uma bomba desgastada apresenta curva real mais inclinada que a nova.
- **Viscosidade do fluido:**
fluidos mais viscosos resistem ao escoamento pelas folgas, reduzindo o slip. Para viscosidades altas (geralmente acima de 500–1.000 [cP], dependendo do tipo de bomba), o slip é praticamente nulo e a curva real converge para a teórica. Para fluidos de baixa viscosidade (água, solventes leves), o slip é mais intenso e a curva real se afasta da teórica.

Levando esse fenômeno em consideração, a curva pode ser representada conforme a seguir:

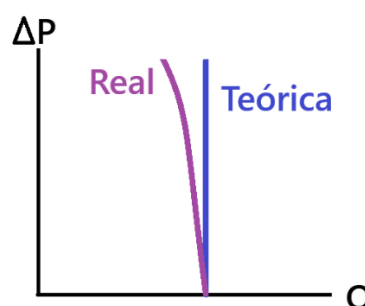


Figura 8: Curvas $\Delta P \times Q$ teórica e real de uma BDP (Fonte: Engenharia e Cia)

A curva real ilustrada também não é comum, mas cumpre seu papel didático. As curvas reais relacionam a vazão em função da rotação da bomba e da viscosidade de trabalho. Elas serão apresentadas no capítulo 0.

Consequência prática: em BDP rotativas operando com fluidos viscosos, a viscosidade trabalha a favor do desempenho, a bomba entrega mais do que o catálogo indica para água.

2.1.3. Eficiência Volumétrica

A eficiência volumétrica (η_v) é a relação entre a vazão real entregue e a vazão teórica (deslocamento $\times$ rotação):

$$\eta_v = \frac{Q_{real}}{Q_{teórica}} = \frac{Q_{real}}{Q_{ciclo} \cdot n} \quad (1)$$

onde Q_{ciclo} é o volume deslocado por rotação (exemplo: cm³/rev ou L/rev) e n é a rotação ([RPM] ou rps).

Em bombas alternativas, cujas válvulas de retenção devem estar bem vedadas para um funcionamento apropriado, η_v se aproxima de 1,0 (sem slip), por outro lado, em BDP rotativas com fluidos de baixa viscosidade, η_v pode cair para 0,70 ou menos em condições adversas de pressão e desgaste.

O monitoramento da eficiência volumétrica ao longo do tempo é uma ferramenta de manutenção preditiva eficaz: queda progressiva de η_v sem alteração de processo indica aumento de folgas internas por desgaste, aliás, esse é um dos principais problemas das BDP, o desgaste acentuado dos componentes pode provocar uma redução significativa do seu desempenho.

2.2. Curva do Sistema (CS)

Trata-se do diagrama que representa a resistência que a instalação impõe ao bombeamento.

Quanto maior a resistência do sistema maior será a altura manométrica necessária para promover o bombeamento que também é representada em função da vazão.

Numa primeira aproximação, a curva do sistema em sistemas com reservatórios abertos à atmosfera corresponde a:

$$CS = h_{geo} + H_p \quad (2)$$

Onde h_{geo} é altura geométrica de elevação e H_p é correspondente às perdas de carga. Estas sendo proporcional ao quadrado da vazão, portanto, a curva do sistema é uma função do segundo grau, como ilustrado a seguir:

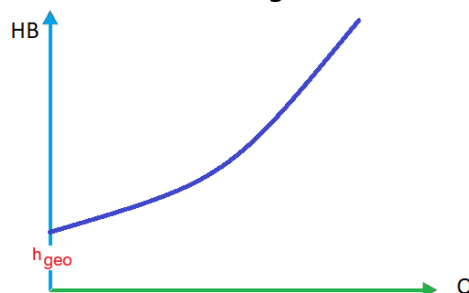


Figura 9: Representação da curva do sistema (Fonte: Engenharia e Cia)

Lembrando que a Altura Geométrica de Elevação (h_{geo}) corresponde à diferença de cota vertical entre o nível do reservatório de recalque e o nível do reservatório de sucção ou descarga.

Essa representação e formulação matemática é mais comum no universo das bombas centrífugas, como com as BDP é mais comum o uso da pressão em unidades como Pa (pascal), [bar] ou [PSI] (pound square inch ou libras por polegadas ao quadrado), a equação pode ser escrita:

$$CS = (h_{geo} + H_p) \cdot \rho g \quad (3)$$

2.3. Ponto de Operação (PO)

É o ponto corresponde à condição de funcionamento da bomba relacionado à altura manométrica ou pressão diferencial e vazão de operação.

