

# EQUIPAMENTOS ROTATIVOS

## 1 – INTRODUÇÃO

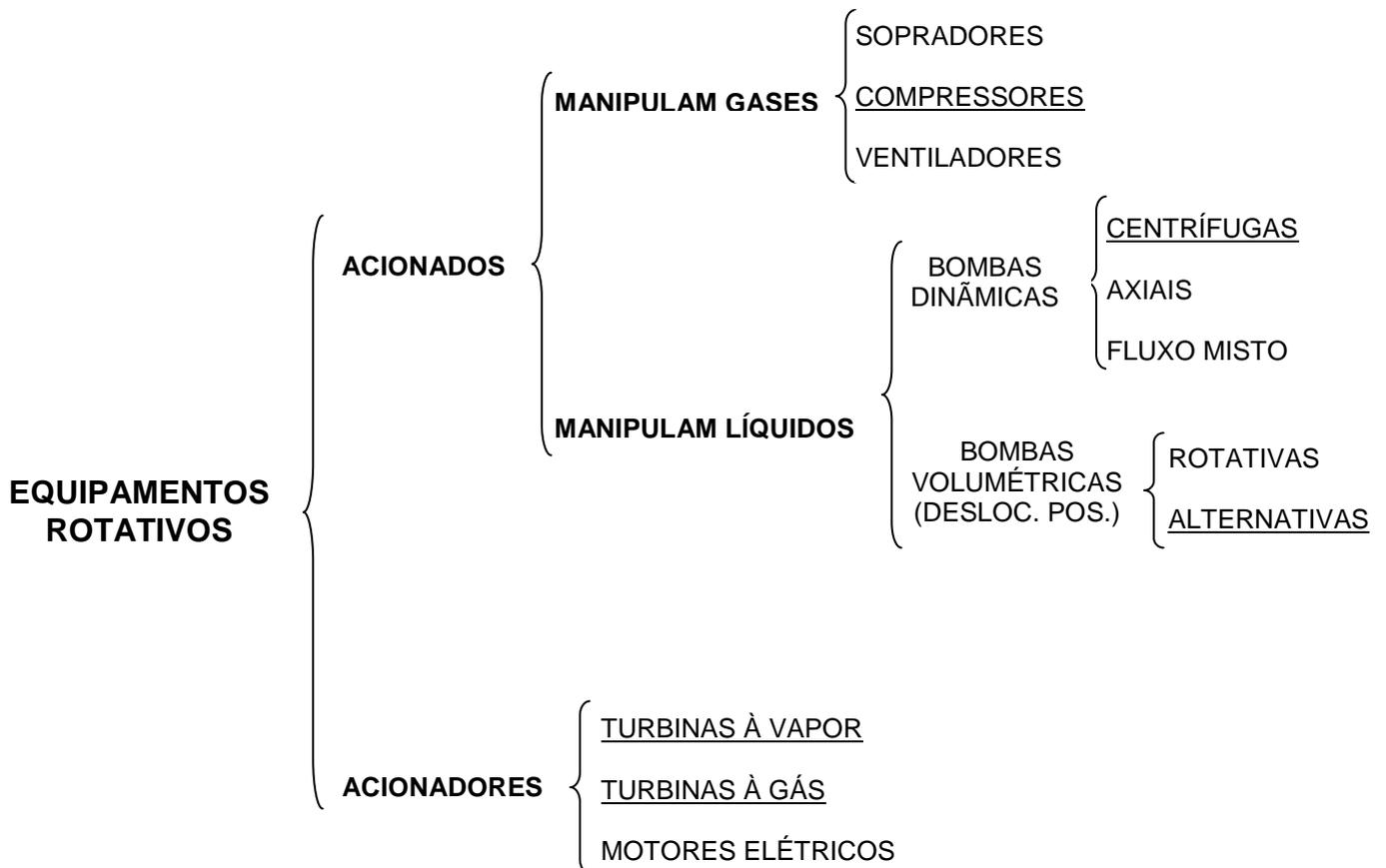
O objetivo da presente apostila é prestar informações mínimas, a nível técnico, sobre os principais equipamentos rotativos utilizados na indústria de petróleo e petroquímica. Para cada um dos tipos de equipamentos aqui abordados os seguintes tópicos principais são alvo de preocupação e interesse:

- Princípio de funcionamento
- Partes integrantes e suas funções
- Falhas mais comuns

Aspectos termodinâmicos ou hidrodinâmicos foram propositadamente omitidos. A apostila aborda aspectos práticos com ênfase em falhas ou danos mais comumente detectados.

## 2 – VISÃO GERAL

O esquema abaixo dá uma visão ampla dos equipamentos rotativos existentes e mostra aqueles que serão mais fortemente abordados neste trabalho (sublinhados).



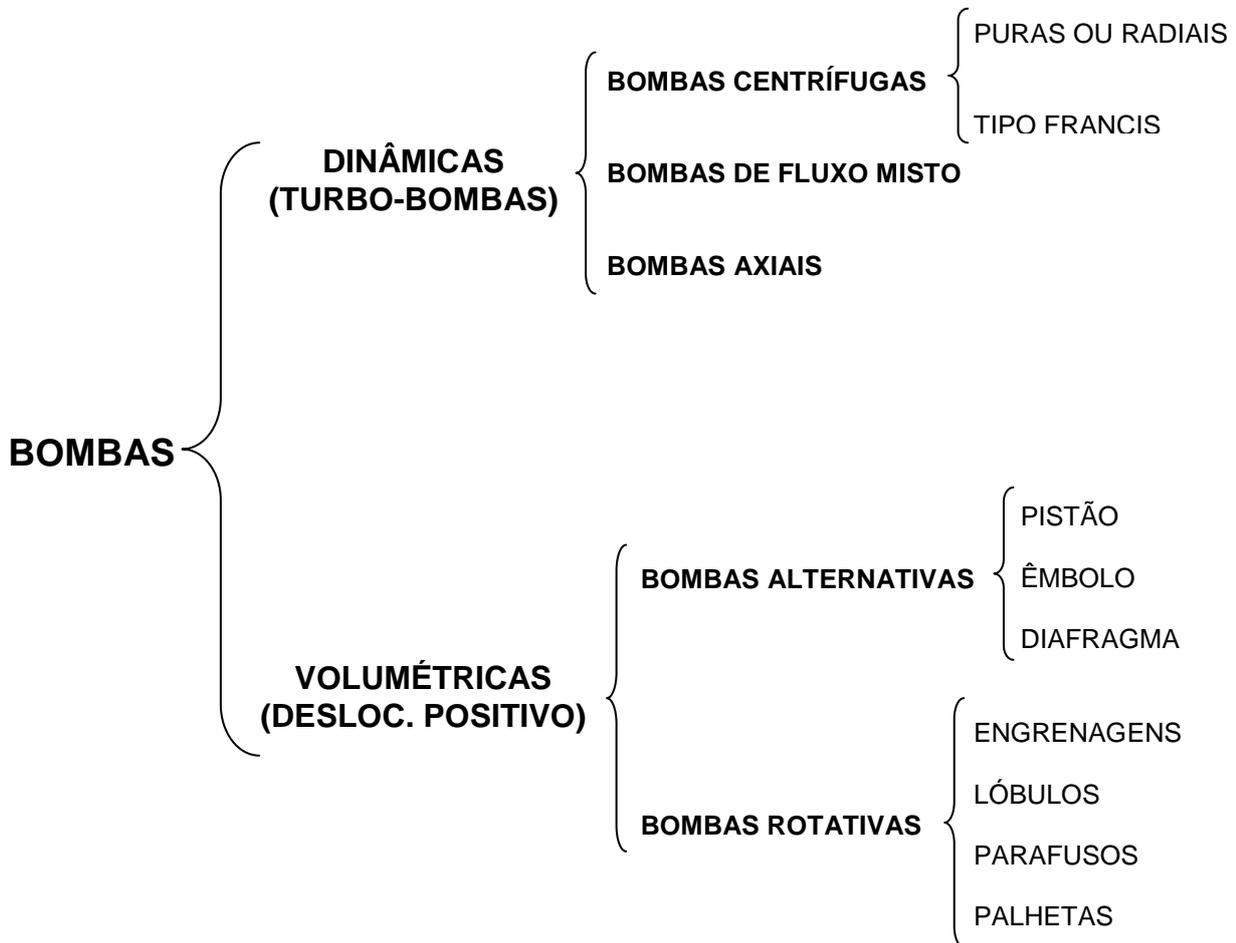
# 3 – BOMBAS

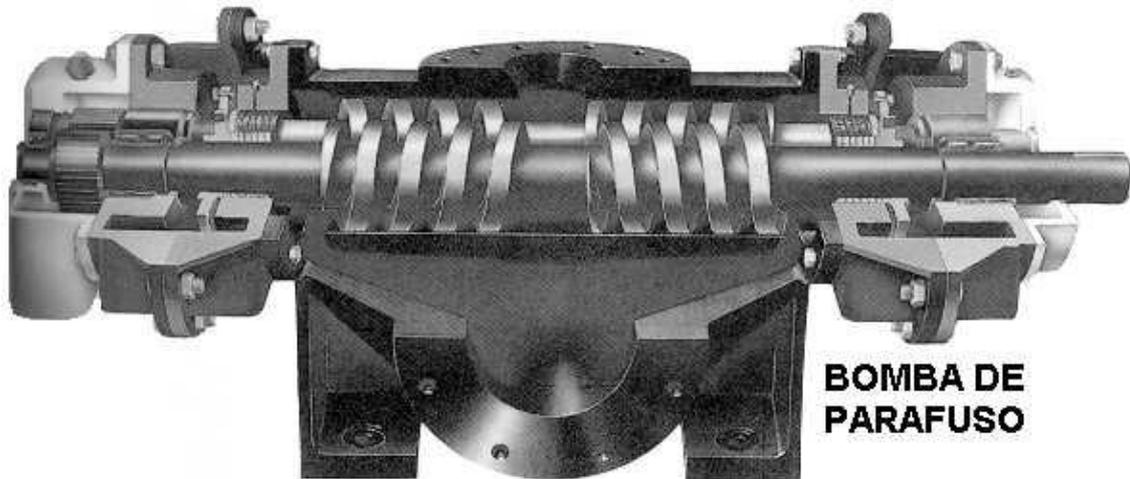
## 3.1 – DEFINIÇÃO

Podemos definir as bombas como sendo máquinas operatrizes hidráulicas que entregam energia a uma massa **líquida** com a finalidade de transportá-la de um ponto a outro atendendo a certas condições de processo. As bombas recebem energia em seu eixo de uma fonte externa e entregam parte desta energia ao líquido que circula em seu interior sob forma de energia cinética, energia de pressão ou ambas.

A relação entre a energia entregue a bomba e a energia cedida ao fluído recebe o nome de rendimento da bomba.

