

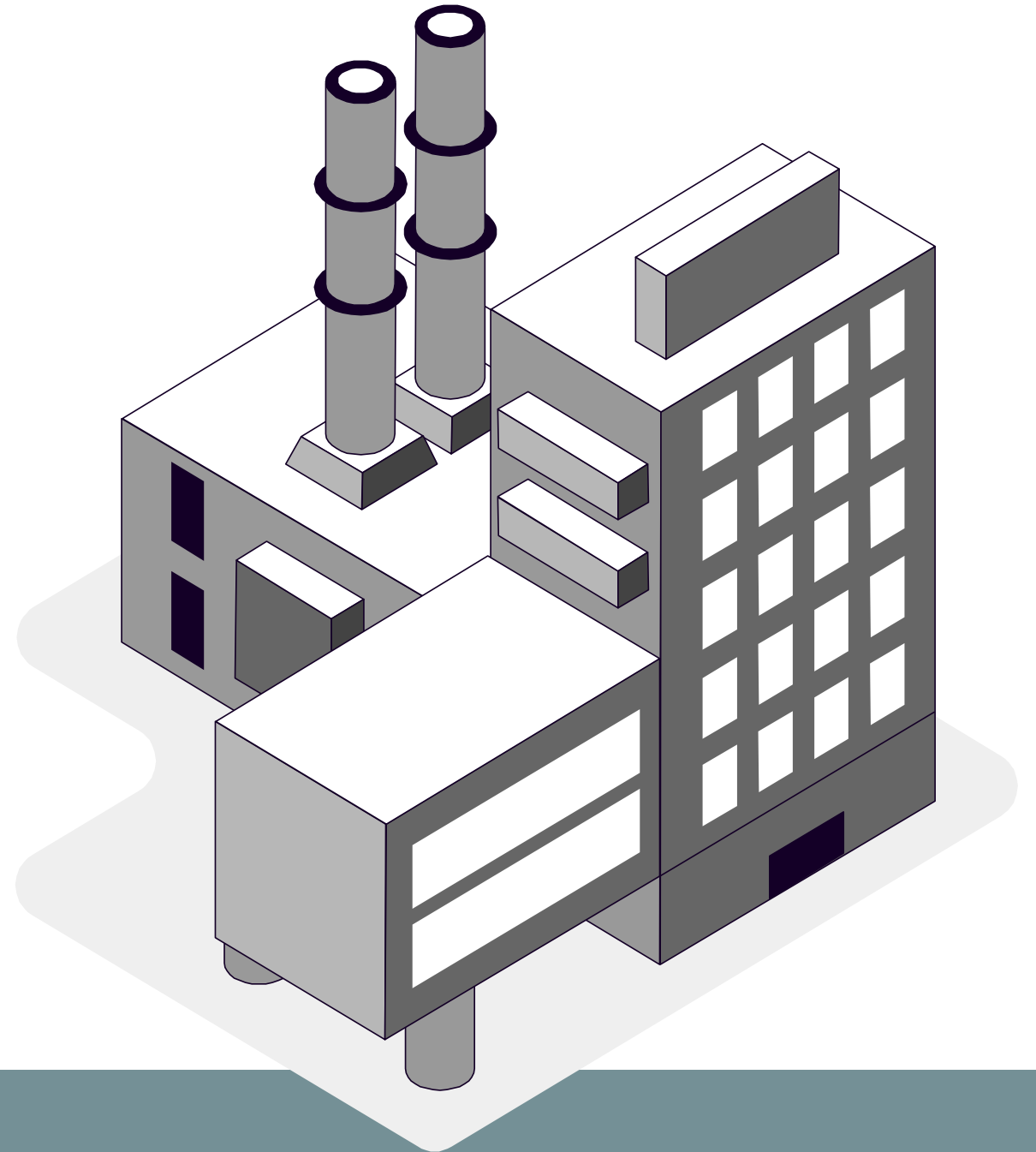
OPERAÇÕES UNITÁRIAS I

PROFª KASSIA G SANTOS

2020/1- CURSO REMOTO

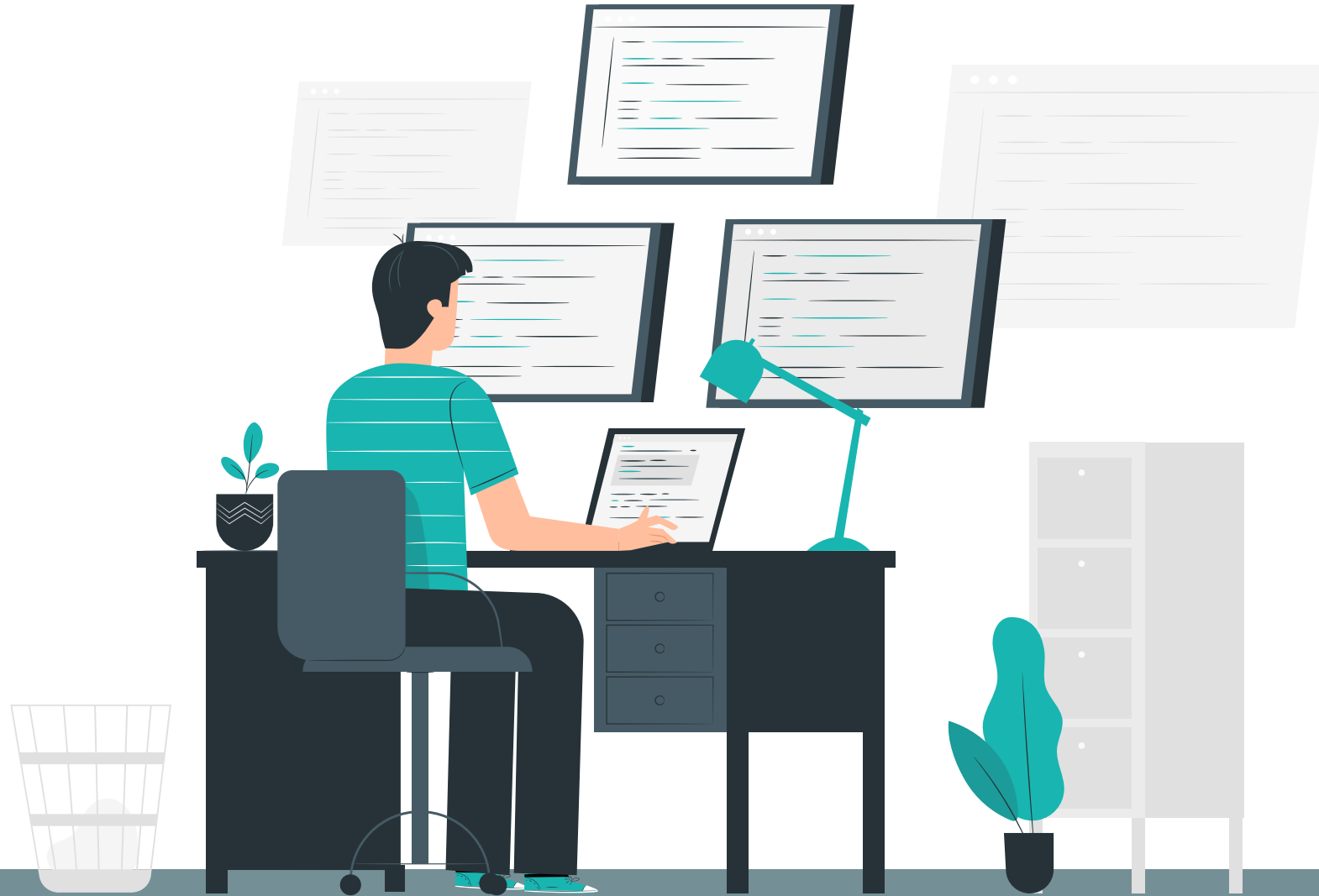
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

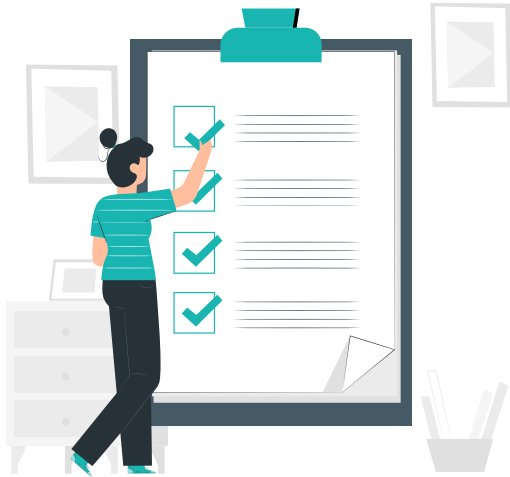
UFTM



AULA 2

1.3. BOMBAS CENTRÍFUGAS





Referências

- **Foust *et all*** ; Princípios das Operações Unitárias; Guanabara Dois, 1982, 670 p.
- **Macintyre, A.J.**; Bombas e Instalações de Bombeamento; Guanabara Dois, 1987, 782 p.
- **Cremasco, M. A.** Operações Unitárias em sistemas particulados e fluido-mecânicos. Blucher. 2012.

1.3 Bombas Centrífugas

BOMBAS CENTRÍFUGAS

são as mais utilizadas na indústria pela **simplicidade** de modelo, **baixo custo**, **flexibilidade** e **ampla** faixas de **vazão** e **queda de pressão**.

Entre todos os tipos de bombas, são as que imprimem ao fluido as **VAZÕES** mais elevadas.



-Ex. usadas para instalações residenciais, alimentação de caldeiras, poço profundo, de processo, química, de recirculação, petroquímica, de esgotos, efluentes, polpa, combate a incêndio, condensado, etc.



Fluidos puros ou com material particulado (rotor aberto)

1.3 Bombas Centrífugas

Vantagens

- ❑ Simples construção
- ❑ Baixo custo
- ❑ Fluido descarregado a uma pressão uniforme, sem pulsações
- ❑ Permite bombear líquidos com sólidos
- ❑ Podem ser acopladas diretamente a um motor
- ❑ Não há válvulas envolvidas na operação
- ❑ Menores custos de manutenção
- ❑ Operação silenciosa