Ele é obtido pelo cruzamento das curvas da bomba (CB) e do sistema (CS) que está representado na figura seguinte:

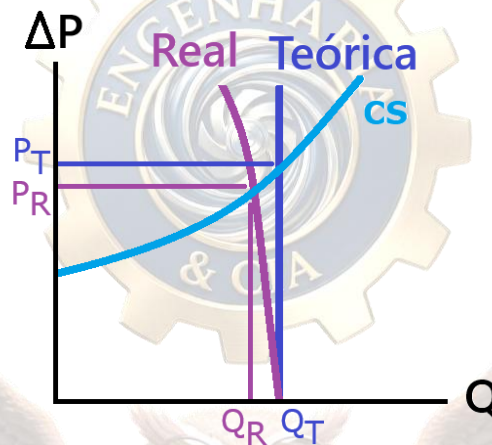


Figura 10: Curvas da BDP real e teórica e a curva do sistema (Fonte: Engenharia e Cia)

A curva da BDP alternativa é muito próxima da curva teórica, enquanto a BDP rotativa é semelhante a real.

Assim, para a mesma instalação, a BDP alternativa operará numa vazão e pressão maior do que a BDP rotativa.

Novamente destacando, esse gráfico não é comum na literatura técnica ou usada por fabricantes de BDP, mas é muito ilustrativo sobre o funcionamento delas.

2.4. Controle de Vazão em BDP

O controle de vazão em BDP é um tema recorrente de confusão para profissionais habituados a bombas centrífugas.

Na BC, ajusta-se a válvula de descarga, abrindo-a ou fechando-a para aumentar ou diminuir a vazão. Ajustar a válvula significa mudar a curva do sistema, assim o ponto de operação migra para uma nova posição da curva $HB \times Q$, como ilustrado na figura seguinte:

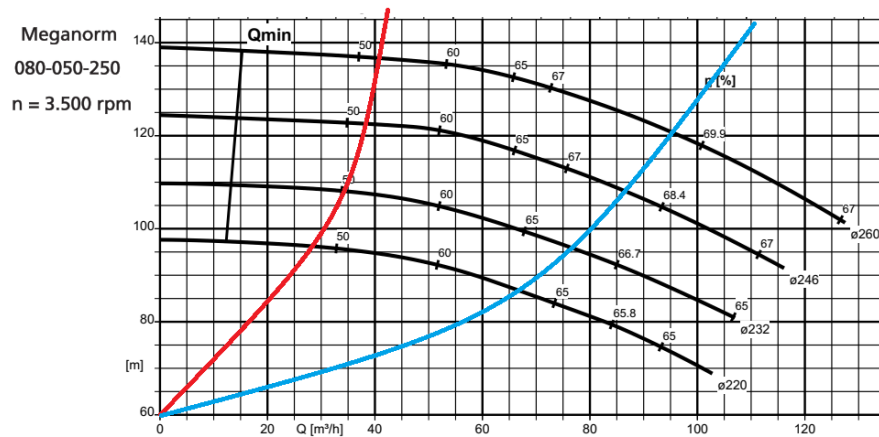


Figura 11: Curvas do sistema e curvas da BC (Fonte: Engenharia e Cia)

A curva vermelha representa a curva do sistema com uma condição de válvula mais fechada, enquanto a azul, com válvula mais aberta.

Ação semelhante em uma instalação de bombeamento com uma BDP teremos como resultado algo semelhante ao representado a seguir:

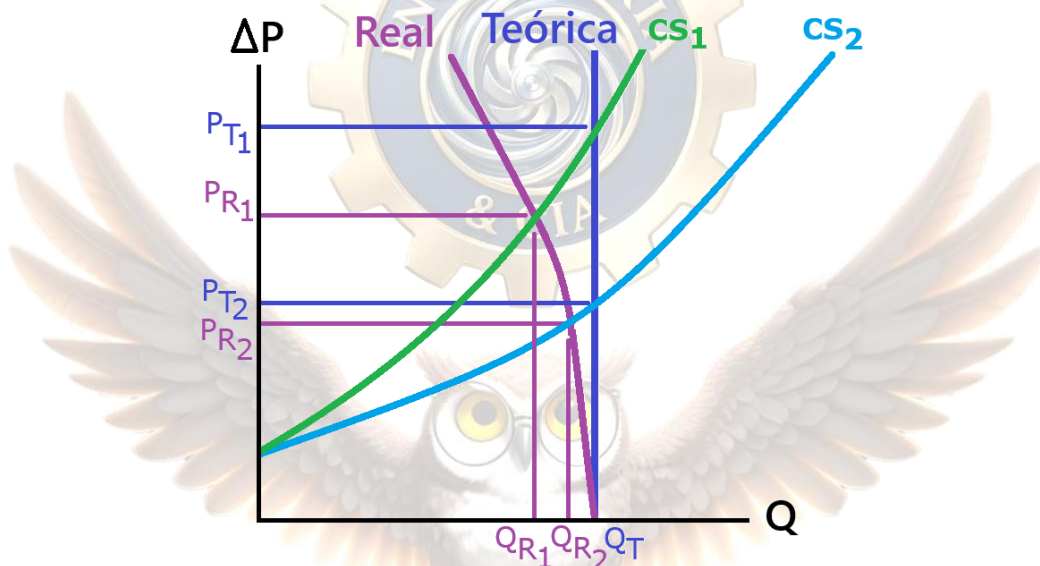


Figura 12: Curvas do sistema e curvas da BDP (Fonte: Engenharia e Cia)

Para as BDP alternativas, a vazão será a mesma, porém com uma pressão maior. Por outro lado, nas BDP rotativas, a vazão cai progressivamente à medida que a pressão sobe.