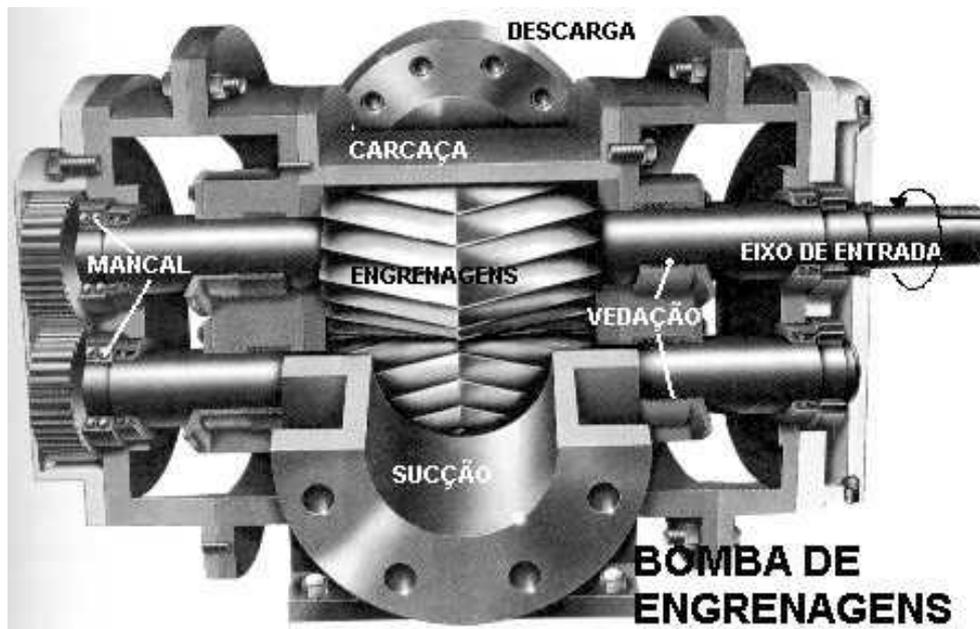
## 3.2 – CLASSIFICAÇÃO GERAL DAS BOMBAS





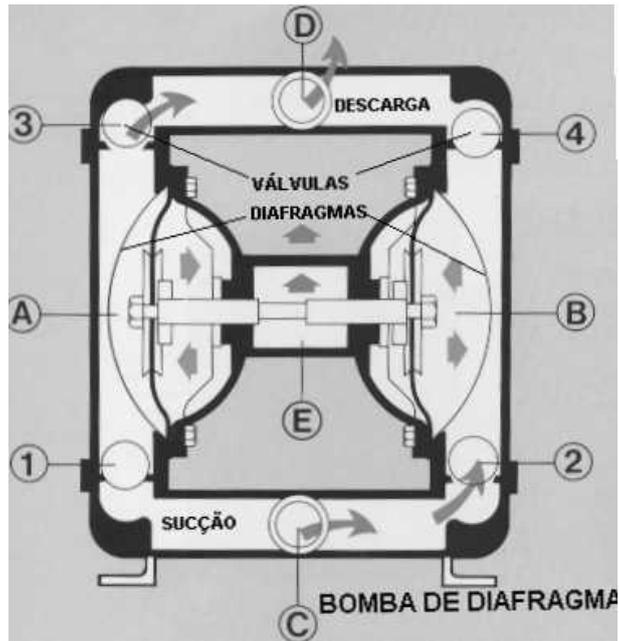
### CARACTERÍSTICAS

- Como as de engrenagens são bastante usadas para fluidos viscosos, até 100.000.000 SSU;
- Podem operar em rotações maiores que as bombas de engrenagens, até 3500 rpm;
- Consequentemente possuem vazões maiores do que as de engrenagens, até 910 m<sup>3</sup>/h;
- Pressão máxima na ordem de 3000 psi (210,97 Kg/cm<sup>2</sup>).



### CARACTERÍSTICAS

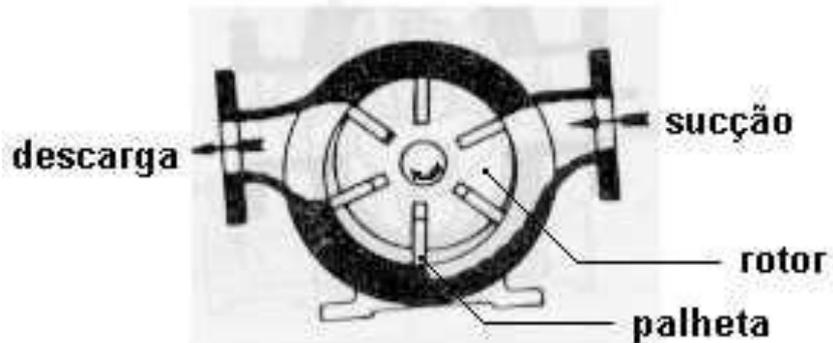
- É o tipo mais usado de bomba volumétrica;
- É ideal para produtos viscosos;
- Vazões até aproximadamente 200 m<sup>3</sup>/h;
- Pressões de até 400 psig (28,13Kg/cm<sup>2</sup>);
- É capaz de operar com fluidos de até 5.000.000 SSU;
- Rotações de até 1800 rpm;
- Eficiências podem chegar a 95%.



### CARACTERÍSTICAS

- Vazões de até 10 gpm aproximadamente;
- Fluido bombeado não contamina o meio e não vaza;
- Limites de pressão de descarga e de temperatura do fluido definidos pelo material do diafragma.

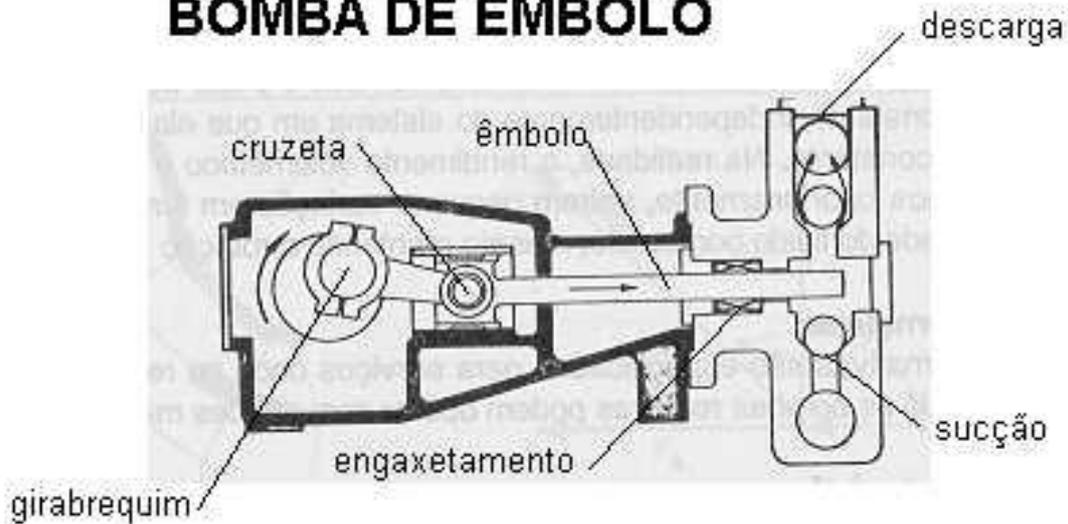
### BOMBA DE PALHETAS



### CARACTERÍSTICAS

- Palhetas sujeitas ao desgaste;
- Não é recomendável p/ fluidos com baixa propriedade lubrificante;
- Vazões de até 375 gpm (85 m³/h);
- Limite de viscosidade da ordem de 100.000 SSU;
- Diferença de pressão usual de até 50 psi (3,51 Kgf/cm²).

# BOMBA DE ÊMBOLO



## CARACTERÍSTICAS

- Baixa vazão e alta pressão;
- Vazão pulsante;
- Vazões usuais de até 4 m<sup>3</sup>/h;
- Pressões máximas de 7500 a 10.000 psi (530 / 700 Kgf/cm<sup>2</sup>).

**PERGUNTA 1: Qual a diferença entre bomba de êmbolo e pistão?**

## 3.3 – COMPARAÇÃO ENTRE BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO E TURBO BOMBAS

VOLUMÉTRICAS (DESLOC. POSITIVO)	TURBOBOMBAS
SÃO AUTO-ESCORVANTES	PRECISAM ESTAR CHEIAS DE LÍQUIDO
VAZÃO INDEPENDENTE DA ALTURA OU PRESSÃO	POSSUI UMA CURVA VAZÃO X ALT. MANOMÉTR.
DÃO ENERGIA DE PRESSÃO EXCLUSIVAMENTE	O IMPELIDOR DÁ ENERGIA CINÉTICA E DE PRESSÃO
NECESSITAM DE DISPOSITIVO DE ALÍVIO NA DESCARGA	NÃO NECESSITAM DE DISPOSITIVO DE ALÍVIO NA DESCARGA
LÍQUIDO E ÓRGÃO IMPULSIONADOR TEM O MESMO MOVIMENTO	LÍQUIDO E ÓRGÃO IMPULSIONADOR NÃO TEM MOVIMENTOS ABSOLUTAMENTE IGUAIS
VAZÃO PULSANTE (ALTERNATIVAS)	VAZÃO CONSTANTE AO LONGO DO TEMPO

## 3.4 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

### 3.4.1 – DAS TURBO BOMBAS

Para seu funcionamento a bomba deve estar cheia de líquido, isto é, escorvada. Duas regiões distintas são criadas : **uma de alta pressão e outra de baixa pressão**.

O líquido que está entre as pás do impelidor recebe o movimento destas e é jogado para a periferia. Com isto, cria-se um vazio (região de **baixa pressão**) na entrada do impelidor. Este vazio será preenchido por igual quantidade de líquido, estabelecendo-se um **fluxo contínuo**.