Desvantagens

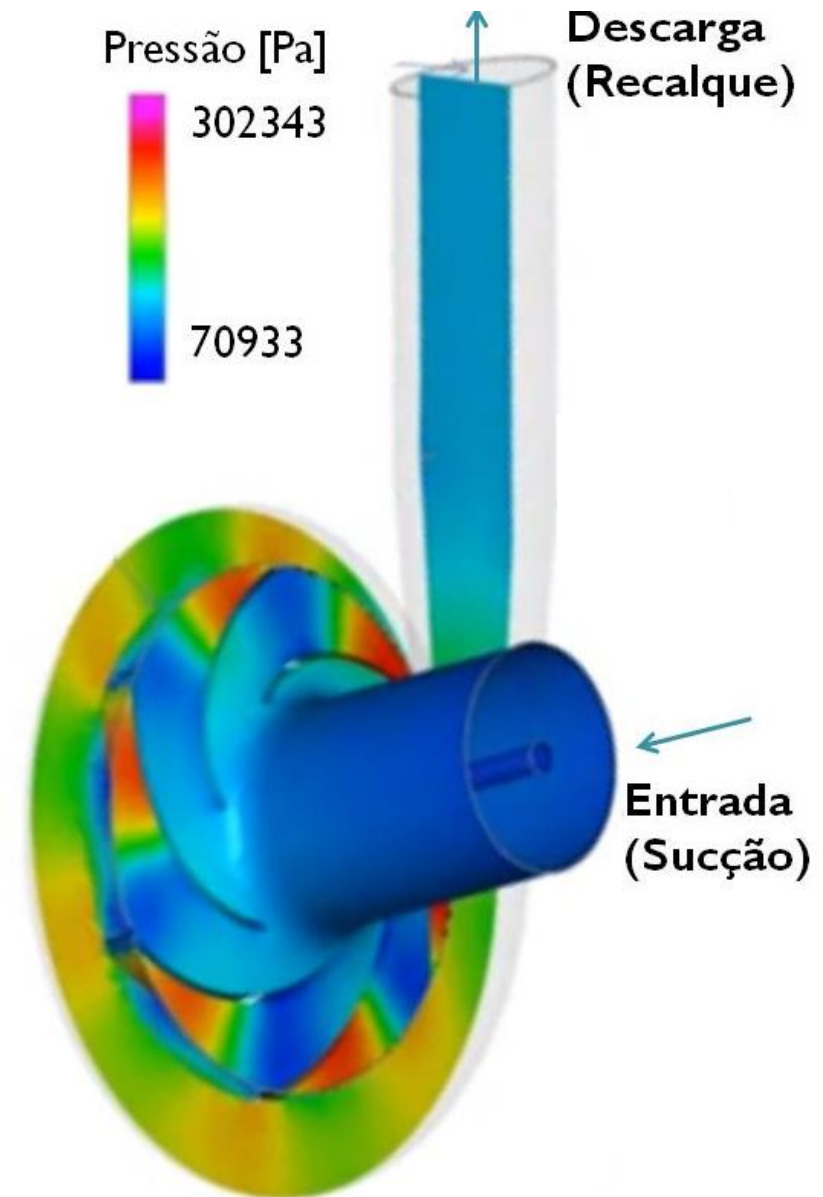
- ❑ Não servem para altas pressões
- ❑ Sujeitas à incorporação de ar e precisam de escorva
- ❑ Tem baixo rendimento mecânico (30 a 75%)
- ❑ Não apresentam boa eficiência pra líquidos muito viscosos (~500 cP)

FUNCIONAMENTO

O movimento das pás lança o líquido para a periferia do rotor pela ação da **força centrífuga**

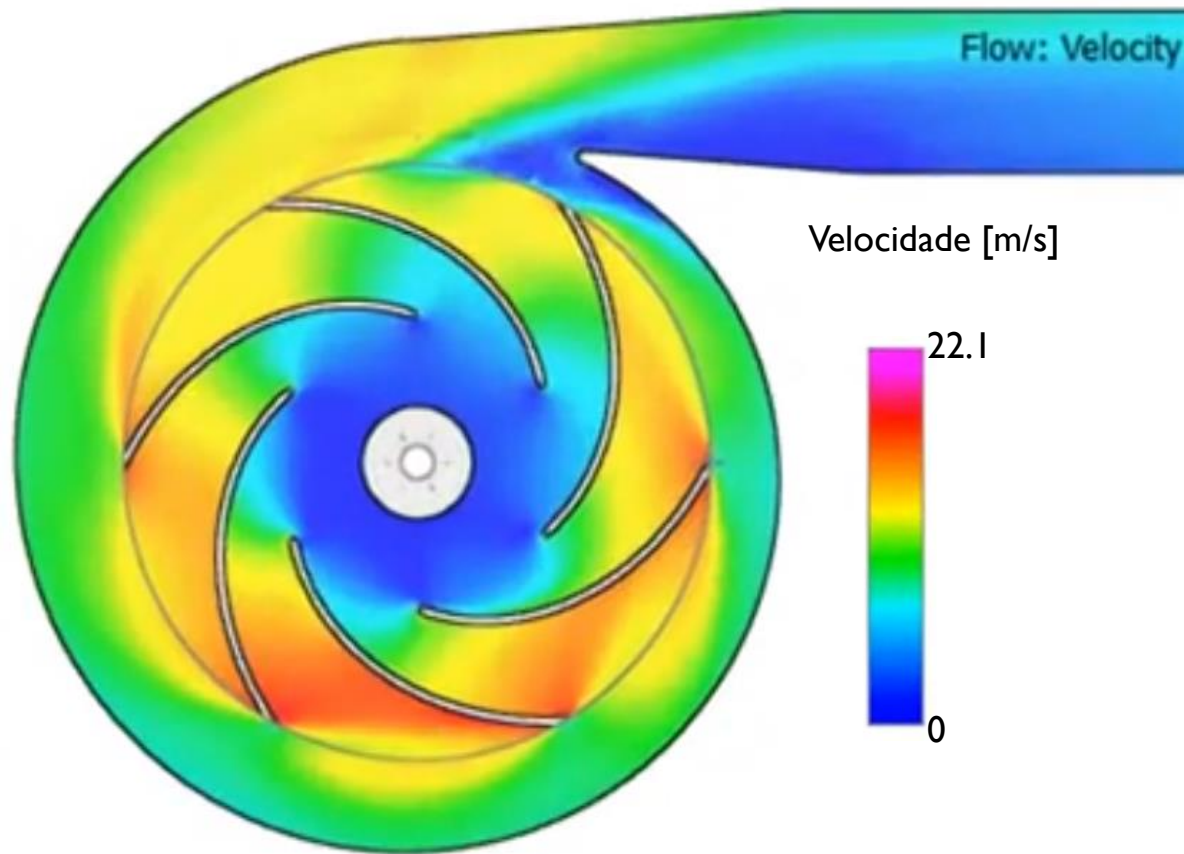
↓
↓ P na sucção

O líquido escoar para dentro do rotor, que descarrega o fluido com acréscimo **Energia Cinética**



FUNCIONAMENTO

Nas **extremidades** do rotor o líquido encontra um aumento progressivo de área de escoamento



energia cinética



Pressão

COMPONENTES DA BOMBA CENTRÍFUGA

Carcaça do Tipo Voluta: parte fixa que envolve o rotor

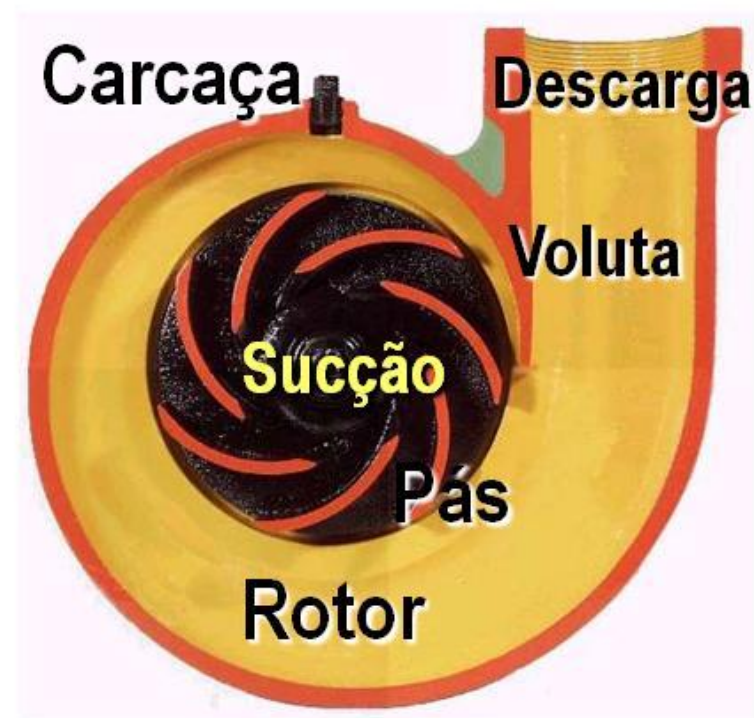
Aumento progressivo da área até a descarga.

energia cinética



Pressão

A voluta de uma bomba centrífuga aumenta em área de seu ponto inicial até a abertura da descarga, cuja função principal é a de converter a energia cinética impressa ao fluido pelo rotor em uma energia de pressão.



COMPONENTES DA BOMBA CENTRÍFUGA

Rotor: imprime velocidade ao líquido

O rotor é a peça que imprime energia de velocidade ao líquido, pode ser aberto ou fechado. O rotor fechado (mais eficientes) é indicado para o escoamento de líquidos sem substâncias em suspensão. Quando o material a ser deslocado é composto por pastas, lamas, esgoto sanitário, o rotor aberto (rendimento baixo, usado para fluidos abrasivos) é usado.



Fechado



Semi-Aberto



Aberto

COMPONENTES DA BOMBA CENTRÍFUGA

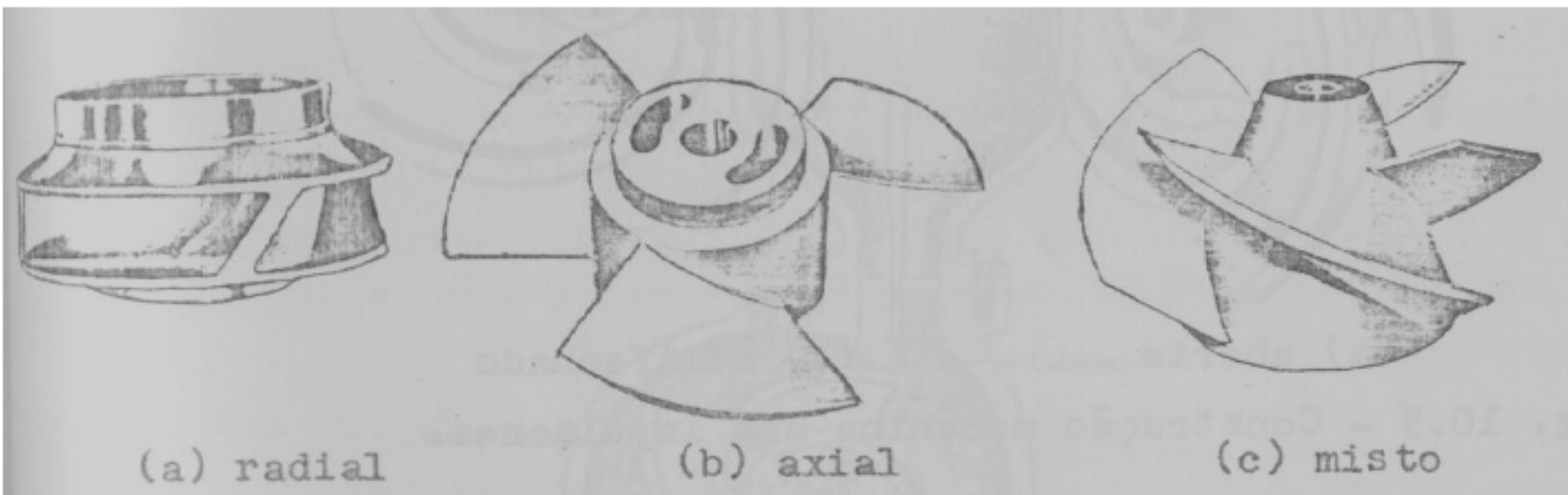
Rotor:

O tipo de rotor poderá definir os tipos de escoamento:

Axial: Descarrega o fluido na periferia axialmente (adequado para altas vazões, mas desenvolve baixas pressões)

Radial: Descarrega o fluido na periferia radialmente (desenvolve altas pressões mas só é adequado para baixas vazões)