Nesse caso, mesmo sendo possível reduzir a vazão com a restrição da válvula de descarga, essa técnica não é muito eficaz, tendo em vista que o slip depende da viscosidade e a pressão pode subir além da capacidade mecânica, gerando danos permanentes, além de não ser seguro.

Portanto, para variar a vazão bombeada de uma BDP, são usadas outras técnicas relacionadas com as suas características próprias, sendo as principais:

- Variação da rotação ou número de ciclos
- Variação do deslocamento volumétrico
- Desvio de parte da vazão bombeada

Os detalhes, veremos a seguir:

2.4.1. Variação de Rotação ou Número de Ciclos

Como já mencionado, as BDP possuem uma vazão proporcional ao volume deslocado por ciclo. Aumentando ou diminuindo o número de ciclos, a vazão bombeada será alterada.

A maioria das BDP, sejam rotativas ou alternativas, são acionadas por um motor elétrico. Se equipadas com inversor de frequências, o ajuste de rotação é muito simples e rápido, sendo portanto, o método mais comum hoje em dia, tendo em vista a popularização desse componente.

Bombas pneumáticas, cujo acionamento é feito por meio do ar comprimido, o número de ciclos pode ser alterado pela regulagem da pressão na entrada da bomba. A explicação aqui é muito simples. A 2ª lei de Newton diz que $F = m \cdot a$, ou seja, a força é proporcional a aceleração para uma dada massa. Por outro lado, a definição de pressão é $p = F/A$ ou $F = p \cdot A$, ou seja, para a mesma área, se houver variação de pressão, haverá também uma variação de força, que resultará numa mudança de aceleração. Se a aceleração for menor, a variação da velocidade de deslocamento da bomba também será menor e, conseqüentemente, a vazão bombeada ficará mais baixa.

Numa primeira análise, desconsiderando os efeitos do slip, para BDP, a relação de proporcionalidade é simples: dobrar a rotação, por exemplo, dobra a vazão deslocada. Essa linearidade torna o controle por inversor de frequência muito mais direto e previsível do que nas BC, que como já vimos, a vazão muda significativamente com a pressão.

Atenção: Ao utilizar inversor de frequência com BDP, verificar a rotação mínima operacional. O motor elétrico convencional autoventilado perde eficiência de refrigeração em baixas rotações, abaixo de certo limite, o aquecimento do motor pode ser excessivo, portanto, um engenheiro eletricista ou especialista em inversor deve ser consultado para a especificação adequada do sistema elétrico ideal.

2.4.2. Ajuste o Volume Deslocado por Ciclo

Algumas bombas possuem recursos que permitem a variação do volume deslocado por ciclo, podendo ser um sistema mecânico ou eletrônico.

Existem vários mecanismos disponíveis, que permite a variação volumétrica da BDP. A OMEL, por exemplo, tem em seu portfólio uma bomba dosadora de pistão ilustrado a seguir.

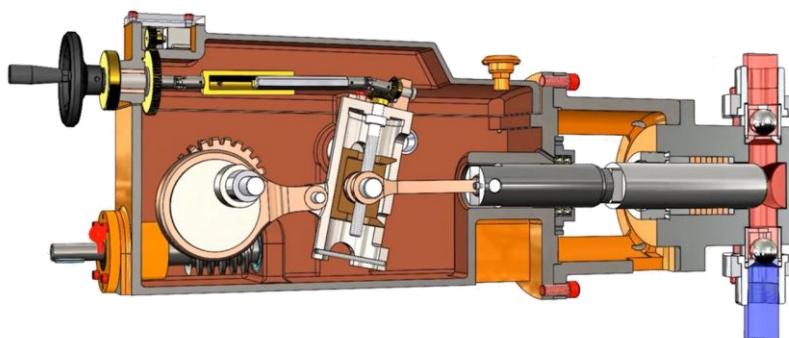


Figura 13: Mecanismo de ajuste volumétrico da bomba de pistão (Fonte: OMEL)

Essa bomba possui um sistema de acionamento por meio de um volante que ao ser girado, permite que o componente "marrom" que é vinculado ao pistão seja posicionado mais acima ou mais abaixo dentro do cilindro central. Dependendo da sua posição, o deslocamento do pistão será maior ou menor, ajustando assim o volume deslocado por ciclo.