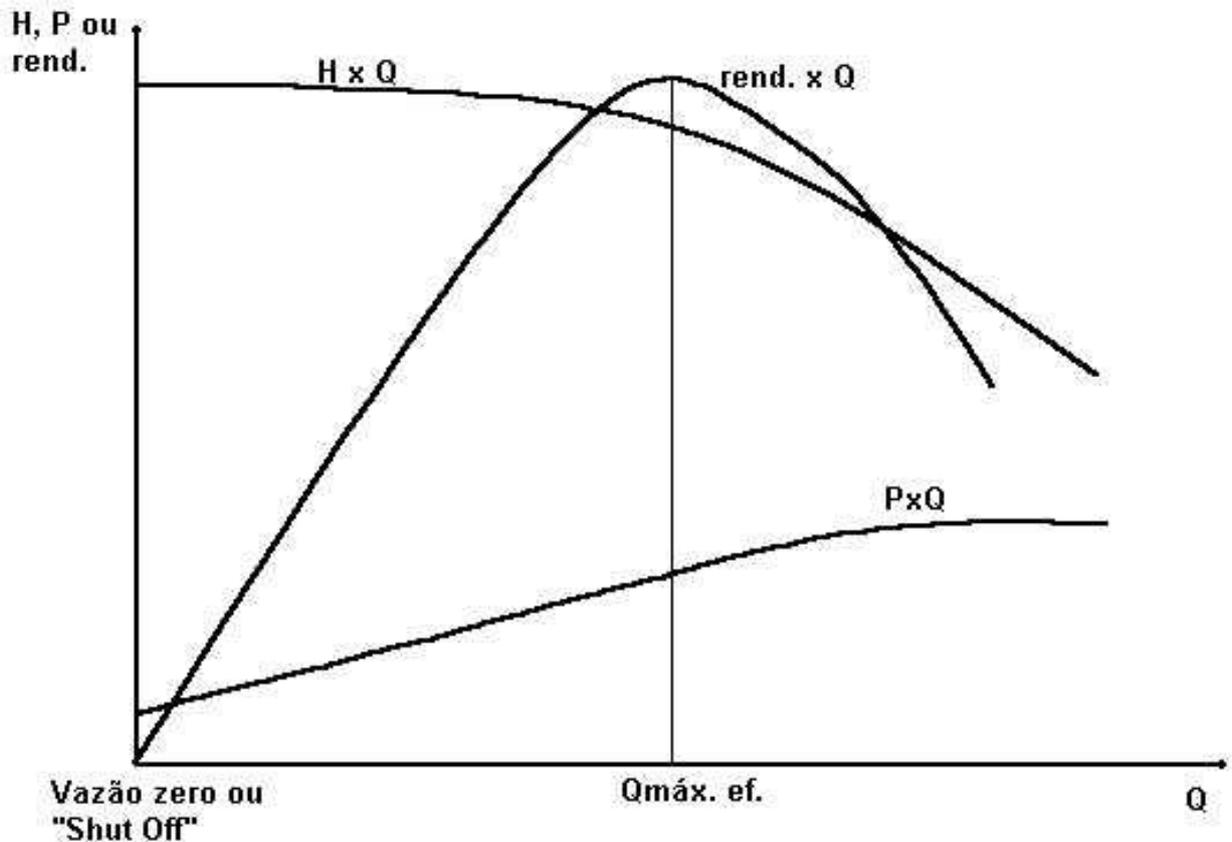
A região de **alta pressão** é criada na periferia do impelidor uma vez que o fluido que se desloca pelo canal formado por duas pás adjacentes encontra um aumento progressivo de área o que

gera uma queda na velocidade (energia cinética) e um conseqüente aumento na pressão (teorema de Bernouilli). Esta alta pressão gerada é responsável pelo **transporte do fluido e atendimento das condições desejadas de processo**.

### 3.4.2 – DAS BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO (VOLUMÉTRICAS)

As bombas volumétricas conferem energia ao fluido exclusivamente sob a forma de pressão uma vez que seu órgão impulsor (pistão, êmbolo, diafragma, palheta, engrenagem, etc.) apenas “empurram” o fluido para a descarga . A pressão de descarga é definida pela necessidade do sistema e a vazão é praticamente independente do deste.

### 3.5 – CURVAS REAIS DE FUNCIONAMENTO DAS TURBO BOMBAS



## CURVAS CARACTERÍSTICAS

---

“HEAD” OU CARGA de uma bomba centrífuga é a energia por unidade de massa ou unidade de peso que a bomba tem condições de fornecer ao fluido para uma determinada vazão.

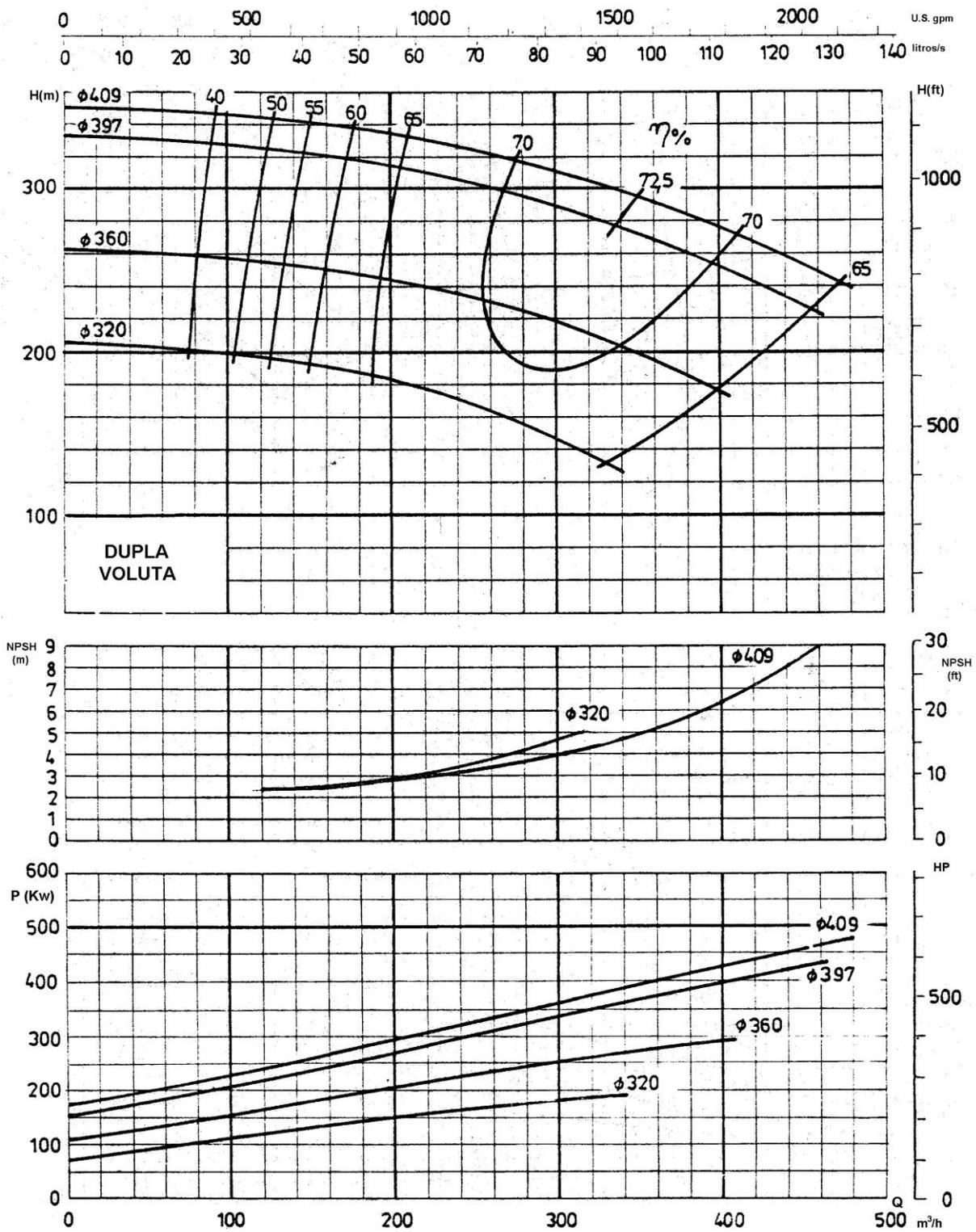
---

---

POTÊNCIA ABSORVIDA pela bomba é a potência que a bomba recebe do acionador.

---

## CURVAS CARACTERÍSTICAS APRESENTAÇÃO USUAL



3.5.1 - PERDAS

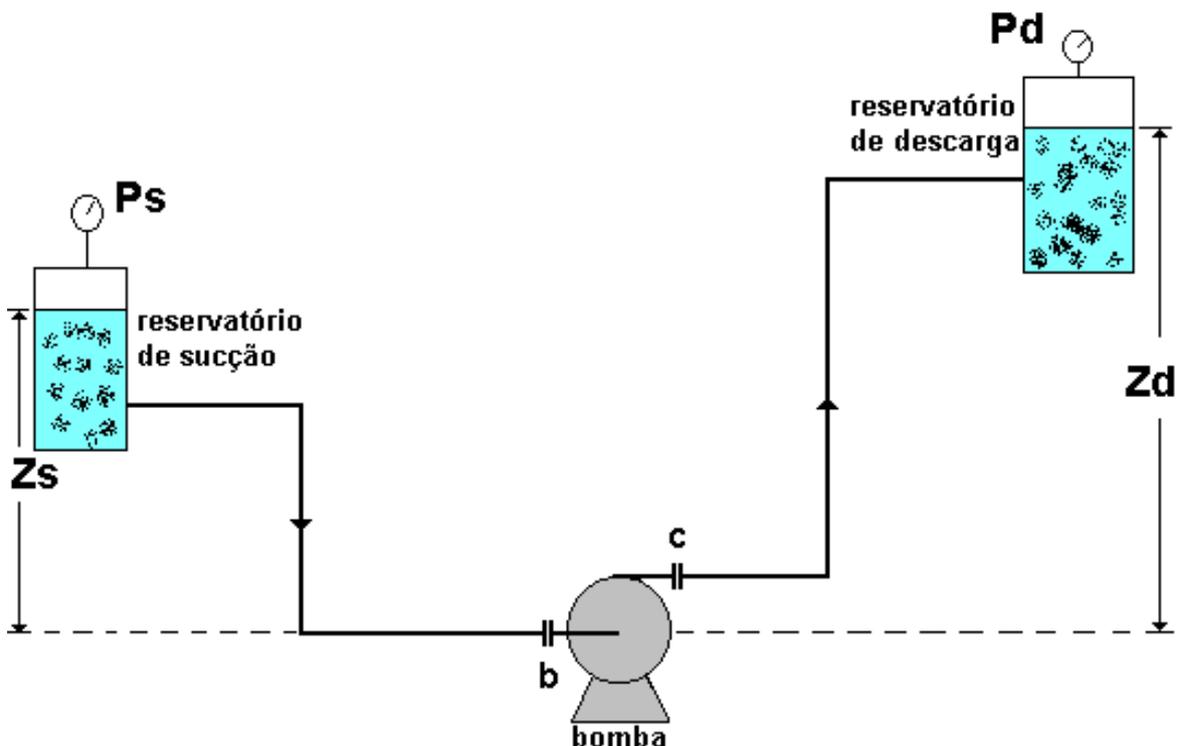
O rendimento sintetiza em outras palavras a parcela de energia que é efetivamente entregue ao fluido . Um rendimento de, por exemplo 75%, significa dizer que 25% da energia que foi entregue no eixo desta bomba foi perdida. São as seguintes as perdas que ocorrem em uma bomba centrífuga quando o impelidor entrega energia ao fluído que circula no seu interior .