Misto



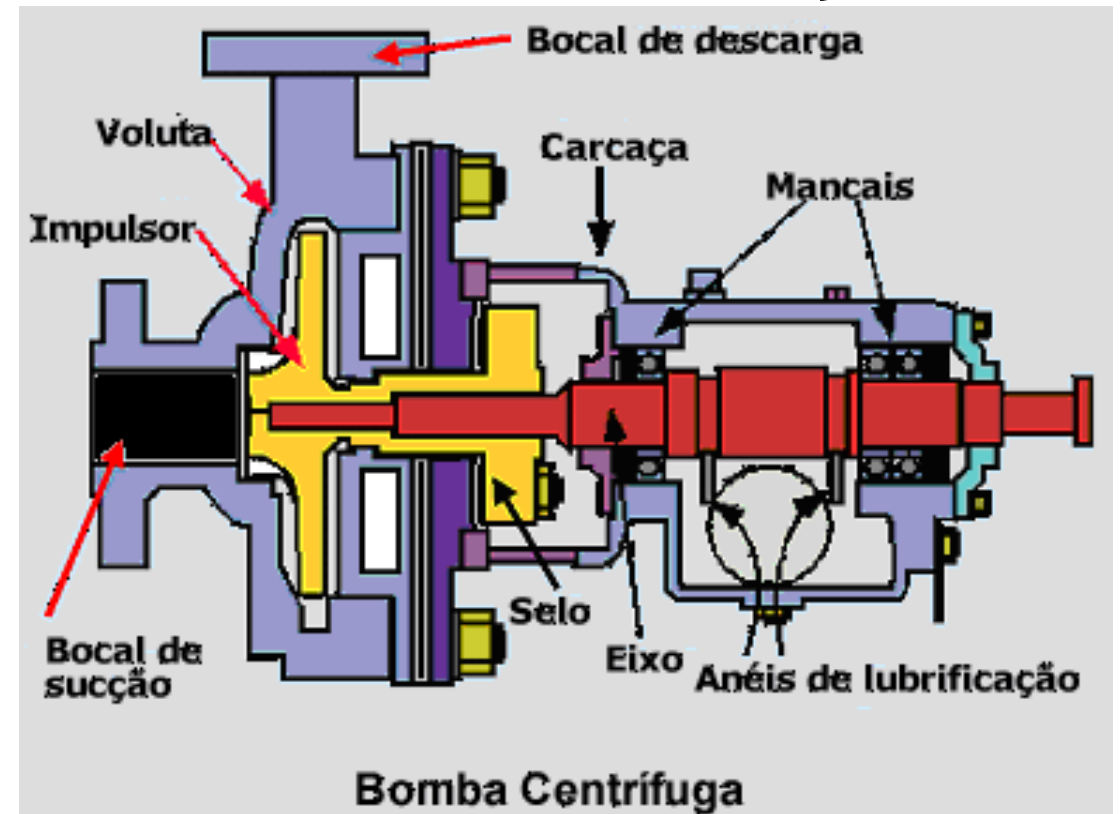
COMPONENTES

Anéis de Desgaste: impede o retorno de líquido; Evitam o desgaste e a necessidade de substituição de peças mais caras, como o rotor e a carcaça.

Eixo: Transmite o torque do motor ao rotor. Transmite o torque do motor ao rotor, deve ser construído com material que suporte variações de temperatura e fadiga.

Caixa de Gaxetas (amianto grafitado): impede o vazamento de líquido onde o eixo e atravessa a carcaça.

Rolamentos (Mancais): Suportam o eixo, mantendo-o alinhado com as peças estacionárias, dando estabilidade ao rotor, reduzindo tensões e vibrações.



SELEÇÃO DO TIPO DE BOMBA

Quando mais de um tipo preencher esses requisitos, um estudo técnico-econômico se faz necessário.

DESLOCAMENTO POSITIVO

DOSAGEM:

EX: A adição de flúor em quantidades definidas na água de abastecimento de uma cidade é feita quase que exclusivamente, por uma bomba de deslocamento positivo.

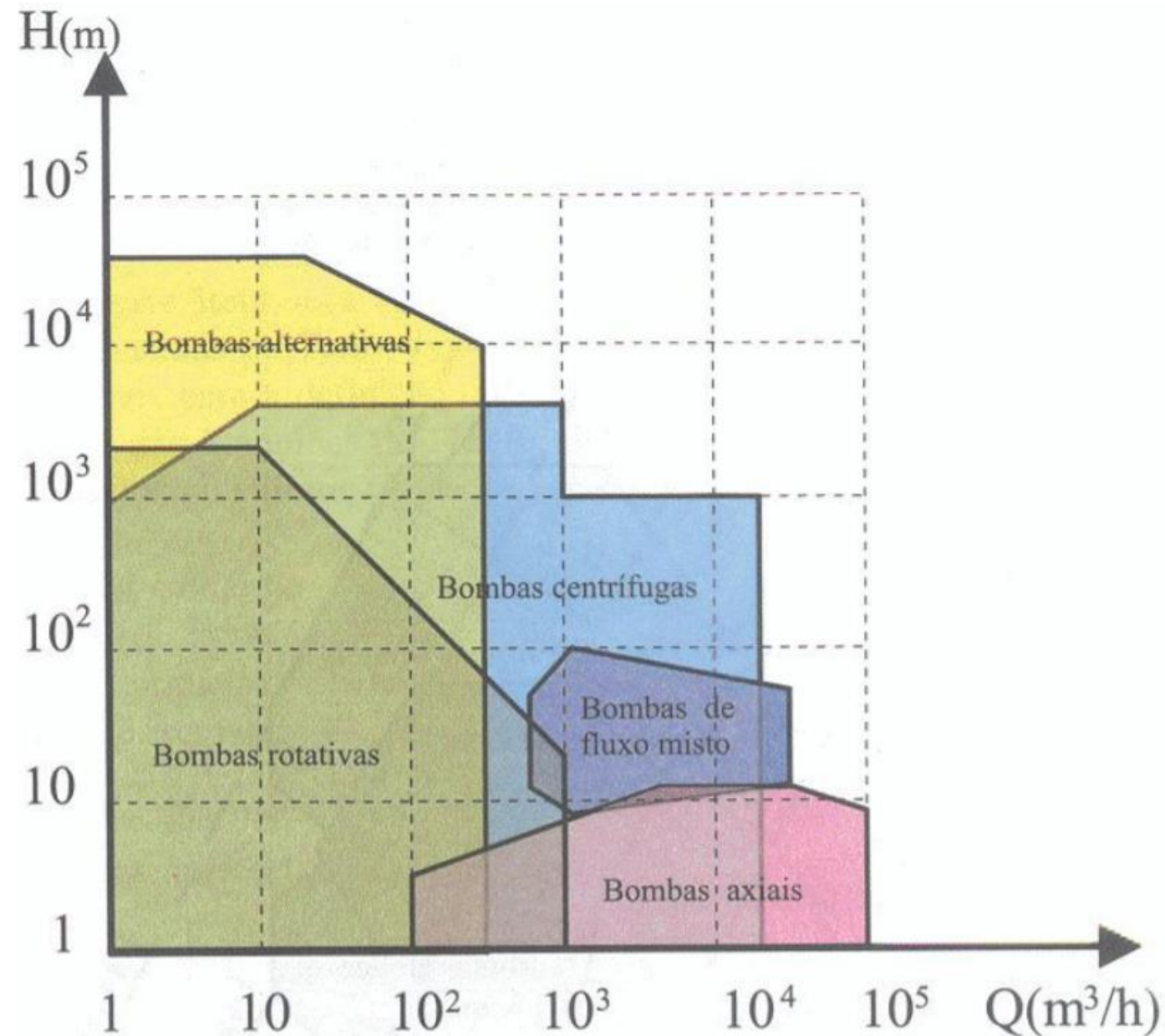
BOMBAS ROTATIVAS

Fluidos viscosos
Ex: Para transportar óleos viscosos, melaços e tintas é comum o emprego de bombas rotativas.

BOMBAS CENTRÍFUGAS

Altas vazões.
Ex: o bombeamento de água de um rio para estação de tratamento e a água potável da base de um prédio até a sua caixa de água.

SELEÇÃO DO TIPO DE BOMBA



SELEÇÃO DO TIPO DE BOMBA

- ❑ A escolha do modelo de bombas centrífugas é feita através de catálogos com figuras que fornecem as principais características das bombas. Esses catálogos de seleção apresentam, em geral, um gráfico de altura manométrica em função da vazão, que permite "enquadrar" a bomba em um modelo padronizado.
- ❑ Após a escolha do modelo deve-se recorrer as curvas características correspondentes a esse modelo, que fornecem as demais especificações.
- ❑ Para o completo entendimento da seleção de bombas centrífugas, alguns conceitos importantes devem ser mencionados, tais como NPSH requerido e disponível, cavitação, entre outros.

CONCEITOS

BALANÇO DE QM

a) Equação de Bernoulli
$$\frac{\Delta v^2}{2} + \frac{\Delta P}{\rho} + g\Delta z = 0 \quad (1)$$

$\Delta v^2/2$ - energia para variar a velocidade do fluido.

$\Delta P/\rho$ - energia para mover o fluido de um nível de pressão a outro.

$g\Delta z$ - energia para elevar o fluido à uma altura ΔZ .

- Para um **fluido real**, temos:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + h_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_2 + h_c \quad (2)$$

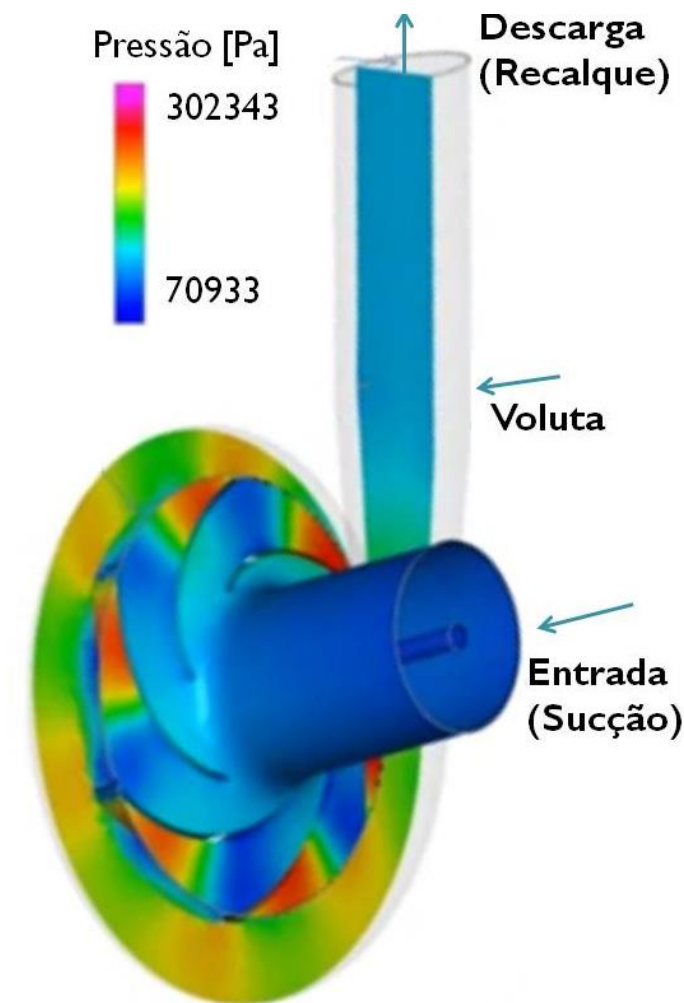
h_c - perda de carga do sistema devido ao atrito

CONCEITOS

ENERGIA REQUERIDA

b) NPSHr (requerido) *Net Positive Suction Head*

- ❑ É a energia **requerida** pelo fluido para a partir do flange de sucção **vencer as perdas de carga** dentro da bomba e chegar ao ponto de ser recalcado.
- ❑ É a **altura manométrica** necessária para vencer as perdas de carga de modo a garantir que na zona de menor pressão do rotor a **pressão local** esteja **acima** da **pressão de vapor** do líquido.
- ❑ É uma característica da bomba e seu valor é fornecido pelo fabricante.