Um outro exemplo, ilustrado a seguir, a bomba de vários pistões acionados por meio de um disco, cuja inclinação pode ser ajustada. Quanto maior a inclinação do disco, maior será o deslocamento do pistão e, conseqüentemente, maior a vazão bombeada por ciclo.



Figura 14: Bomba de múltiplos pistões com vazão variável (Fonte: Internet)

Essas bombas, se associadas ao inversor de frequências, permite um range de vazões bem amplo.

2.4.3. O Bypass - Controle por Desvio

O controle por bypass consiste em instalar uma linha de retorno entre a descarga e a sucção da bomba (ou ao reservatório), com uma válvula reguladora de pressão ou de controle de vazão.

Quando a válvula de bypass está parcialmente aberta, parte do fluxo retorna à sucção, a vazão líquida entregue ao processo é reduzida. Nesse caso, a vazão da bomba não foi alterada e sim, a vazão fornecida ao processo.

O problema desse método é energético: a bomba continua operando em plena potência, mas parte do trabalho é desperdiçada na recirculação. Em sistemas de pequeno porte ou com necessidade de bypass ocasional, é uma solução viável.

Para controle contínuo em sistemas de médio e grande porte, o desperdício energético pode ser inaceitável e o inversor de frequência é a escolha correta.

Observação: *O bypass também serve como proteção operacional temporária: em sistemas onde a linha de descarga pode ser bloqueada, o bypass com válvula de alívio calibrada garante que a bomba nunca opere contra linha fechada sem que o fluxo seja desviado com segurança.*

2.5. Viscosidade e Desempenho nas BDP

A viscosidade sempre irá afetar o desempenho de qualquer bomba, sendo o seu efeito positivo ou negativo, conforme veremos a seguir.

2.5.1. Efeito sobre a Potência Necessária

Do ponto de vista energético, a viscosidade sempre afetará negativamente qualquer bomba, seja uma BC ou BDP.

A viscosidade aumenta as perdas por cisalhamento interno, o fluido mais viscoso resiste mais à movimentação pelas câmaras e pelos componentes da bomba. O resultado é que a potência necessária para mover o fluido aumenta com a viscosidade.

Na prática, o motor elétrico deve ser dimensionado para a condição de maior viscosidade, que representa o pior caso de potência exigida, mesmo que isso resulte em um motor maior do que o necessário para a condição de maior pressão. Negligenciar esse fato resulta em motor subdimensionado que opera com corrente acima da nominal, superaquecimento e falha prematura.

Regra de ouro para dimensionamento de motor em BDP rotativas: verificar tanto a condição de pressão máxima com viscosidade nominal quanto a condição de viscosidade máxima com pressão normal.

O motor deve atender ao pior caso em termos de potência, que frequentemente é a viscosidade máxima, não a pressão máxima.

Diferentemente das BC, que são limitadas em relação a viscosidade (na prática por volta de 200 [cP]), algumas BDP podem operar fluidos de até 1.000.000 [cP], conforme veremos mais adiante.

2.5.2. Efeito sobre o Slip

Já foi mencionado anteriormente, que a viscosidade mais alta reduz o slip pelas folgas internas, aproximando a curva real da teórica.

Para muitos tipos de BDP rotativas, especialmente engrenagens, lóbulos e helicoidal, os fabricantes fornecem curvas corrigidas ou tabelas de fator de viscosidade que mostram o ganho de vazão com o aumento da viscosidade.

O gráfico típico do fabricante apresenta curvas para diferentes viscosidades: em vez de uma única curva, há uma família de curvas, sendo a mais alta (maior vazão) a correspondente à maior viscosidade.

A curva para água é sempre a mais baixa, a que mostra o pior desempenho volumétrico da bomba.

Vamos apresentar esses casos, na seção seguinte.

2.5.3. Viscosidade e Seleção de Bomba

A tabela a seguir resume o comportamento das principais famílias de BDP em relação à viscosidade:

Família de BDP	Faixa de viscosidade típica [cP]	Comentário
Engrenagens	50 a 100.000	Excelente para viscosos. Abaixo de 50 [cP] (ex: água), o slip é intenso, seleção deve considerar essa limitação.
Lóbulos / Pistão circunferencial	1 a 1.000.000	Faixa muito ampla. Para viscosidades acima de 1.000 [cP], o slip é praticamente nulo e a curva real coincide com a teórica.
Palhetas	1 a 10.000	Boa faixa. A viscosidade elevada aumenta o atrito das palhetas, elevando a potência. Não adequada para viscosidades muito altas.
Helicoidal (cavidade progressiva)	1 a 1.000.000	A mais indicada para fluidos extremamente viscosos e não newtonianos. Escoamento suave preserva a estrutura do fluido.
Parafuso duplo/triplo	2 a 100.000	Eficiente para viscosos. Para fluidos de baixa viscosidade, as folgas entre parafusos e carcaça causam slip relevante.
Pistão/diafragma (alternativas)	1 a 100.000	Válvulas de retenção eliminam o slip. O desempenho volumétrico independe da viscosidade. A potência aumenta com a viscosidade.
Peristáltica	1 a 100.000	Eficiente para viscosos. Trabalha tanto com fluido de baixa ou de altíssima viscosidade. Concorre diretamente com as bombas helicoidais.