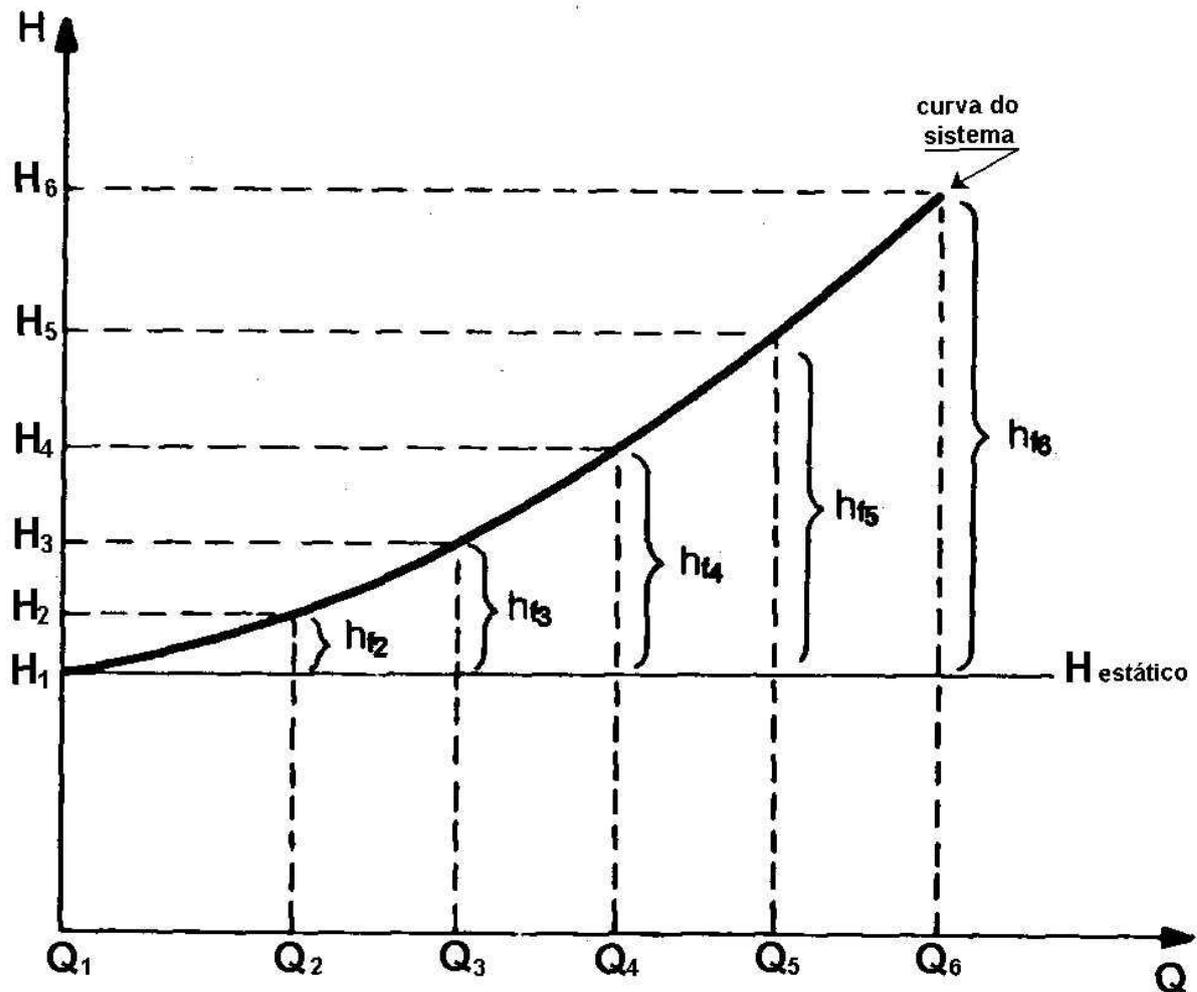
- atrito interno ;
- choques e turbulência;
- recirculação;
- perdas mecânicas (mancais, sistema de vedação).

Obs.:

**PERGUNTA 2: De que depende o “head”? Como podemos medi-lo em uma bomba em operação?**

### 3.6 – CURVA DO SISTEMA





$h_{fn}$  = perdas por fricção (atrito)

$$H = h_d - h_s$$

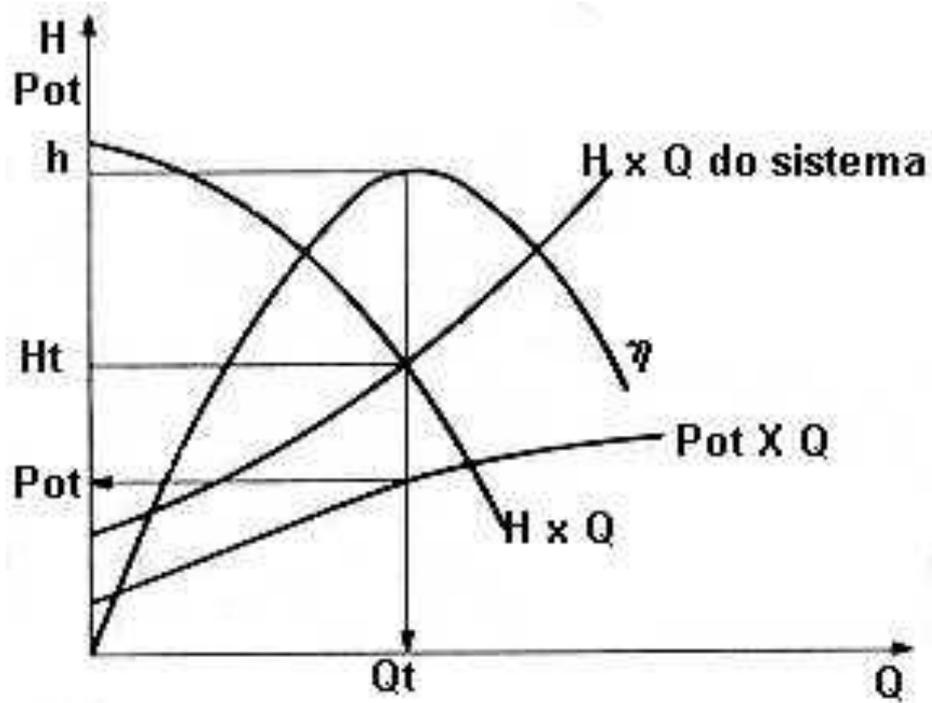
ou

$$H = \underbrace{\frac{(P_d - P_s)}{\gamma} + (Z_d - Z_s)}_{\text{H estático não varia com a vazão}} + \underbrace{h_{fd} + h_{fs}}_{\text{H}_{\text{FRICÇÃO}} = f(Q)}$$

**PERGUNTA 3:** Do que dependem as perdas de carga em um sistema de bombeamento?

**PERGUNTA 4:** Qual fator na fórmula da página anterior se altera se estrangulamos um pouco a válvula de sucção?

### 3.7 - PONTO DE TRABALHO



**PERGUNTA 5:** *Quais das curvas acima dependem do fluido de trabalho?*

**PERGUNTA 6:** *Quais destas curvas são da bomba?*

**PERGUNTA 7:** *Por quê elas são diferentes das curvas apresentadas na pág. 7?*

### 3.8 – FATORES QUE MODIFICAM AS CURVAS DO SISTEMA

$$H = \frac{(P_d - P_s)}{\gamma} + (Z_d - Z_s) + h_{fd} + h_{fs}$$

3.8.1 – NATUREZA DO LÍQUIDO BOMBEADO ( )

3.8.2 – TEMPERATURA DO LÍQUIDO BOMBEADO ( )

3.8.3 – NÍVEL DE LÍQUIDO NOS RESER. DE SUCÇÃO E DESCARGA ( )

3.8.4 – PRESSÃO DOS RESERVATÓRIOS DE SUCÇÃO E DESCARGA ( )

3.8.5 – ALTERAÇÕES NAS TUBULAÇÕES DE SUCÇÃO E DESCARGA ( )

### 3.9 – FATORES QUE MODIFICAM AS CURVAS CARACTERÍSTICAS

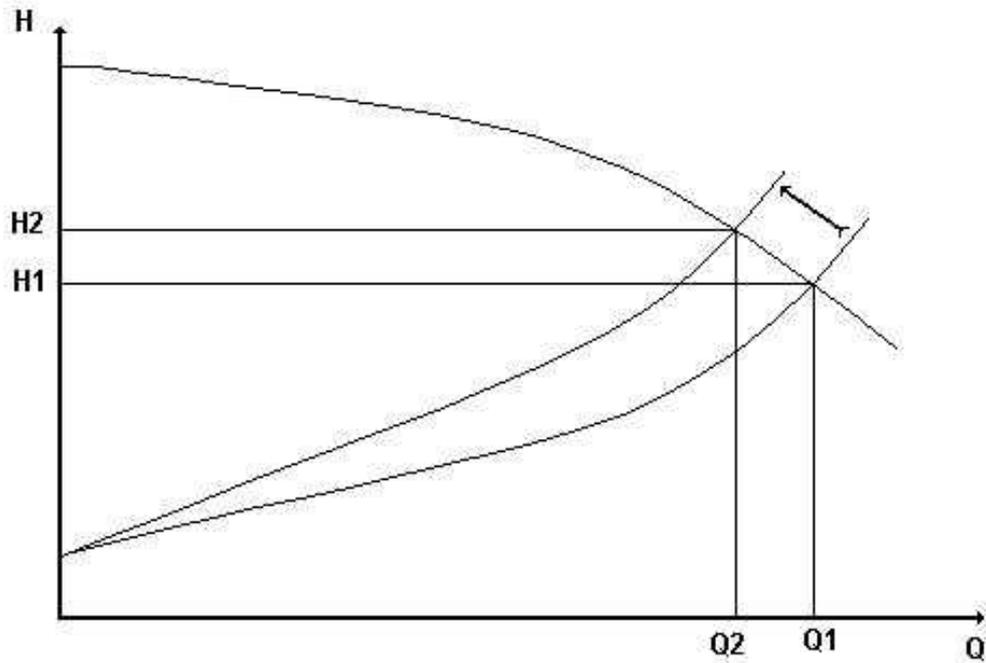
3.9.1 – ROTAÇÃO DA BOMBA

3.9.2 – DIÂMETRO DO IMPELIDOR

3.9.3 – NATUREZA DO LÍQUIDO (VISCOSIDADE)