CONCEITOS

ENERGIA DISPONÍVEL

c) NPSH_d (disponível) *Net Positive Suction Head*

- ❑ É a quantidade **energia** que o líquido possui a qual deve ser **superior a pressão de vapor** do fluido bombeado e cujo valor depende das características do sistema e do fluido.
- ❑ A redução da pressão na sucção abaixo da pressão de vapor do líquido pode causar vaporização.
- ❑ O vapor formado pode interromper o escoamento

$$NPSH_d = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (3)$$

Bom funcionamento da bomba:

$$NPSH_d > NPSH_r$$

CONCEITOS

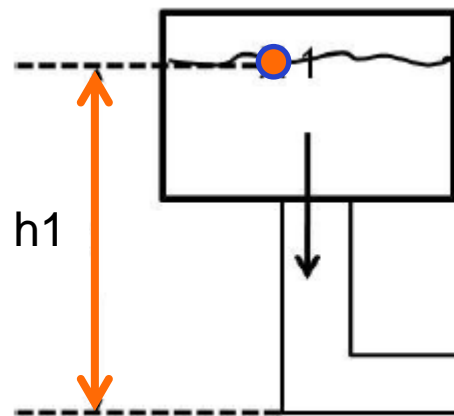
BOMBA AFOGADA

c) NPSHd (disponível)

É quando o **reservatório** de sucção está **acima** do nível da bomba

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + h_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + \cancel{h_2} + h_c \quad \left(\text{Subtraindo } \frac{P_v}{\rho g} \right) \quad (4)$$

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + h_1 - \frac{P_v}{\rho g} = \underbrace{\frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_v}{\rho g}}_{NPSH_d} + h_c \quad (5)$$



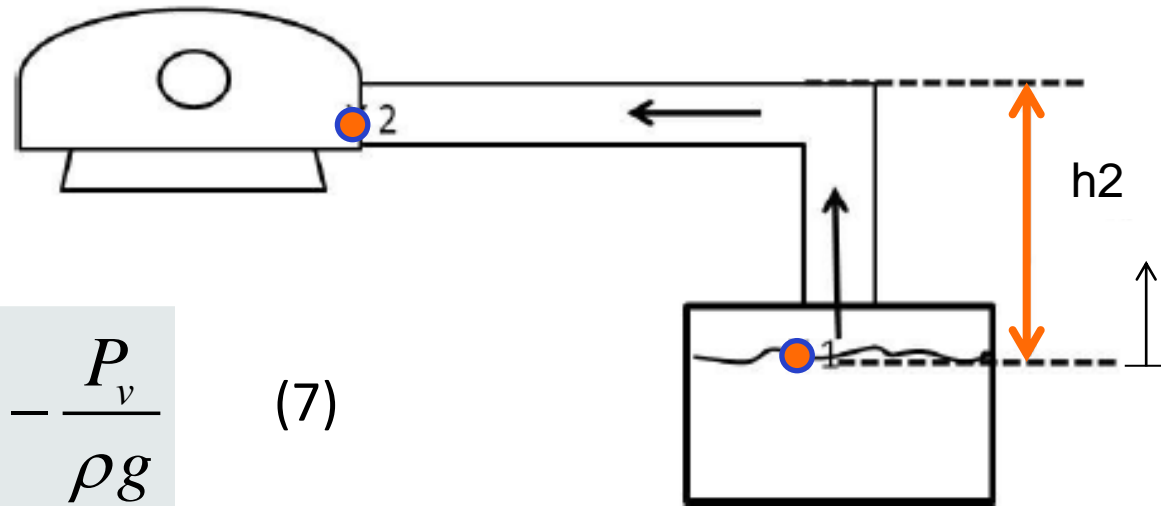
$$NPSH_d = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 - h_c - \frac{P_v}{\rho g} \quad (6)$$

CONCEITOS

BOMBA NÃO AFOGADA

c) NPSH_d (disponível)

O reservatório de sucção **abaixo** do nível da bomba



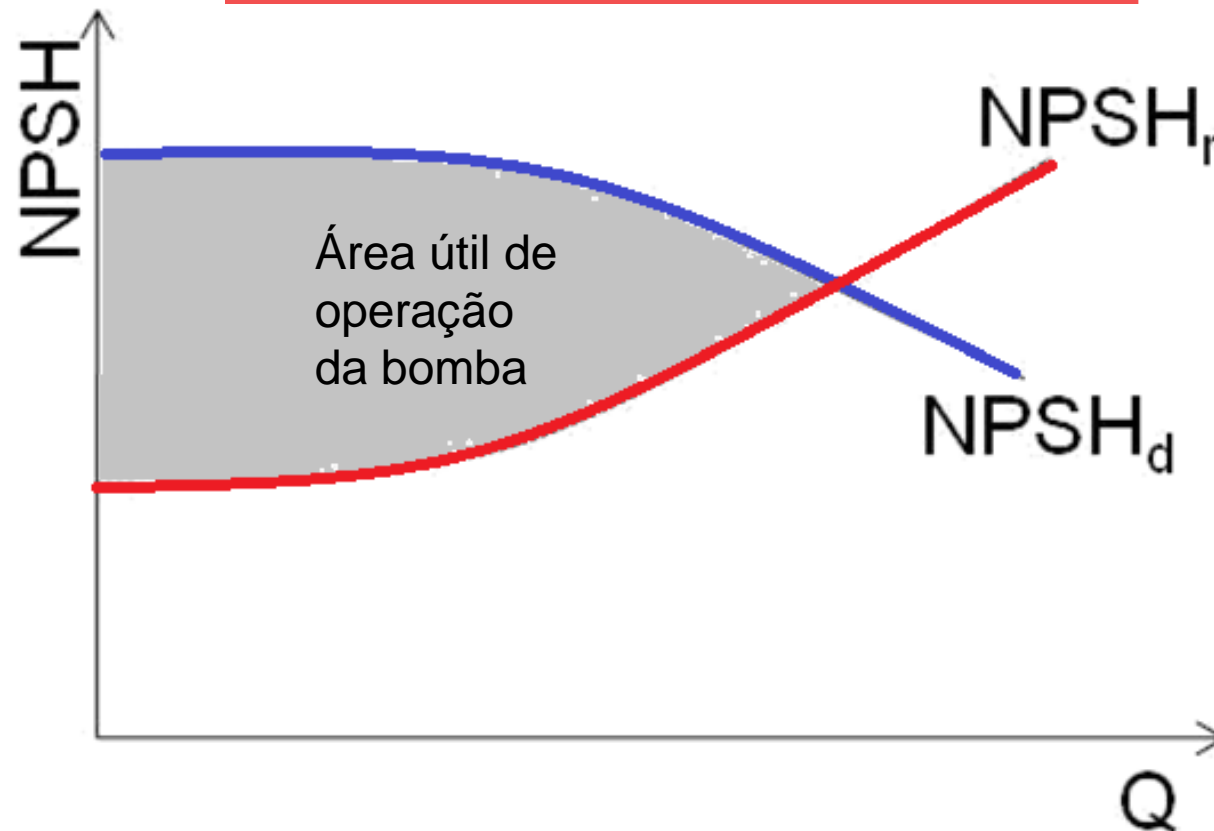
$$NPSH_d = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - h_2 - h_c - \frac{P_v}{\rho g} \quad (7)$$

CONCEITOS

FUNCIONAMENTO

O bom funcionamento da bomba depende da relação:

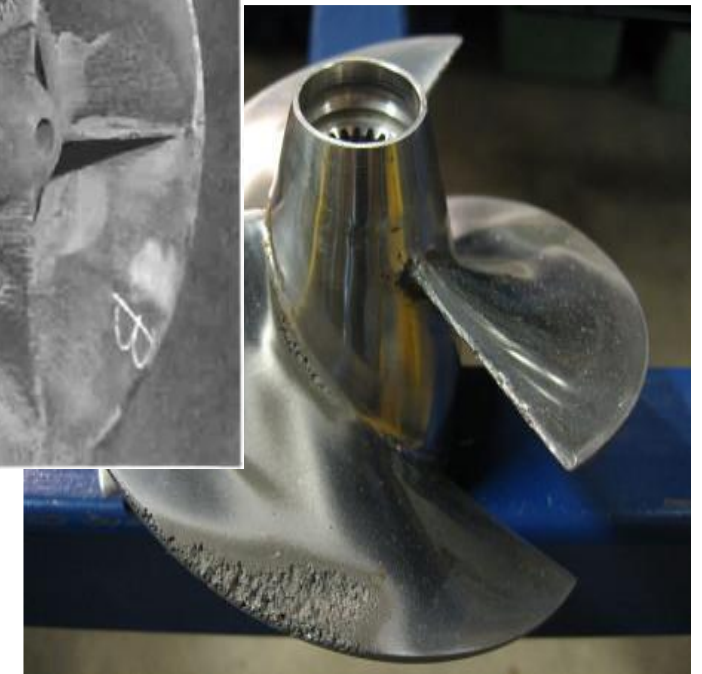
$$NPSH_d > NPSH_r$$



CONCEITOS

CAVITAÇÃO

- ❑ Em elevadas capacidades é possível ocorrer regiões **de baixas pressões**. Se a pressão fica abaixo da pressão de vapor do líquido é possível a ocorrência de **vaporização** nestes pontos.
- ❑ Ao atingirem uma região de maior pressão as bolhas desaparecem.
- ❑ A formação e desaparecimento das bolhas constituem o fenômeno da cavitação.
- ❑ Os efeitos da cavitação são: **ruído e vibração**. Este processo (formação e colapso das bolhas) pode provocar buracos nas pás do rotor, e a vibração pode causar danos nos rolamentos.