2.6. Pulsação - Análise e Quantificação

A pulsação foi introduzida no Capítulo 1 como uma característica inerente das BDP. Neste capítulo, aborda-se sua quantificação e o impacto sobre o dimensionamento de instalações.

2.6.1. Índice de Pulsação

O índice de pulsação expressa a variação relativa de vazão (ou pressão) em relação ao valor médio, durante um ciclo de operação. Para uma bomba simplex (um cilindro), a variação de vazão vai de zero (durante a admissão) a um valor máximo (durante a descarga), índice de pulsação de até 100%. Para configurações multi cilíndricas defasadas:

- **Simplex (1 cilindro):** pulsação máxima, vazão oscila entre 0 e 100% do valor máximo.

- **Duplex (2 cilindros a 180°):** pulsação reduzida a ~30%, os ciclos de descarga se sobrepõem parcialmente.
- **Triplex (3 cilindros a 120°):** pulsação reduzida a ~7%, os três ciclos de descarga se cobrem muito bem.
- **Quintuplex (5 cilindros a 72°):** pulsação inferior a 2%, praticamente contínuo.

Essa nomenclatura é comum a bombas de pistão ou êmbolo, mas a lógica é similar para bombas de diafragmas. Quanto maior a quantidade de diafragmas, menor será a pulsação.

Para BDP rotativas, o índice de pulsação depende do número de câmaras ativas por rotação:

- uma bomba de lóbulos bilobular pulsa mais que uma trilobular;
- uma bomba de parafuso triplo pulsa menos que uma de parafuso duplo;
- uma bomba helicoidal tem pulsação quase nula.

A peristáltica, apesar de rotativa, pode ter índice de pulsação similar a uma bomba duplex, dependendo do número de roletes ou sapatas.

Para minimizar os efeitos da pulsação, muitas vezes é recomendado o uso de dispositivos chamados “amortecedor de pulsação” ou “atenuador de pulsos”.

2.6.2. Perdas por Aceleração - Impacto no Dimensionamento

Em sistemas operando com bombas de deslocamento positivo, especialmente bombas alternativas de pistão, êmbolo ou diafragma, o escoamento não é uniforme ao longo do tempo. A vazão varia durante o ciclo de operação, produzindo aceleração e desaceleração periódica da coluna de fluido nas linhas de sucção e recalque.

Essa variação de velocidade impõe um esforço inercial adicional ao sistema, exigindo energia extra para acelerar a massa de fluido contida na tubulação.

A carga instantânea associada à aceleração da coluna líquida pode ser expressa por:

$$H_a(t) = \frac{L}{g} \frac{dv(t)}{dt} \quad (4)$$

Onde:

- H_a → carga de aceleração (m)
- L → comprimento real da linha considerada (m)
- g → aceleração da gravidade (9,8 m/s²)
- dv/dt → aceleração temporal da velocidade média (m/s²)

Essa expressão decorre diretamente da aplicação da segunda lei de Newton à massa de fluido contida na tubulação.

Não existe uma formulação única válida para todas as bombas alternativas, pois o termo dv/dt depende:

- da cinemática do mecanismo (manivela-biela, diafragma, etc.);
- da rotação da bomba;
- do número de cilindros;
- da presença ou não de amortecedores de pulsação;
- da compressibilidade do fluido e da elasticidade da linha.

Cada fabricante costuma fornecer formulações específicas ou fatores de correção para seus modelos, portanto, a consulta prévia aos fabricantes é importante antes da conclusão dos cálculos de dimensionamento.

Importância na Linha de Sucção

O efeito da carga de aceleração é particularmente crítico na linha de sucção de bombas alternativas.

Durante a fase de aceleração da coluna líquida, pode ocorrer redução instantânea da pressão na sucção. Essa redução pode favorecer o surgimento de cavitação.

Por essa razão, em sistemas com bombas alternativas, a parcela de energia associada à aceleração da coluna líquida não deve ser negligenciada.

Atenção: O cálculo das perdas por aceleração é obrigatório no dimensionamento de linhas de sucção de bombas alternativas (pistão, diafragma, peristáltica), especialmente quando a linha de sucção tem mais de 3 ou 5 metros e a rotação é moderada a alta. Ignorar essa parcela resulta em NPSHd calculado maior que o real, o que aumenta o risco de cavitação.

2.7. Válvula de Alívio - Dimensionamento e Posicionamento

A válvula de alívio é a proteção primária obrigatória de qualquer instalação com BDP acionada por motor elétrico (ou outro acionamento de potência fixa).

Seu dimensionamento incorreto é uma das fontes mais frequentes de problemas operacionais que passam despercebidos.