### 3.10 – MODIFICAÇÃO DO PONTO DE TRABALHO

### 3.10.1 – VARIACÃO NA CURVA DO SISTEMA

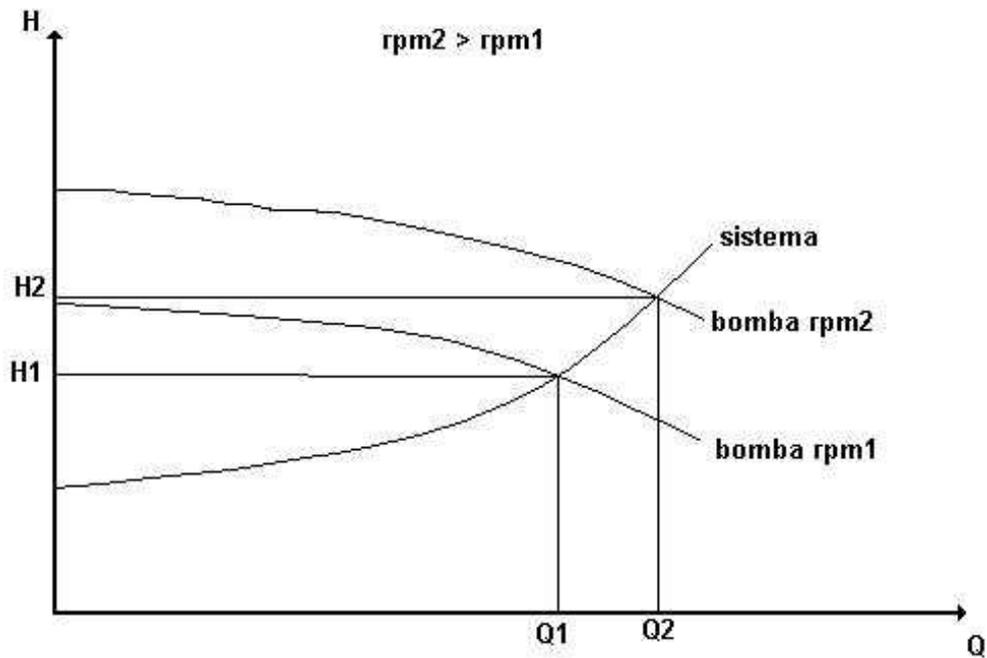


**PERGUNTA 8:** A redução na vazão representada acima corresponde a que ação(ões) no sistema?

**PERGUNTA 9:** Como ficaria a representação gráfica de uma redução no nível do reservatório de sucção?

**PERGUNTA 10:** Como ficaria a representação gráfica de um aumento na viscosidade do fluido?

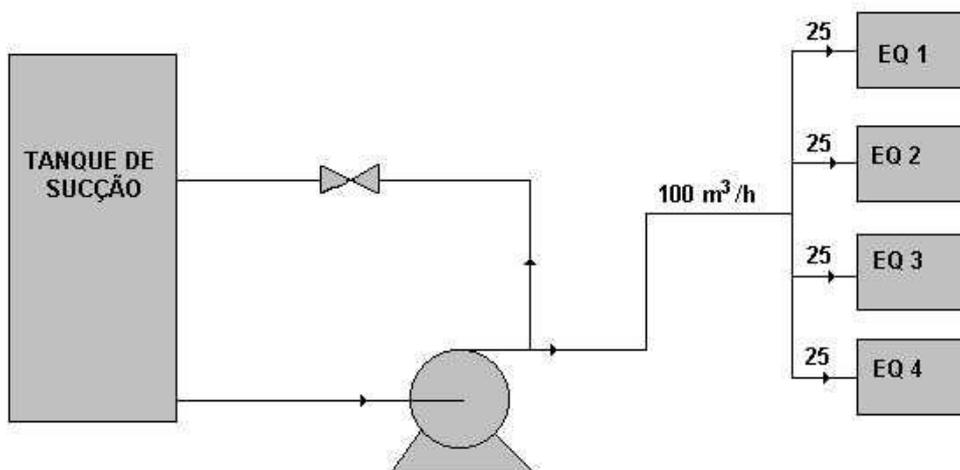
### 3.10.2 – VARIACÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS (ROTAÇÃO OU DIÂMETRO DO IMPELIDOR)



**PERGUNTA 11:** No gráfico acima ao invés de rotação poderíamos ler diâmetro?

**PERGUNTA 12:** Qual a diferença teórica entre aumentar o diâmetro do impelidor em 10% e aumentar a rotação em 10%? E prática?

### 3.10.3 – RECIRCULAÇÃO



A VAZÃO MÍNIMA DA BOMBA É 55 m<sup>3</sup>/h.

**PERGUNTA 13:** Em que situação a recirculação é uma boa alternativa como controle de capacidade?

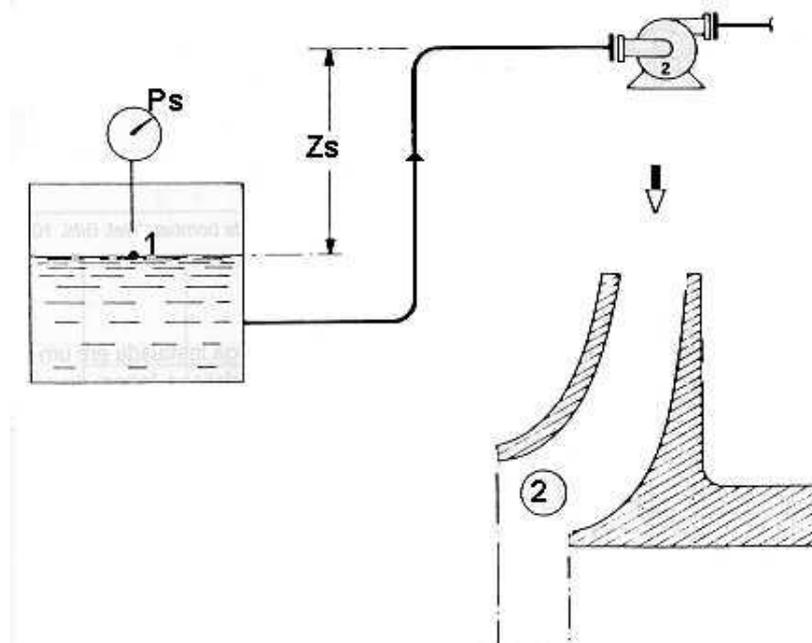
### 3.11 – CAVITAÇÃO

#### 3.11.1 – DEFINIÇÃO DE PRESSÃO DE VAPOR

Pressão de vapor de um produto **para uma dada temperatura** é a pressão acima da qual temos fase líquida e abaixo dela fase vapor.

**PERGUNTA 14: Qual a maneira mais usual de provocarmos a mudança de fase de um líquido?**

#### 3.11.2 – DESCRIÇÃO



#### 3.11.3 – CONSEQUÊNCIAS

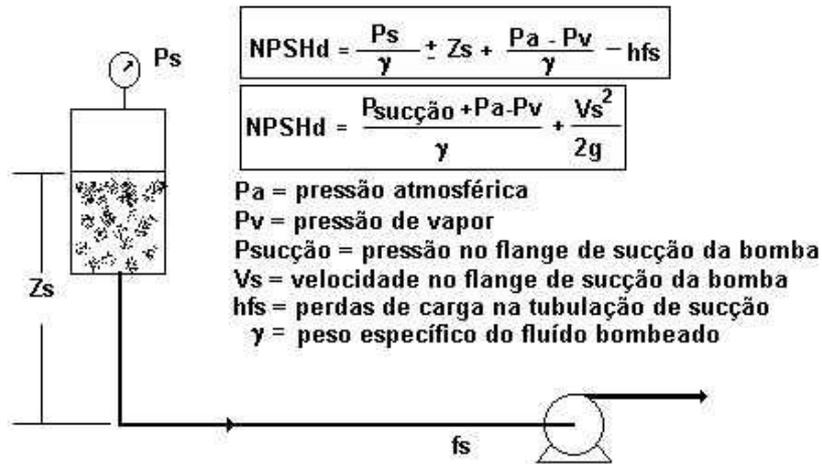
3.11.3.1 – Barulho e vibração

3.11.3.2 – Alteração das curvas características

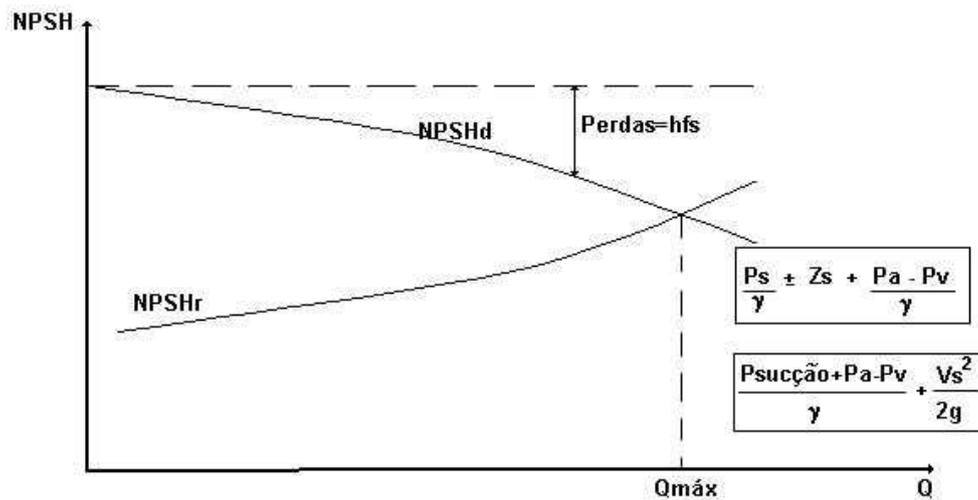
3.11.3.3.- Danificação do material

#### 3.11.4 – NPSHd e NPSHr

**PERGUNTA 15: O QUE É NPSHd ?**



**PERGUNTA 16: O que é NPSHr ?**



### 3.11.5 – FATORES QUE MODIFICAM O NPSHd

3.11.5.1 – Altura estática de sucção

3.11.5.2 – Altitude do local da instalação

3.11.5.3 – Temperatura de bombeamento

3.11.5.4 – Tipo de líquido bombeado

3.11.5.5 – Pressão no reservatório de sucção

3.11.5.6 – Vazão

3.11.5.7 – Arranjo físico da tubulação de sucção

### 3.11.6 – CAUSAS SECUNDÁRIAS DE CAVITAÇÃO

São fatores que levam a bomba a operar em regime de cavitação porém não podem ser detectados com a medição de pressão no flange de sucção. São sempre devido a distúrbios internos da bomba, tais como, recirculação devido a folga excessiva nos anéis de desgaste, recirculação no canal entre as pás, fluxo inverso na sucção, etc. .

**PERGUNTAS SOBRE CAVITAÇÃO :**

**PERGUNTA 17: Por que quando falamos em cavitação nos interessa apenas a parte do sistema que está na sucção da bomba?**

**PERGUNTA 18: Que atitude podemos tomar na prática para retirarmos uma bomba de um regime de cavitação?**

**PERGUNTA 19: Uma bomba que operava normalmente passa a cavitatar . Quais podem ser as causas desta cavitação?**

**PERGUNTA 20: Como podemos na prática avaliar o NPSHd?**

**PERGUNTA 21: Qual a particularidade que tem uma cavitação devido a causas secundárias?**

**PERGUNTA 22: Como podemos calcular o NPSHr de uma bomba centrífuga?**

**PERGUNTA 23: Como se comporta o NPSHr quando uma bomba passa a operar em um sistema diferente?**

**PERGUNTA 24: Qual a região preferencial para se dar o início da cavitação? Por quê?**

**PERGUNTA 25: Existem fluídos mais críticos quando uma bomba opera em regime de cavitação? Por quê?**

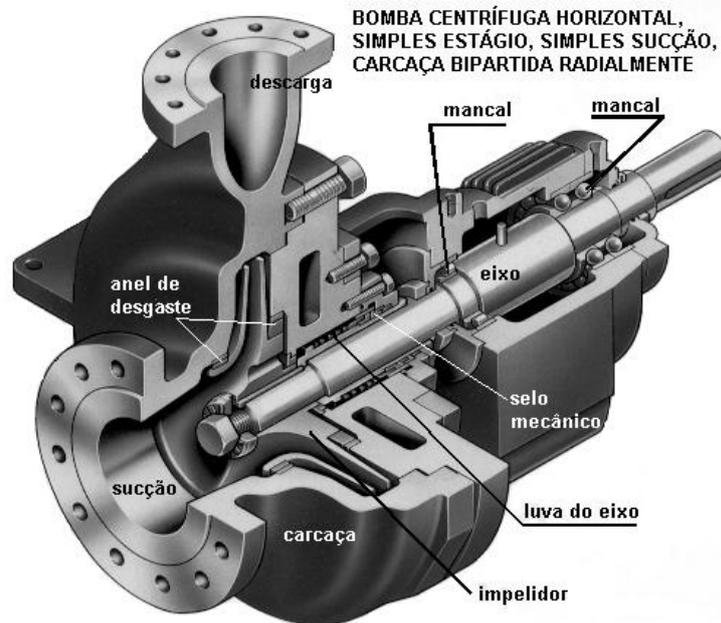
**PERGUNTA 26: Por que usamos para controle de vazão uma válvula sempre na descarga?**