CONCEITOS

CAVITAÇÃO

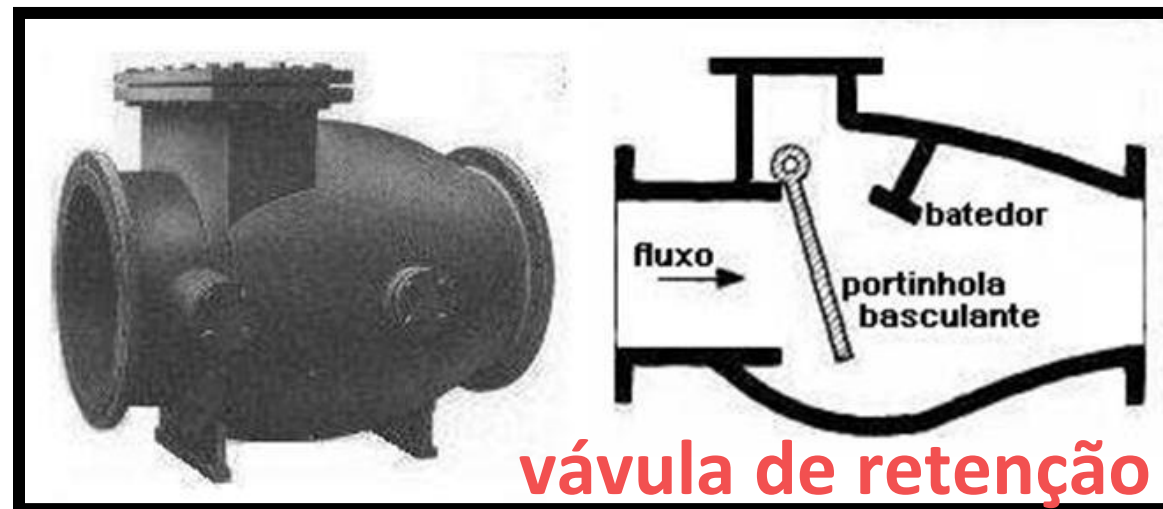
$$NPSH_d = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 - h_c - \frac{P_v}{\rho g}$$

- ❑ Em uma instalação já montada e com problemas de cavitação algumas medidas podem ser tomadas:
- ❑ diminuir a vazão estrangulando a(s) válvula(s) de recalque (se possível);
- ❑ retirar acessórios com alta perda de carga que muitas vezes são desnecessários na sucção;
- ❑ substituir alguns acessórios da tubulação de sucção por outros de menor perda de carga. Ex., substituir um cotovelo de 90° de raio curto por outro de raio longo
- ❑ diminuir a temperatura do fluido (se possível) , pois diminui P_v .

CONCEITOS

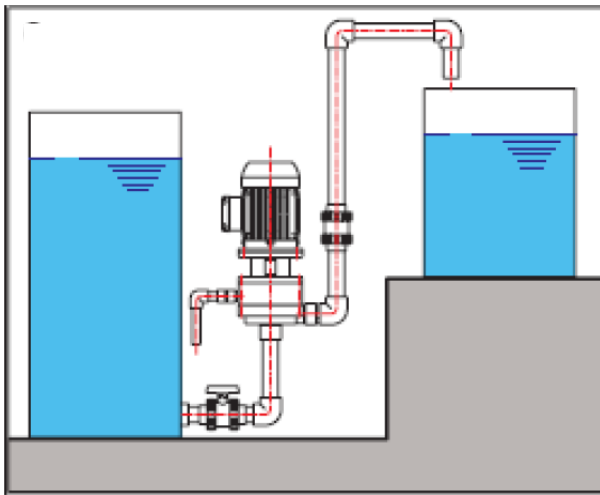
ESCORVA

- ❑ Garantir que no início da operação, tanto a bomba quanto o tubo de aspiração estejam cheios de líquido.
- ❑ A bomba por si só não é capaz de expulsar o ar e criar o vácuo que permite a entrada do líquido para dar início ao funcionamento.
- ❑ Para realização da escorva é comum o uso de válvula de retenção que impede o escoamento do líquido do tubo para o reservatório, quando a bomba está parada ou pára de funcionar.
- ❑ Outros procedimentos utilizados são a instalação de sucção tipo "**bomba afogada**" e a colocação de reservatório para a escorva.

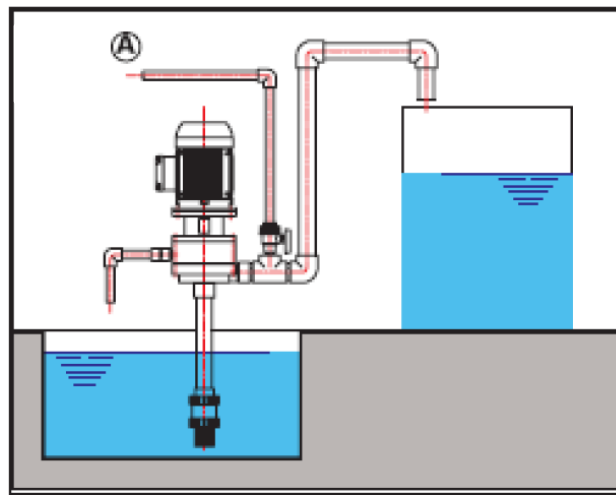


CONCEITOS

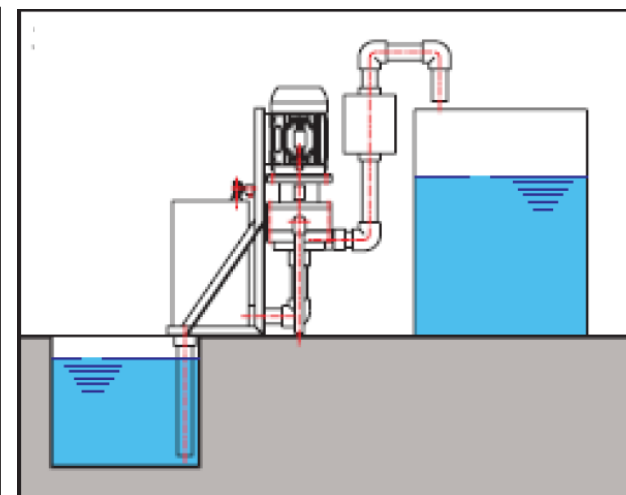
ESCORVA



Bomba afogada: (abaixo do nível de sucção).



Reservatório aterrado e bomba instalada acima do nível do líquido, usando uma válvula de pé para permitir que o rotor da bomba permaneça afogado. Para a primeira partida, ou após longas paradas, a bomba precisará ser abastecida, o que pode ser feito através da tubulação A.

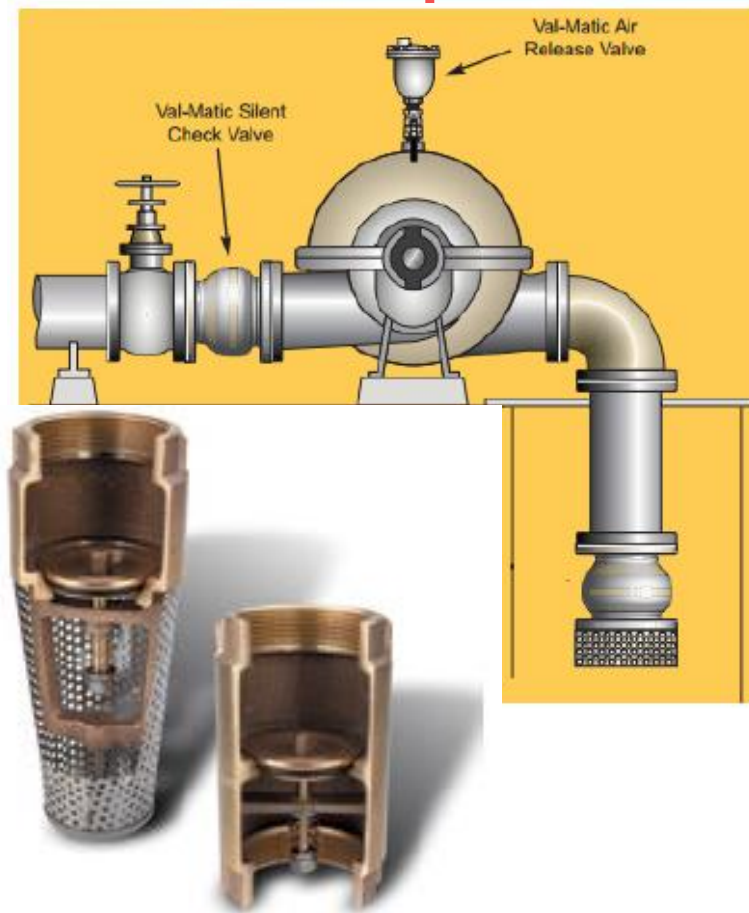


Bomba instalada acima do nível de líquido com um sistema auto-escorvante BOMAX, o que permite à bomba operar com sucção a seco de até 4 metros, sem falhas ou necessidade de escorvamento.

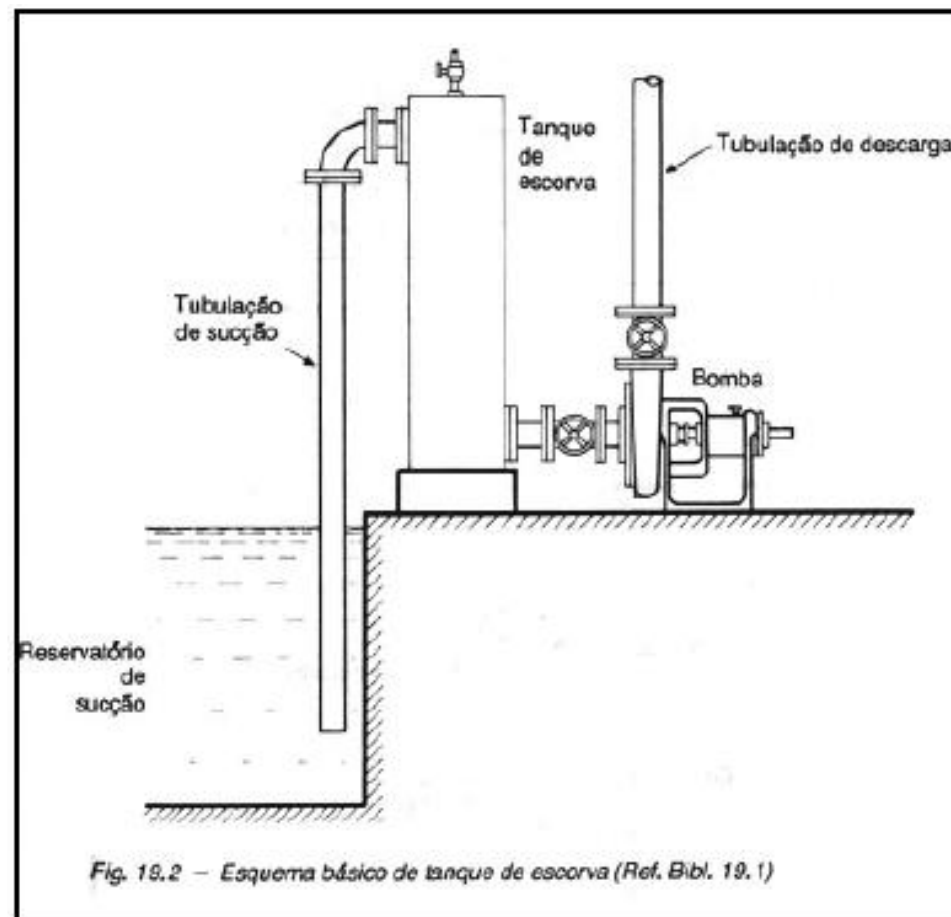
CONCEITOS

ESCORVA

Com válvula pé de crivo



Com tanque de escorva



CONCEITOS

POTÊNCIA DA BOMBA

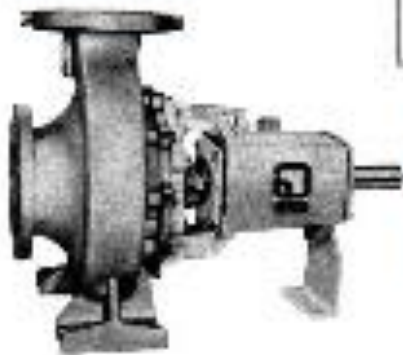
- ❑ **Potência de Freio ou de eixo** (BHP = break horse power) : É a potência real entregue ao eixo da bomba. Essa é a potência a ser lida nas curvas da bomba a qualquer taxa de fluxo. É função da carga total e do peso do líquido bombeado, em um determinado período de tempo.
- ❑ **Potência Hidráulica**, ou Potência de água (WHP) é a potência do líquido entregue pela bomba.
- ❑ Observação: A potência de freio, ou de entrada, para uma bomba é maior que a potência hidráulica, devido às perdas mecânicas e hidráulicas ocorridas na bomba.