2.7.1. Posicionamento Correto

A válvula de alívio deve ser posicionada entre a bomba e a primeira válvula de bloqueio da linha de descarga, nunca após qualquer válvula que possa ser fechada. O retorno do fluido aliviado deve ser dirigido ao reservatório de sucção (retorno longo, não ao manifold de sucção da bomba), para evitar aquecimento progressivo do fluido em situações de alívio prolongado.

2.7.2. Set Point - Ajuste Correto

O set point (pressão de abertura) deve ser definido como:

- **Acima da pressão máxima de operação normal:**
tipicamente 10 a 20% acima da pressão máxima do processo, para evitar aberturas espúrias durante picos transitórios normais.
- **Abaixo da pressão máxima admissível do componente mais fraco:**
a pressão de alívio nunca deve superar a MAWP (Maximum Allowable Working Pressure) da tubulação, flanges, carcaça da bomba ou qualquer outro componente da linha.

Um set point mal calibrado tem dois cenários problemáticos:

- **muito baixo:**

a válvula abre durante a operação normal, desperdiçando energia e causando desgaste prematuro da válvula;

- **muito alto:**

a válvula não protege adequadamente e permite que a pressão supere os limites dos componentes.

2.7.3. Dimensionamento da Capacidade

Uma válvula de alívio subdimensionada em capacidade de vazão é um problema tão sério quanto um set point incorreto.

Se a capacidade de passagem da válvula (definida pelo coeficiente C_v ou K_v) for menor que a vazão da bomba, a válvula abrirá mas não conseguirá desviar todo o fluxo e a pressão continuará subindo mesmo com a válvula aberta.

O critério de dimensionamento é: a capacidade da válvula de alívio deve ser igual ou superior à vazão máxima da bomba na condição de set point.

Válvulas subdimensionadas são identificadas em campo pela pressão que continua subindo mesmo após a abertura aparente da válvula de alívio.

A válvula de alívio em uma BDP é equipamento de segurança de processo, não um acessório opcional. Assim como não se opera um vaso de pressão sem válvula de segurança, não se opera uma BDP de potência fixa sem válvula de alívio devidamente posicionada, calibrada e dimensionada.

2.7.4. Válvulas de Alívio Bidirecionais

Algumas BDP podem operar nos dois sentidos de rotação (lóbulos, palhetas, parafusos sanitários, helicoidal). Uma válvula de alívio convencional é unidirecional, protege apenas quando o fluido pressurizado vem do lado correto.

Ao inverter a rotação, o lado que era descarga vira sucção e a válvula de alívio, instalada na antiga descarga, fica no lado de baixa pressão, sem função protetora.

Para equipamentos que operam em ambos os sentidos, são necessárias duas válvulas de alívio em posições opostas, ou uma válvula de alívio bidirecional (mais cara, menos comum). Isso deve ser verificado no projeto de qualquer sistema com reversão de rotação.

2.8. Cavitação nas BDP

Semelhantemente às BC, as BDP também estão sujeitas ao fenômeno da cavitação.

Cavitação é o fenômeno de formação de bolhas de vapor dentro do próprio líquido quando a pressão do líquido atinge a chamada de **pressão de vapor**.

Pressão de vapor está relacionado com uma dada temperatura do fluido, ou seja, para temperaturas maiores a pressão de vapor é mais alta e vice-versa.

A formação de bolhas por si só não é um problema, o ponto crítico é quando a pressão do sistema volta a subir. Nessa situação as bolhas implodem com uma violência tal que

é capaz de remover material dos componentes. Esse fenômeno está representado a seguir:

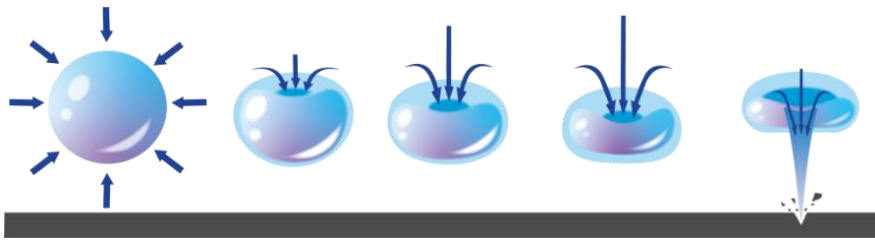


Figura 15: Implosão da bolha de vapor provocando o dano à superfície (Fonte: GemmeCotti)

Além de gerar uma vibração característica, a remoção de material irá provocar desbalanceamento adicional ao conjunto girante que aumentará ainda mais o nível de vibração da bomba, além de reduzi o rendimento.

Consequentemente, é uma situação a ser evitada.

2.8.1. NPSH ou NPSP

A sucção da bomba é o trecho mais crítico para cavitação tendo em vista que naturalmente a pressão vai decrescendo ao longo do escoamento.