**PERGUNTA 27: É possível reduzirmos o NPSHr de uma bomba?**

**PERGUNTA 28: Só as turbo bombas estão sujeitas à ocorrência de cavitação?**

**PERGUNTA 29: Qual a particularidade que as bombas de água de resfriamento tem em relação à cavitação?**

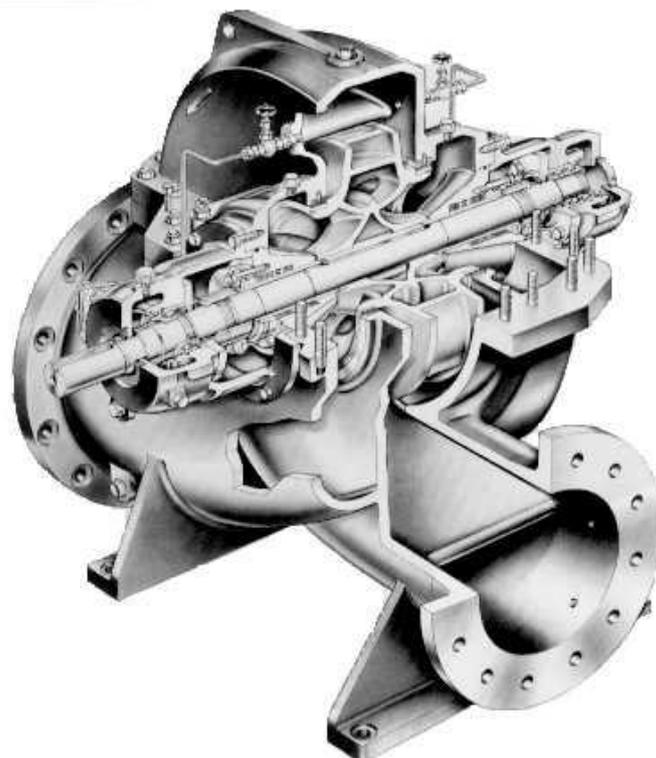
### 3.12 – DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS COMPONENTES DE UMA TURBO BOMBA



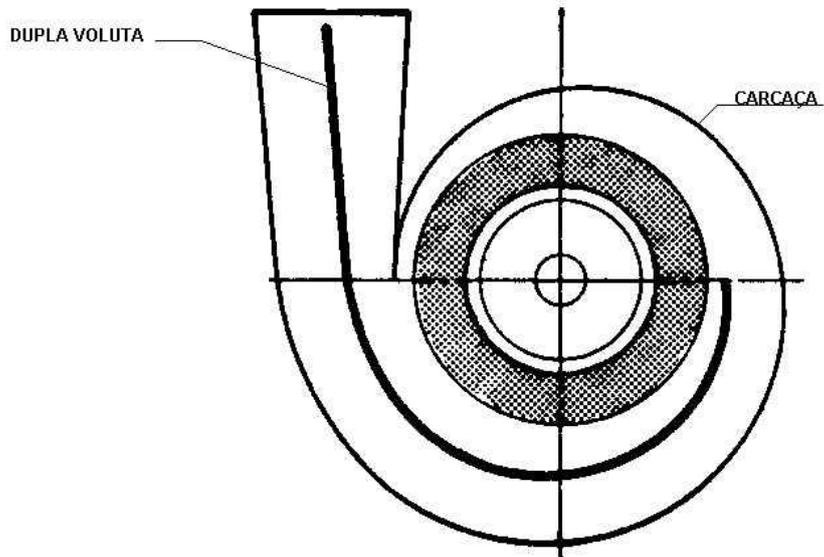
#### 3.12.1 – IMPELIDOR

#### 3.12.2 – CARÇAÇA

##### 3.12.2.1 – EM VOLUTA (DUPLA SUÇÃO)

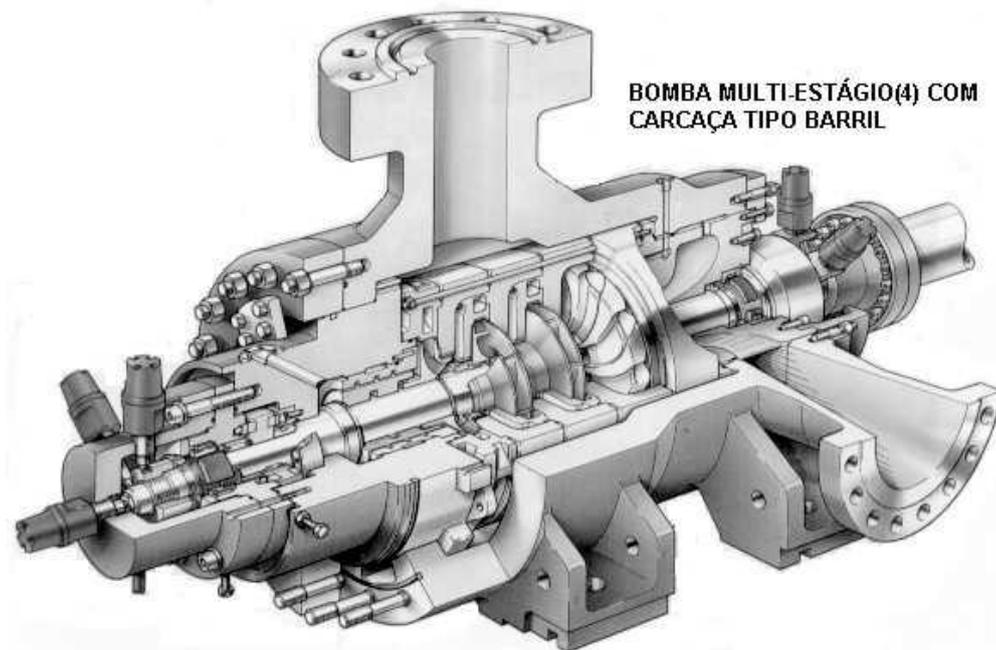


### 3.12.2.2 – CARCAÇA EM DUPLA VOLUTA



**PERGUNTA 30:** *Quais as funções da carcaça?*

### 3.12.2.3 – CARCAÇA COM PÁS DIFUSORAS (usada em bombas multi-estágio)



**PERGUNTA 31:** *O que é diafragma?*

### 3.12.3 – EIXO

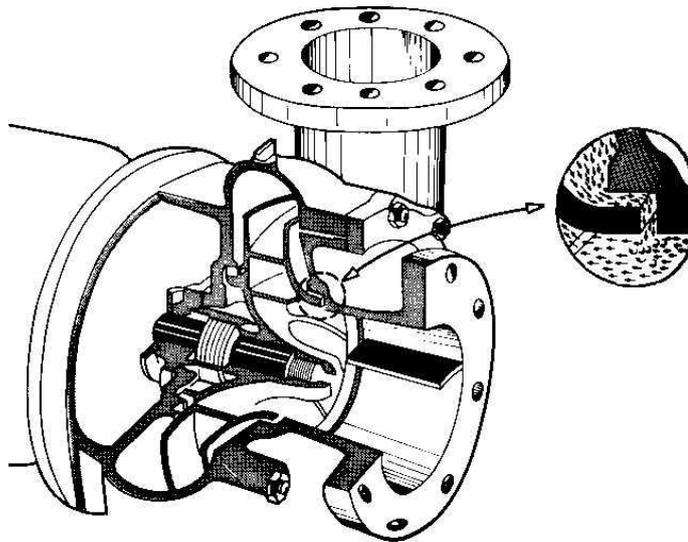
- Transmite o torque e a potência recebidos do acionador.
- Suporta o impelidor e outras partes rotativas

### 3.12.4 – LUVA DO EIXO

- Protege o eixo contra a erosão, corrosão ou desgaste
- Protege o eixo na região da caixa de gaxetas (função mais comum)

### 3.12.5 – ANÉIS DE DESGASTE

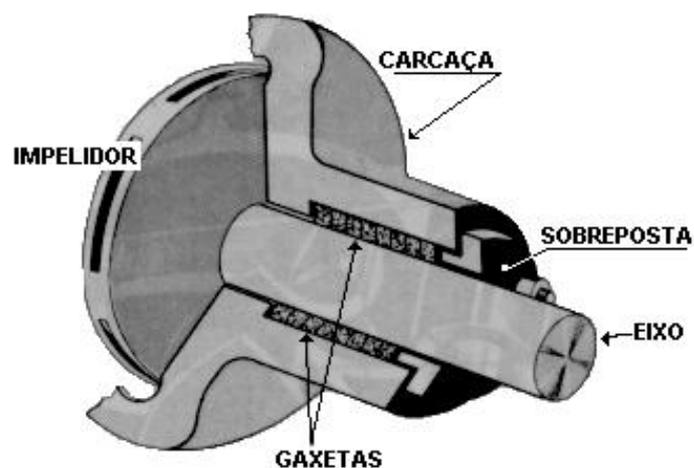
- Mantém a folga mínima entre o impelidor e a carcaça minimizando a recirculação.