CONCEITOS

EFICIÊNCIA DA BOMBA

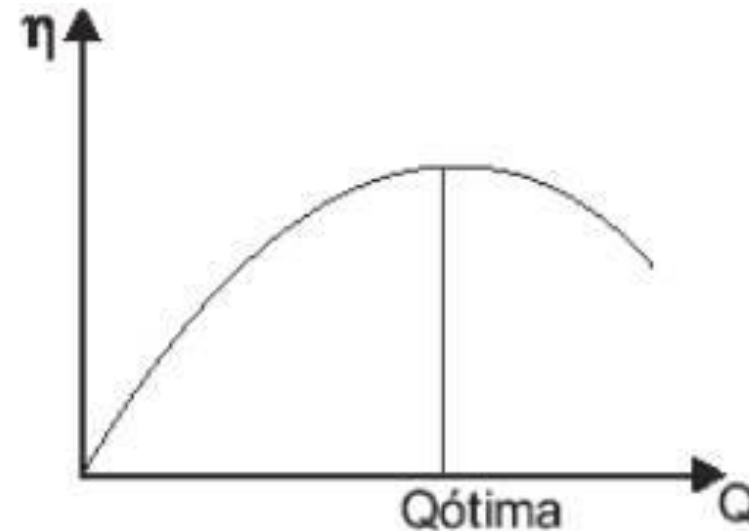
- ❑ A **eficiência** ou **rendimento** da bomba é a relação entre a Potência Hidráulica e a potência de freio (ou de eixo)

Ph - Potência
Hidráulica



$$\eta = \frac{P_h}{P}$$

P - Potência
consumida
Pela bomba



Curva do rendimento da bomba e vazão

A bomba transforma a energia mecânica no seu eixo em energia hidráulica cedida ao fluido. Mas, existe limites para esta transformação energética. O rendimento aumenta até atingir um ponto máximo, para uma vazão. Após essa vazão ótima, o rendimento da bomba decresce e temos perdas energéticas .

CURVA DA BOMBA

O gráfico de variação da capacidade com a pressão para uma bomba particular, define a curva característica de desempenho da bomba. É fornecida pelo fabricante.

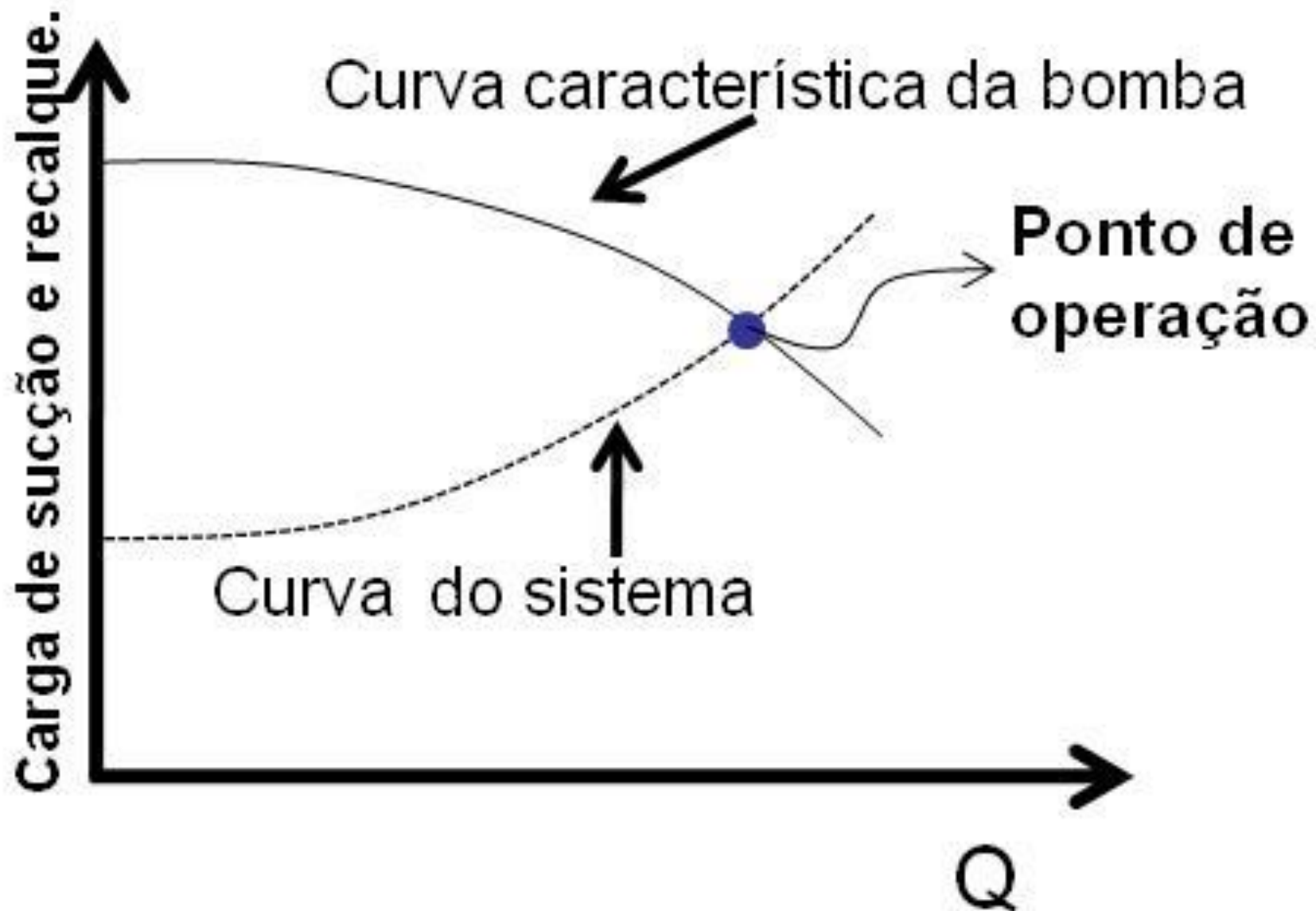
CURVA DO SISTEMA

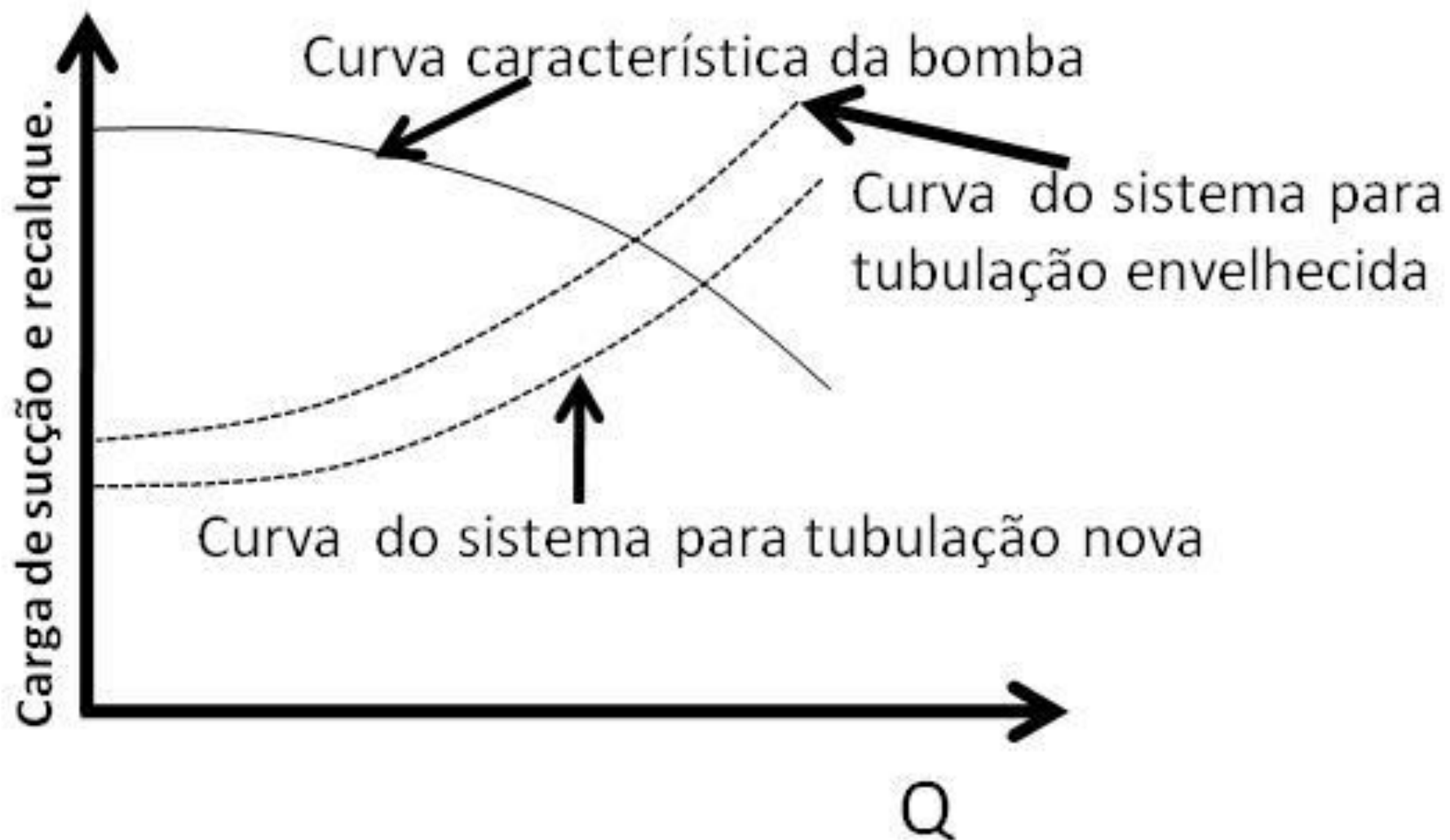
A capacidade e a pressão necessária de qualquer sistema, podem ser definidas com a ajuda de um gráfico chamado Curva do Sistema.

PONTO DE OPERAÇÃO DA BOMBA

Um sistema de bombeamento opera no ponto de interseção da curva da característica da bomba com a curva do sistema. A interseção das duas curvas define o ponto operacional de ambos, bomba e processo.

Porém, é impossível que um ponto operacional atenda todas as condições operacionais desejadas. Por exemplo, quando a válvula de descarga é estrangulada, a curva do sistema e o ponto operacional se deslocam para a esquerda.