O um parâmetro relacionado à cavitação é conhecido como NPSH, acrônimo do inglês, Net Positive Suction Head, o que traduzindo seria algo como “altura de sucção positiva líquida”.

Essa propriedade está relacionada com a energia necessária para que acontece a sucção do produto na bomba, sem risco de cavitação. Existem parâmetros relacionados a instalação, que recebe o nome de NPSH_d (disponível), outros estão relacionados à bomba, recebendo o nome NPSH_r (requerido), um dado fornecido pelo fabricante.

Para reduzir o risco de cavitação, o NPSH_d (da instalação) deve ser maior do que o NPSH_r (da bomba).

O NPSH_r é um dado do fabricante do equipamento, obtido experimentalmente, enquanto, o NPSH_d pode ser calculado pela equação:

$$NPSH_d = \frac{p_1 - p_v}{\gamma} - h_{suc} - H_{p1 \rightarrow E} \quad (5)$$

onde P1 é a pressão no reservatório de sucção (pressão atmosférica para reservatório com respiro ou aberto), PV é a pressão de vapor, γ é o peso específico, h_{suc} é altura geométrica de sucção (cota entre o nível do reservatório e o eixo da bomba) e $H_{p1 \rightarrow E}$ é a perda de carga na linha de sucção.

A queda de pressão dentro de uma bomba de engrenagens internas está ilustrada a seguir:

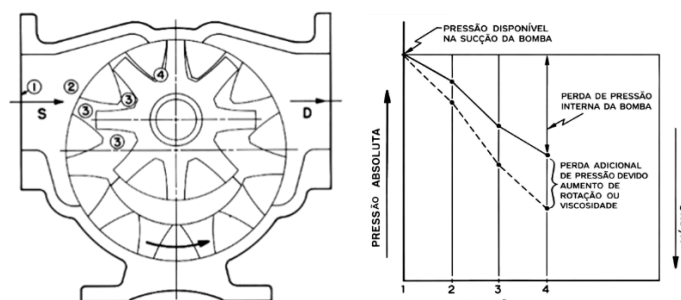


Figura 16: Redução de pressão numa bomba de engrenagens internas (Fonte: Viking)

No universo das BDP, que utiliza pressão ao invés de carga de pressão pode aparecer o conceito de NPSP, de Net Positive Suction Pressure, que é semelhante ao NPSH, porém, utilizando a pressão em Pa, [bar] ou [PSI].

$$NPSP_d = p_1 - p_v - (h_{suc} - H_{p1 \rightarrow E}) \cdot \rho \cdot g \quad (6)$$

2.8.2. Por Aceleração Local do Fluidos

Como já dito, a cavitação está relacionada com a pressão do escoamento que atinge a pressão de vapor.

Existem outros motivos, pelos quais a pressão pode cair, além da perda de carga já citada, entre elas podemos citar:

- **Redução de seção:**

Analisando a equação de Bernoulli pode-se identificar uma relação entre a pressão e velocidade de um escoamento entre duas seções consecutivas. No caso de um escoamento, onde a seção aumenta, a pressão cai.

- **Aumento de volume da câmara:**

Da análise da **Lei dos Gases Perfeitos**, também chamada **Equação de Clapeyron** ($pv = mRT$) e da equação da transformação correspondente ($p \cdot v / T = \text{constante}$) podemos identificar que o aumento de volume provoca uma redução de p/T . Embora seja uma equação relacionada aos gases, esse efeito pode ser observado em líquido de forma ainda mais intensa, uma pequena variação de volume já provoca uma queda na pressão, mas com a temperatura praticamente constante.

Como já mencionado, o funcionamento típico de uma BDP envolve a variação do volume de uma câmara, o aumento do volume provoca uma queda de pressão, enquanto a redução, um aumento. Se a pressão atinge a pressão de vapor do líquido, a cavitação irá ocorrer.

Nas BDP esse fenômeno é muito frequente. O problema é que não tem muito o que fazer nesses casos, pois é inerente ao processo.

A seguir, ilustramos alguns componentes sujeitos a cavitação.



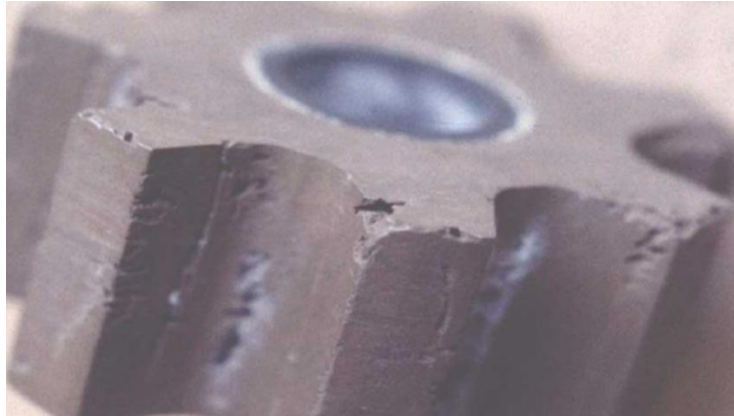


Figura 17: Bombas de lóbulos e engrenagens com danos por cavitação (Fonte: Bonve e Viking)

2.8.3. Por Dificuldade De Preenchimento Volumétrico

Uma outra origem da cavitação, particularmente relevante em bombas de deslocamento positivo rotativas, como as bombas de engrenagens externas, está relacionada com a dificuldade de preenchimento completo dos volumes internos da bomba durante a fase de expansão geométrica das câmaras de bombeamento.