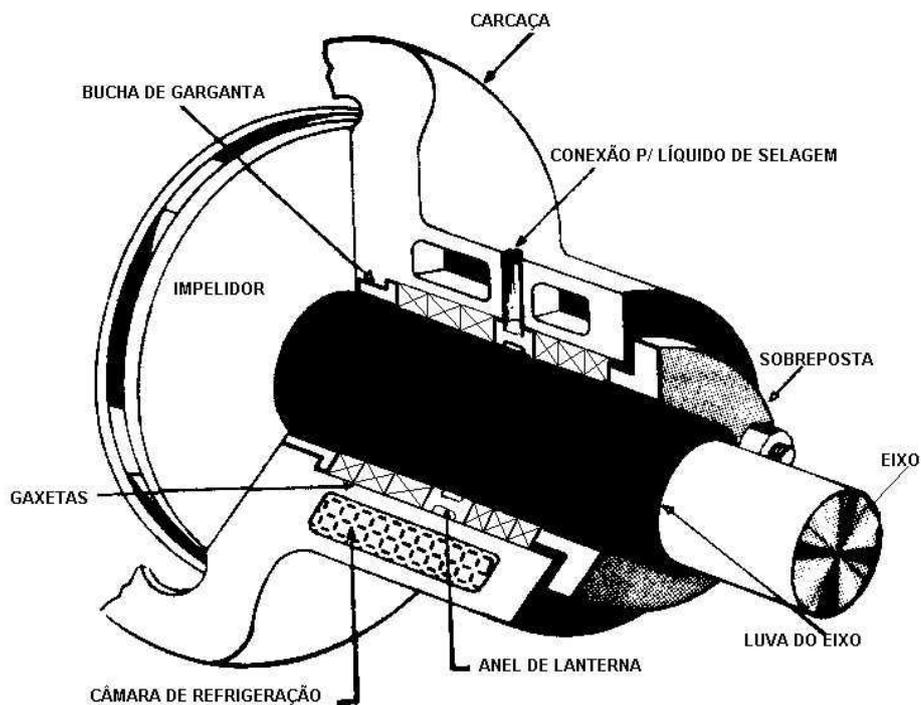


### 3.12.6 – VEDAÇÕES

- Evitar que haja vazamento de fluido para o exterior da bomba nos pontos onde o eixo passa pela carcaça.
- Evitar a entrada de ar para o interior da bomba nos mesmos pontos.

#### 3.12.6.1 – GAXETAS





### 3.12.6.2 – SELO MECÂNICO



**PERGUNTA 32:** *Quais são as três principais regiões de selagem?*

A-

B-

C-

**PERGUNTA 33: Quando usamos gaxetas ao invés de selo mecânico?**

**PERGUNTA 34: Quando usamos selos duplos como o representado na figura abaixo?**



**IDENTIFIQUE NO SELO ACIMA OS PRINCIPAIS COMPONENTES**

**A –**

**B –**

**C –**

**D –**

**E –**

**F –**

**G –**

**H –**

### **3.12.7 – MANCAIS**

- Mantém o correto alinhamento do conjunto rotativo em relação às partes estacionárias;
- Suportam as cargas axiais e radiais.

#### **3.12.7.1 – DE ROLAMENTO**

- É usado pela grande maioria das bombas;
- Podem ser de esferas (mais usados) ou de rolos.

#### **3.12.7.2 – DE DESLIZAMENTO**

- Usado às vezes em bombas pequenas que operam com fluidos limpos;
- Adequados para bombas de eixo com grande diâmetro em serviços severos;
- Bombas multi-estágio, alta pressão, altas rotações.

### 3.12.8 – ACOPLAMENTOS

#### 3.12.8.1 – RÍGIDOS

- Não permitem qualquer movimento relativo entre os eixos;
- Funcionam de maneira similar a um par de flanges;
- São usados em bombas pequenas de pequenas rotações e bombas verticais.

#### 3.12.8.2 – FLEXÍVEIS

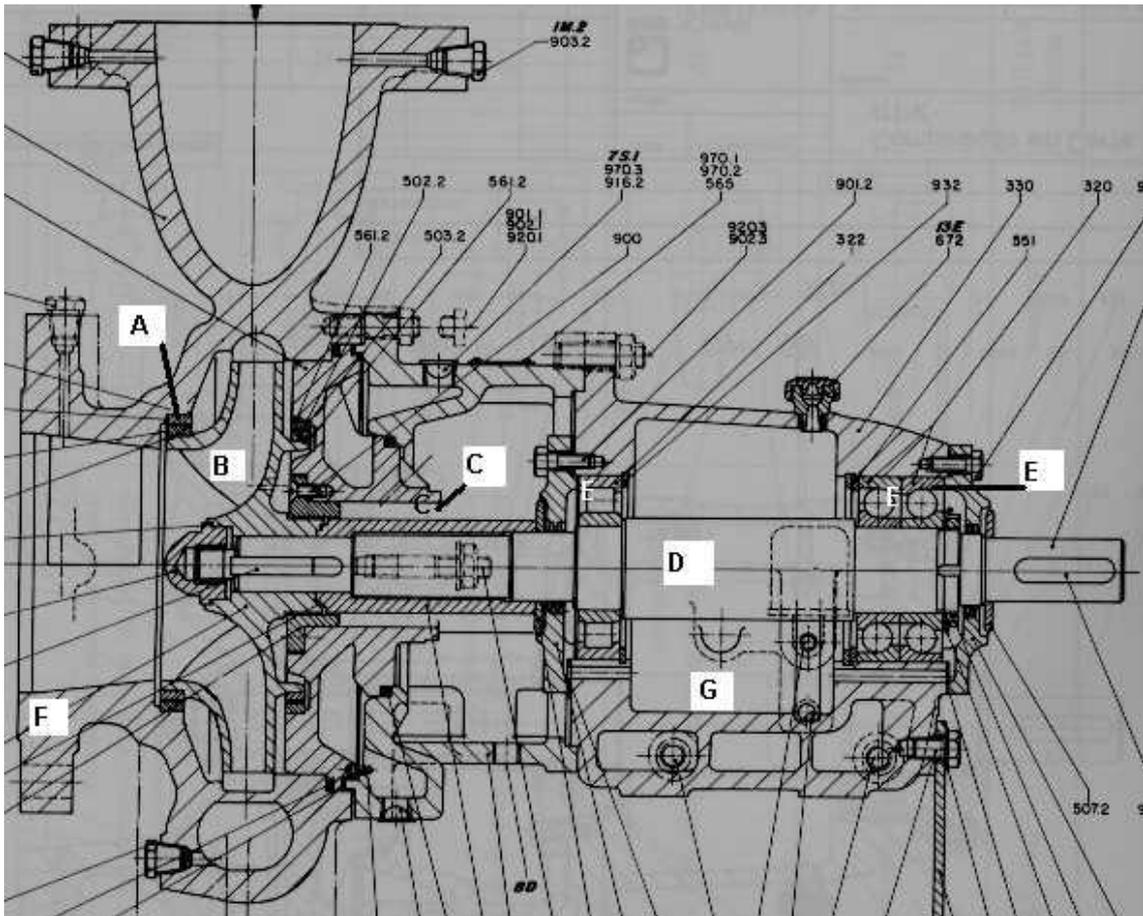
- São capazes de absorver pequenos desalinhamentos em operação.

### ACOPLAMENTO DE ENGRENAGENS



### ACOPLAMENTO TIPO GRADE





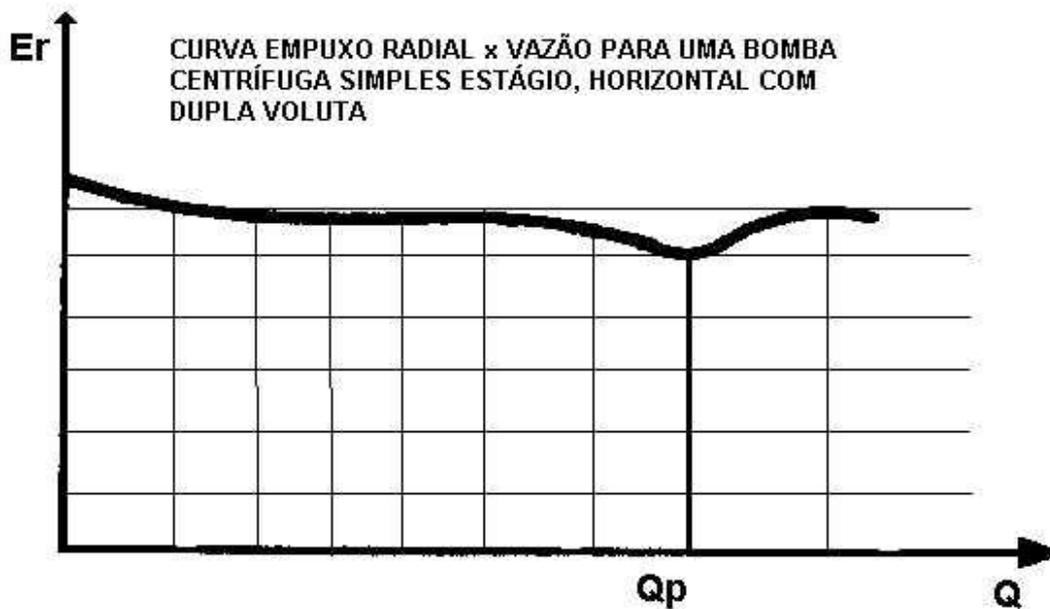
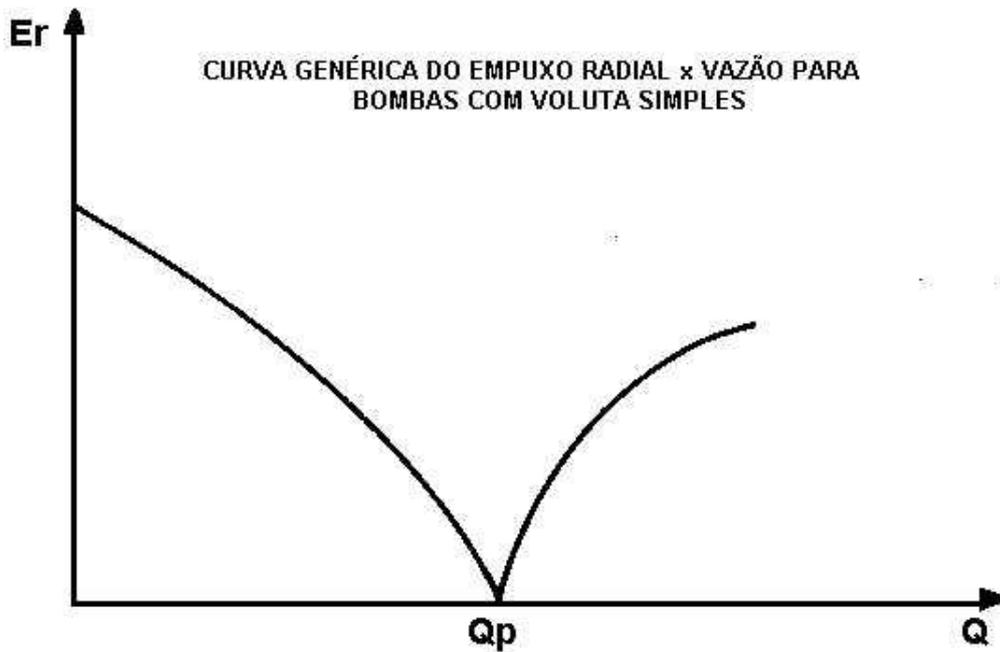
**IDENTIFIQUE CADA COMPONENTE**