CURVA DA BOMBA**CURVA DO SISTEMA**

CURVA DA BOMBA**CURVA DO SISTEMA
COM TUBULAÇÃO ENVELHECIDA**

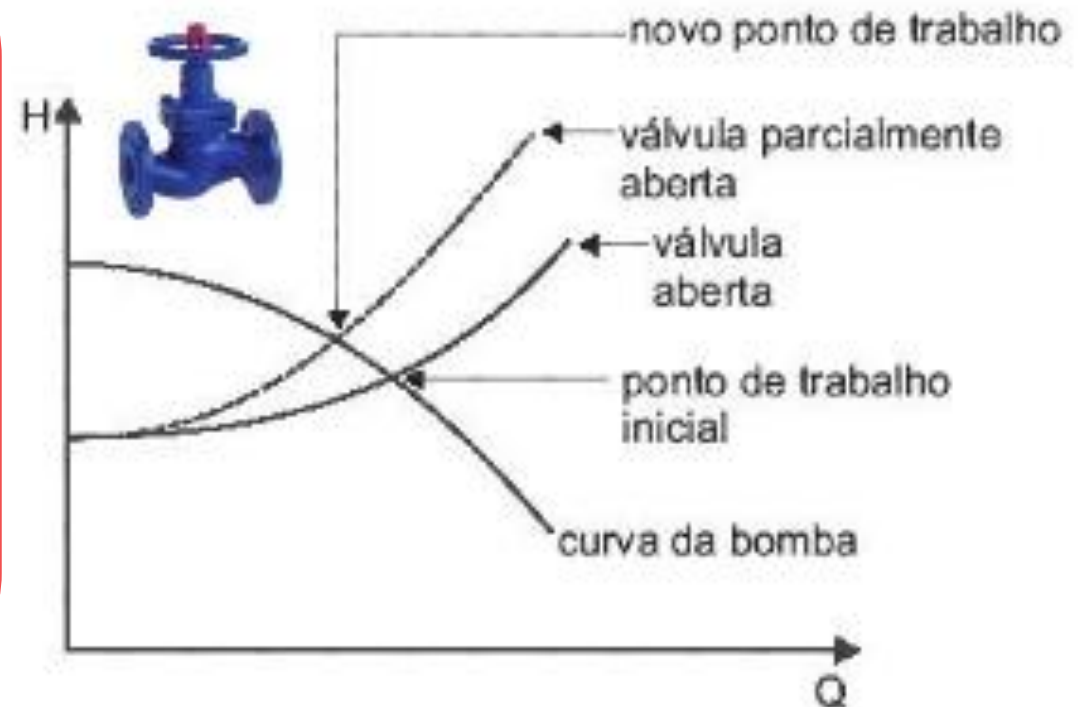
CONTROLE DE VAZÃO

Usando válvula de estrangulamento

No processo de controle da vazão, após a saída da bomba, inserimos uma válvula, cuja função é alterar a vazão pela redução do diâmetro, acarretando um aumento da perda de pressão, na curva do sistema. A rotação da bomba fica inalterada e a potência consumida aumenta para suprir o aumento de carga .

Fatores que alteram a CC do sistema:

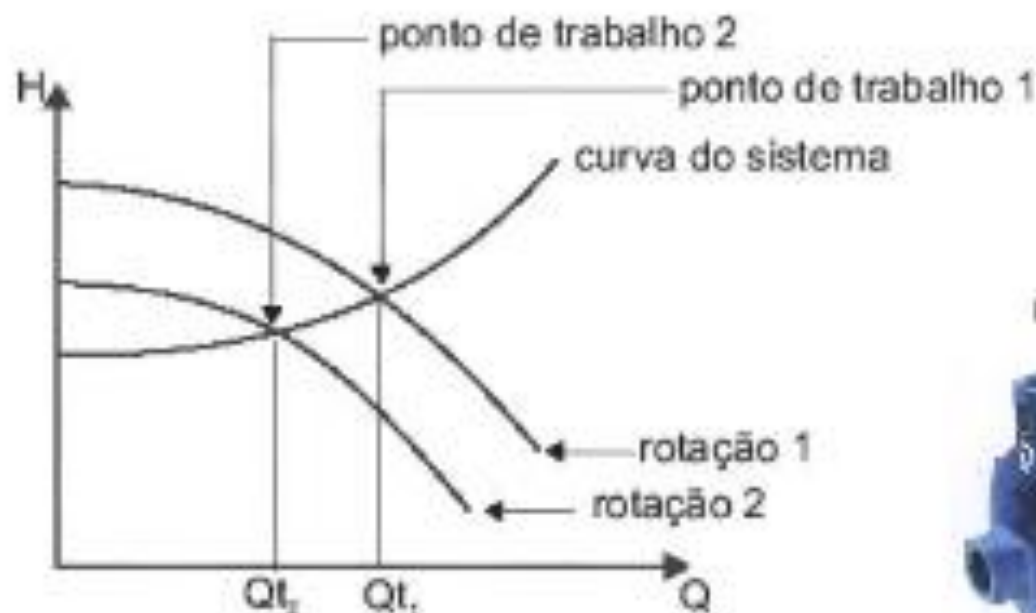
1. Natureza do líquido bombeado (ex. densidade);
2. Temperatura do líquido;
3. Variação da altura estática;
4. Pressão dos reservatórios de sucção e descarga;
5. Características ou alterações na tubulação ou acessório.



CONTROLE DE VAZÃO

Variando a rotação da bomba

A potência consumida pela bomba varia com o cubo da rotação, afetando o motor que aciona a bomba em seu rendimento. Quanto menor a rotação menor a potência no eixo da bomba e menor a potência de saída do motor. Uma redução de 10% na velocidade acarreta uma diminuição de 27% na potência consumida pela bomba. A vazão, diretamente proporcional à velocidade, tem a mesma redução percentual da velocidade, 10%.



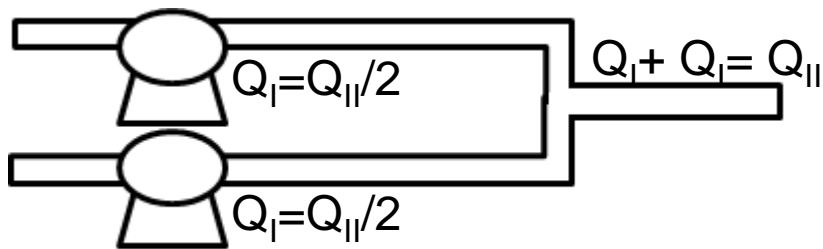
$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{N}{N_1} \right)^3$$

rotação 1 > rotação 2



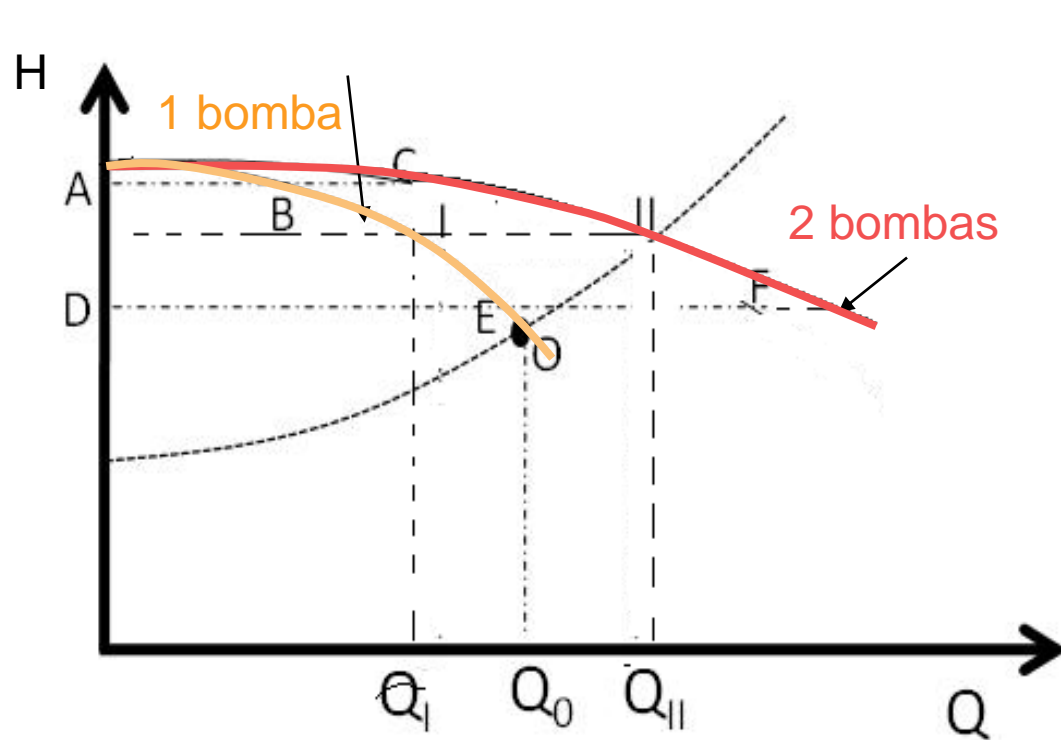
ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM PARALELO

Para uma mesma altura monométrica as vazões se somam.



Bomba Isolada: entra em equilíbrio com o sistema no ponto **O**, vazão Q_0

Bombas iguais associadas: equilíbrio é deslocado para o **ponto II**.



$$Q_{II} > Q_0$$

mas **nunca** o dobro



pois se aumenta a vazão, a perda de carga do sistema também fica maior.

Condições Normais: cada bomba opera em **QI** (considerar potência consumida e NPSHr para a curva individual no ponto **I**).