À medida que os elementos móveis da bomba giram, formam-se volumes crescentes na região de sucção. Para que o funcionamento ocorra de forma adequada, o fluido deve ser capaz de ocupar rapidamente esses volumes.

Entretanto, quando a perda de carga na linha de sucção é elevada, quando a viscosidade do fluido é alta ou quando a rotação da bomba é elevada, pode não haver tempo suficiente para que o fluido preencha completamente essas cavidades.

Como consequência, ocorre a formação de regiões com baixa pressão local, que podem conter vapor do próprio fluido ou gases previamente dissolvidos.

Diferentemente da cavitação clássica associada apenas à pressão de vapor, nesse caso o fenômeno está diretamente relacionado ao tempo disponível para o preenchimento volumétrico e à capacidade do fluido de escoar até a bomba.

Portanto, mesmo quando a pressão média de sucção não se encontra muito próxima da pressão de vapor, a combinação de elevada viscosidade, restrições na sucção ou velocidades de operação elevadas pode favorecer a formação dessas cavidades.

Na figura seguinte, apresentamos o aumento do NPSHr da bomba em função do aumento da rotação. Parte desse aumento, além do aumento de perda de carga, está relacionado com o tempo de enchimento da câmara de bombeamento.

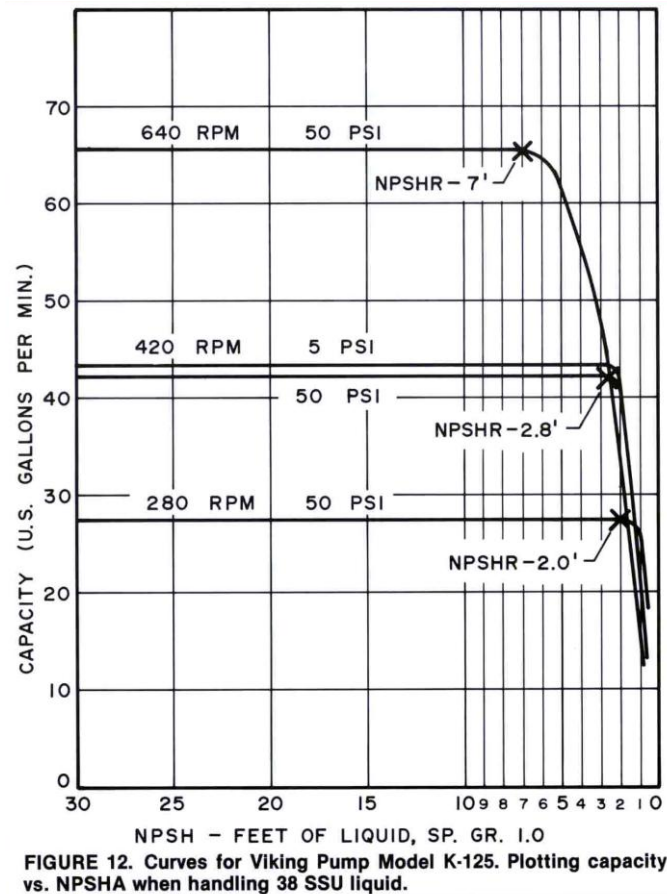


Figura 18: NPSHr de uma bomba de engrenagens interna para várias rotações (Fonte: Viking)

Esse tipo de cavitação tende a provocar redução da eficiência volumétrica, aumento de ruído e vibração, podendo evoluir para desgaste progressivo dos componentes internos da bomba. Os efeitos específicos desse fenômeno variam conforme o tipo construtivo da bomba e serão abordados nos capítulos correspondentes a cada tecnologia.

Assim, para bombas de deslocamento positivo, o NPSH disponível continua sendo um parâmetro importante, porém deve ser analisado em conjunto com fatores como viscosidade do fluido, velocidade de rotação e características da linha de sucção, que influenciam diretamente o processo de enchimento das câmaras de bombeamento.

Esse material é uma amostra do material didático da disciplina BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO do curso de pós-graduação ENGENHARIA DE MOVIMENTAÇÃO DE FLUIDOS E EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS.

O material completo está disponível para alunos do curso.

Saiba mais em <https://www.engenhariaecia.com/pos> ou pelo whats [11 95696 7808](https://api.whatsapp.com/send?phone=11956967808)