- A -
- B -
- C -
- D -
- E -
- F -
- G -

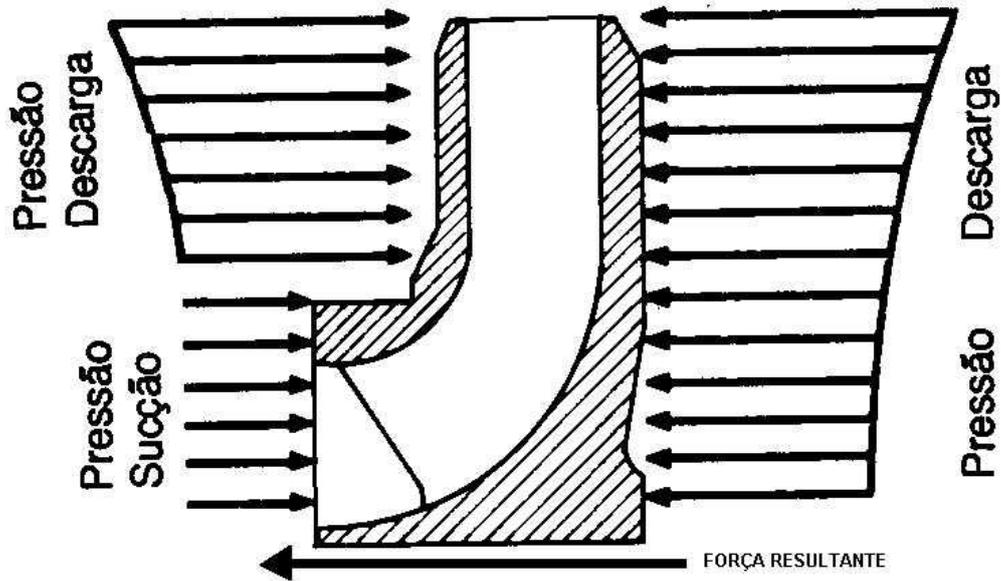
### 3.13 – ESFORÇOS EM UMA BOMBA CENTRÍFUGA

#### 3.13.1 – ESFORÇO RADIAL

A origem do empuxo radial é o desequilíbrio de pressões em torno do impelidor (na sua periferia) quando a bomba opera com vazões diferentes da vazão de projeto.



### 3.13.2 – ESFORÇO AXIAL

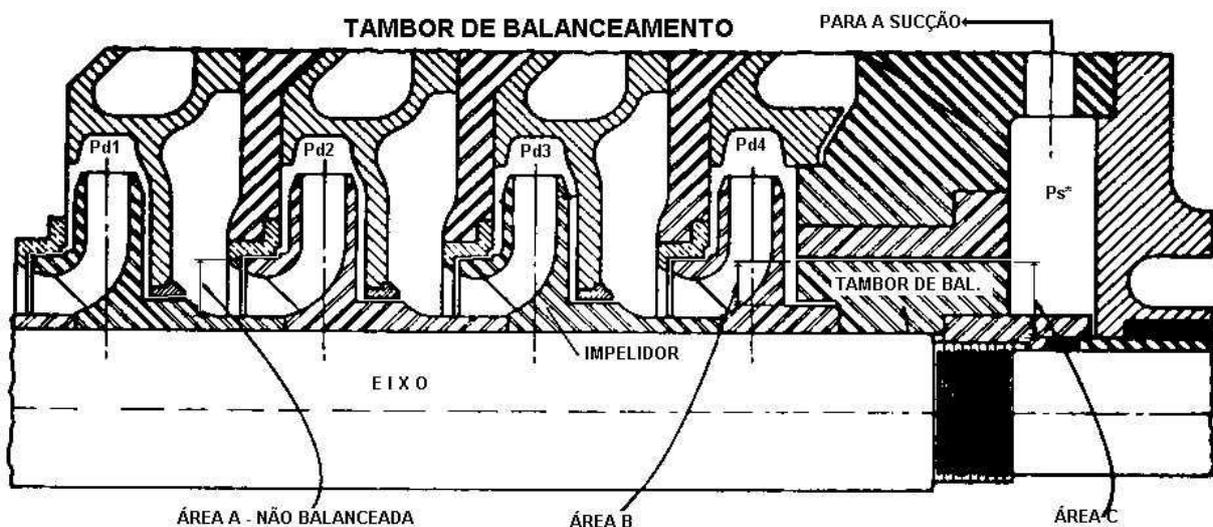


**PERGUNTA 35:** Como se comporta o empuxo axial em uma bomba de dupla sucção?

**PERGUNTA 36:** E em uma bomba de multi-estágio?

**PERGUNTA 37:** Que componente(s) da bomba suporta(m) o empuxo axial?

### TAMBOR DE BALANCEAMENTO



### 3.14 – SELEÇÃO DO TIPO ADEQUADO DE BOMBA

Fatores a serem considerados :

**3.14.1 – Vazão**

**3.14.2 – Pressão de descarga**

**3.14.3 – Velocidade específica**

**3.14.4 – Viscosidade do fluido**

**3.14.5 – Flexibilidade operacional**

**3.14.6 – Presença de ar ou sólidos no fluido bombeado**

### **3.15 – MATERIAIS**

#### **3.15.1 – FATORES QUE AFETAM A ESCOLHA DO MATERIAL**

3.15.1.1 – Características do fluido bombeado

3.15.1.2 – Condições de serviço

3.15.1.3 – Características dos materiais

3.15.1.4 – Vida esperada/custo

#### **3.15.2 – PRINCIPAIS MATERIAIS UTILIZADOS**

##### **3.15.2.1 – CARCAÇA**

Ferro fundido – até 70 Kgf/cm<sup>2</sup> e até 175 °C

Aço carbono fundido (A 216 Gr WCB) – até 140 kgf/cm<sup>2</sup> – é o mais usado

Aço carbono forjado – acima de 140 Kgf/cm<sup>2</sup> em carcaças tipo barril.

Aço inoxidável

##### **3.15.2.2 – IMPELIDOR**

Bronze – porque é fácil de fundir, fácil de usinar e permite faces lisas  
possui limitações para temperatura acima de 120°C (dilatação)  
possui limitações para altas velocidades periféricas do impelidor

Ferro fundido –

Aço carbono fundido –

Aço inoxidável –

### **3.16 - DANOS MAIS COMUNS EM UMA BOMBA CENTRÍFUGA**

<b>TIPO DE DANO</b>	<b>FORMA DE DETECÇÃO</b>
<b>FALHA NOS MANCAIS</b>	<b>ANÁLISE DE VIBRAÇÃO</b>
<b>FALHA NO SELO MECÂNICO</b>	<b>VAZAMENTO</b>
<b>ROÇAMENTO</b>	<b>ANÁLISE DE VIBRAÇÃO</b>

### **3.17 – NORMAS MAIS UTILIZADAS EM BOMBAS**

3.17.1 - API 610 – Para bombas de serviço pesado. Muito usada na indústria de petróleo e petroquímica

3.17.2 - ANSI B73.1 – Para bombas de serviço médio. Usada na indústria química, alimentícia e farmacêutica.

3.17.3 - DIN 24.256

3.17.4 - ISO 2858 – Versão mais completa da DIN.

### **3.18 – TESTES DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA**

#### **3.18.1 – ENSAIOS DURANTE A FABRICAÇÃO**

3.18.1.1 – ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (LP, PM, US e RX)

3.18.1.2 – HIDROSTÁTICO DA CARCAÇA – Verificar a resistência mecânica da carcaça.

#### **3.18.2 – TESTES FINAIS DE FUNCIONAMENTO**

3.18.2.1 – Teste de performance – Levantamento das curvas características.

3.18.2.2 – Teste mecânico – Verificação da vibração, ruído e temperatura dos mancais.

3.18.2.3 – Teste de NPSH – Verificação do NPSHr.

***PERGUNTA 38: Uma bomba é testada normalmente com água. Que correções precisamos fazer uma vez que o nosso fluido de trabalho normalmente é outro?***

### **3.19 – DOCUMENTAÇÃO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA**

3.19.1 – FOLHA DE DADOS

3.19.2 – CURVAS CARACTERÍSTICAS

3.19.3 – DESENHO DE CORTE

3.19.4 – LISTA DE PEÇAS

3.19.5 – DESENHO DO SELO

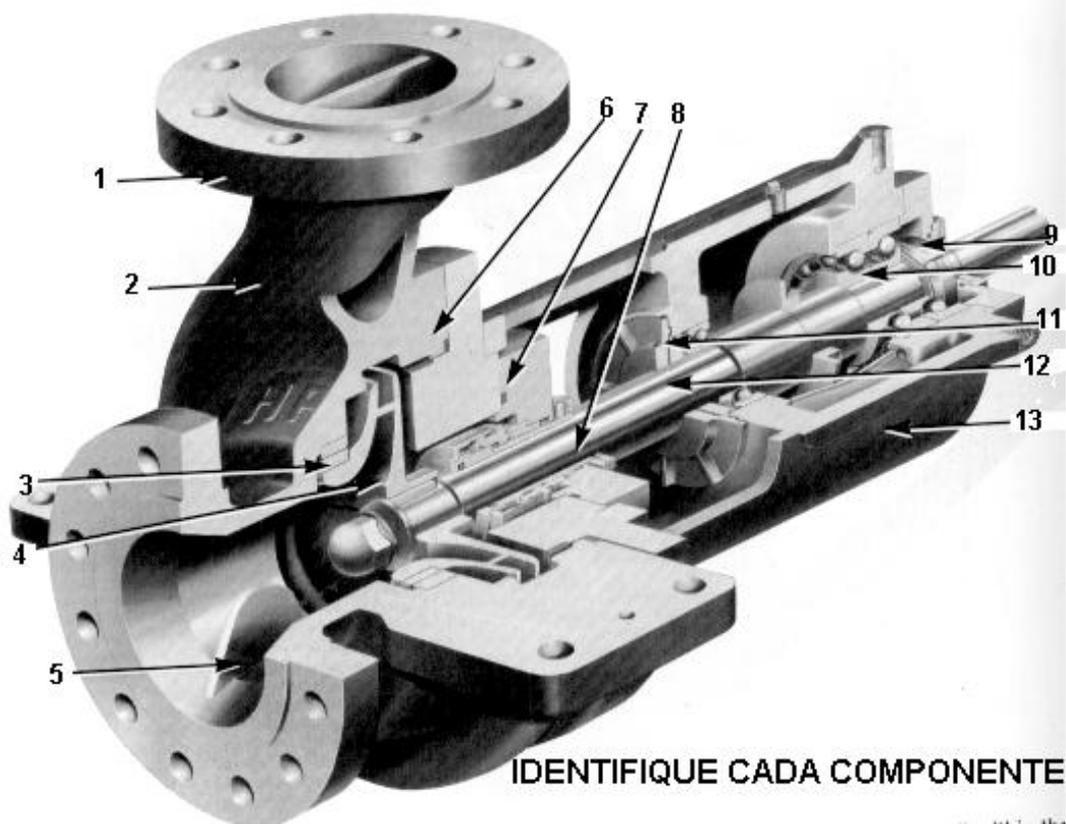
3.19.6 – DESENHO DA PLACA DE IDENTIFICAÇÃO

3.19.7 – DESENHO DE CONJUNTO

3.19.8 – DESENHO DE DETALHES

3.19.9 – CERTIFICADOS DE ENSAIOS E TESTES

3.19.10– MANUAL DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO



- 1 -
- 2 -
- 3 -
- 4 -
- 5 -
- 6 -
- 7 -
- 8 -
- 9 -
- 10 -
- 11 -
- 12 -
- 13 -