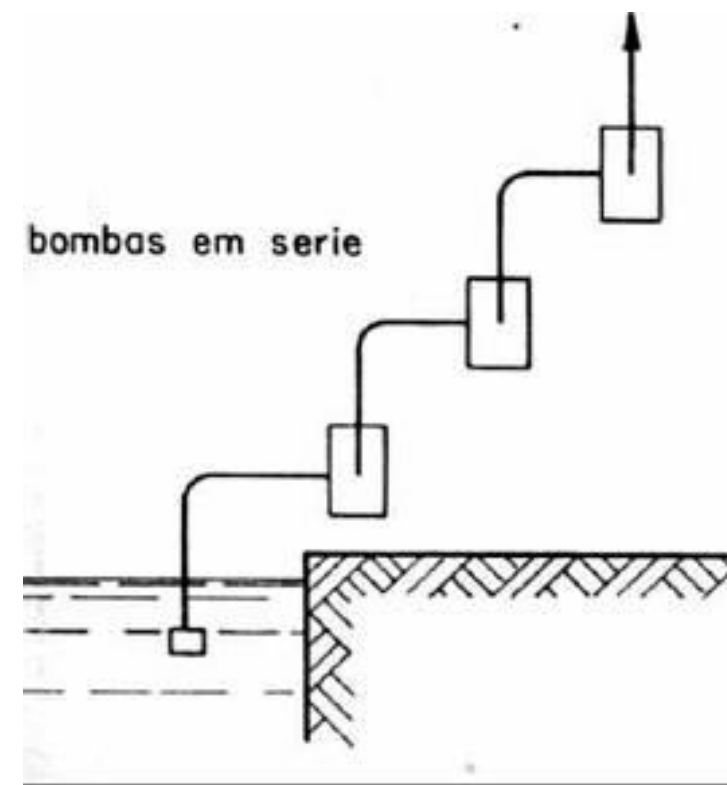
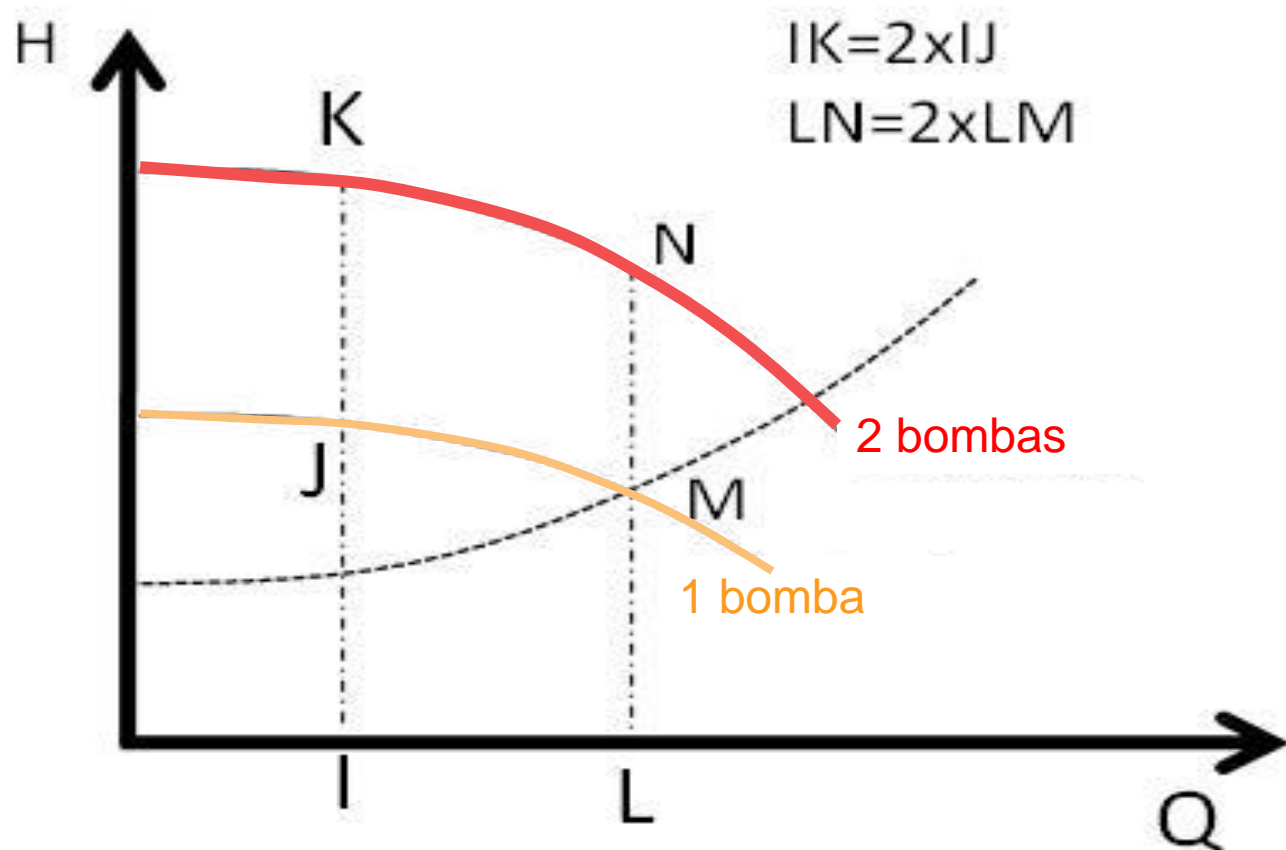
ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM PARALELO

- ❑ É comum em sistemas de abastecimento de água, esgotamento ou serviços industriais, principalmente com capacidades idênticas.
- ❑ É mais viável quando a vazão de projeto for muito elevada ou no caso em que a variação de vazão for perfeitamente predeterminada em função das necessidades de serviço.
- ❑ No primeiro caso (altas vazões), o emprego de bombas em paralelo permitirá a vantagem operacional de que havendo falha no funcionamento em uma das bombas, não acontecerá a interrupção completa e, sim, apenas uma redução da vazão bombeada pelo sistema. No caso de apenas uma bomba aconteceria a interrupção total, pelo menos temporária, no fornecimento.
- ❑ Na segunda situação (variação da vazão), a associação em paralelo possibilitará uma flexibilização operacional no sistema, pois como a vazão é variável, poderemos retirar ou colocar bombas em funcionamento em função das necessidades e sem prejuízo da vazão requerida.

ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS

EM SÉRIE

As vazões se mantêm e as alturas manométricas totais se somam.



ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS

EM SÉRIE

- ❑ Quando a altura manométrica for muito elevada, devemos analisar a possibilidade do emprego de bombas em série, pois esta solução poderá ser mais viável, tanto em termos técnicos como econômicos.
- ❑ Como principal precaução neste tipo de associação, devemos verificar se cada bomba a jusante tem capacidade de suporte das pressões de montante na entrada e de jusante no interior da sua própria carcaça.
- ❑ Para melhor operacionalidade do sistema é aconselhável a associação de bombas idênticas, pois este procedimento flexibiliza a manutenção e reposição de peças.

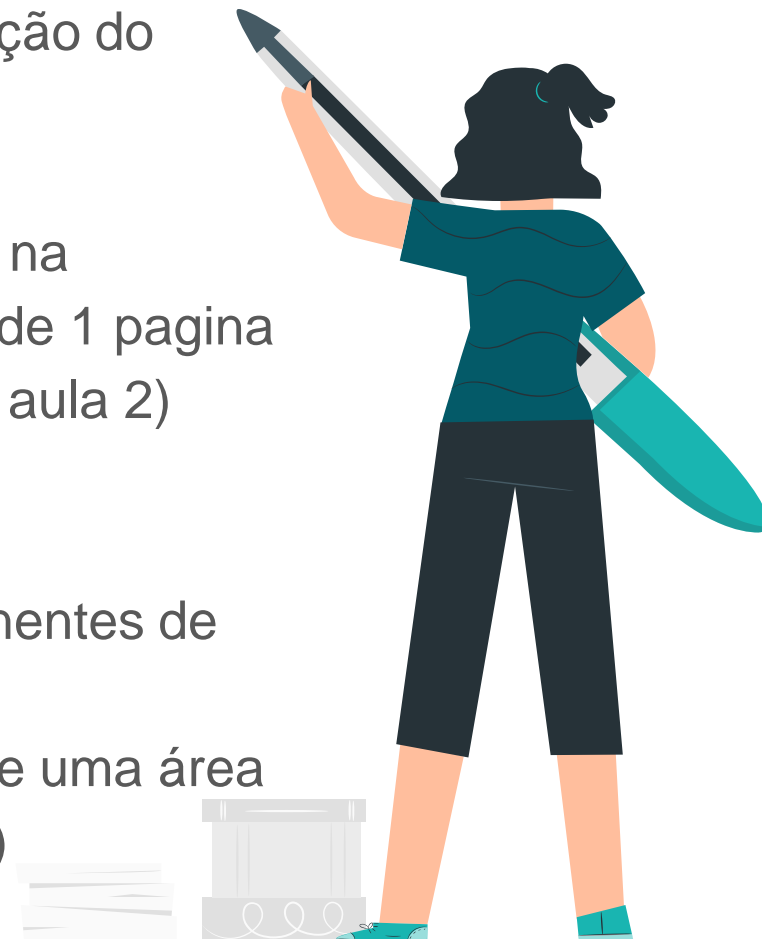
Atividades da Aula 2

Individual:

- ☐ Assista os vídeos indicados no Classroom, para complementação do aprendizado.
- ☐ Refaça os exercícios.
- ☐ Pesquise sobre cuidados para instalação, start-up e cuidados na operação de bombas centrífugas. Depois escreva um resumo de 1 pagina e poste na atividade aberta no Classroom (vale a presença na aula 2)

Atividade da Empresa:

- ☐ Adicionar na aba de vídeos do site, vídeos mostrando componentes de bombas centrífugas, cuidados de instalação e operacionais.
- ☐ Procurar catálogos de bombas centrífugas e postar no site (crie uma área de documentos, para que as pessoas possam fazer download)



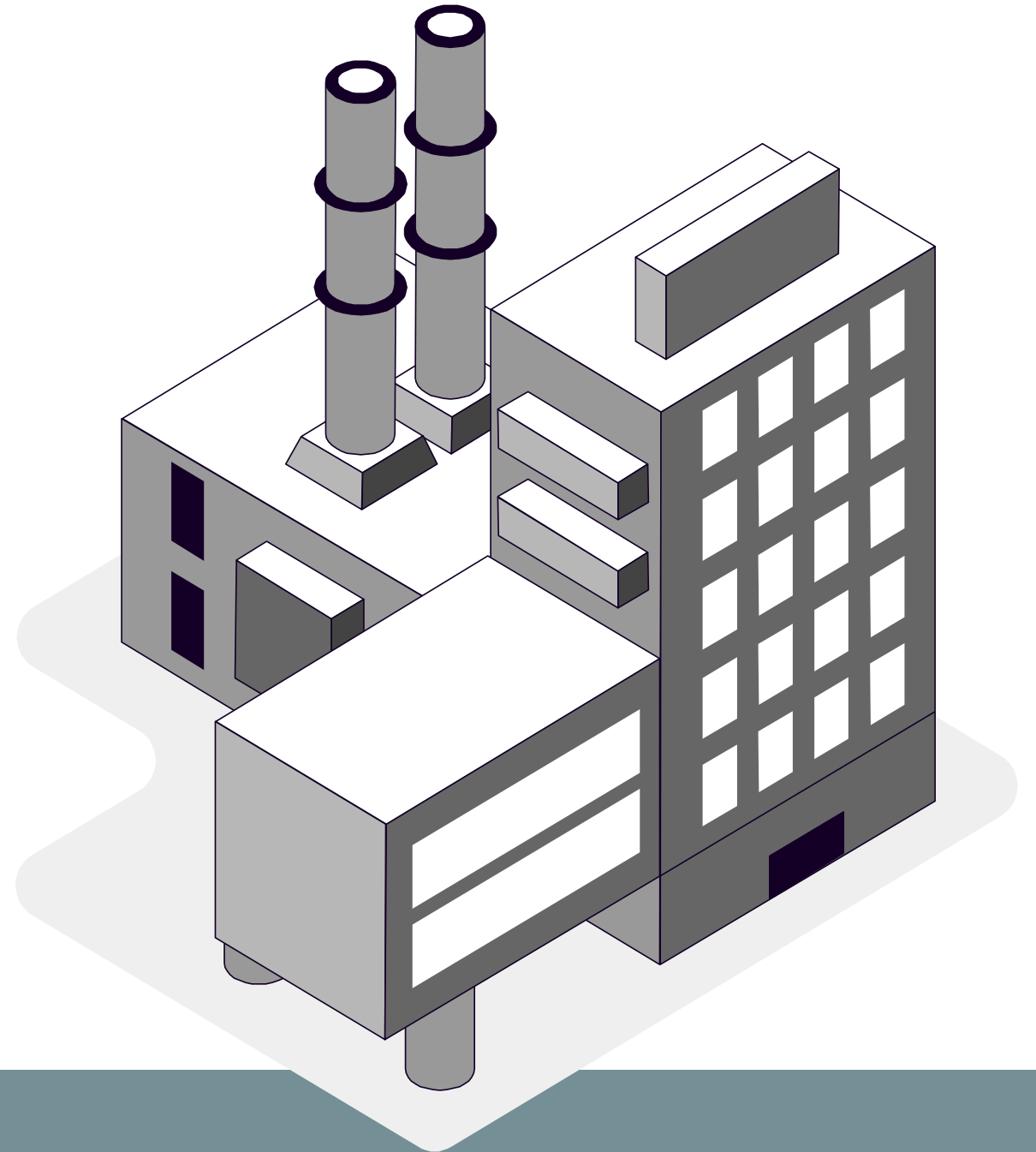
OPERAÇÕES UNITÁRIAS I

PROFª KASSIA G SANTOS

2020/1- CURSO REMOTO

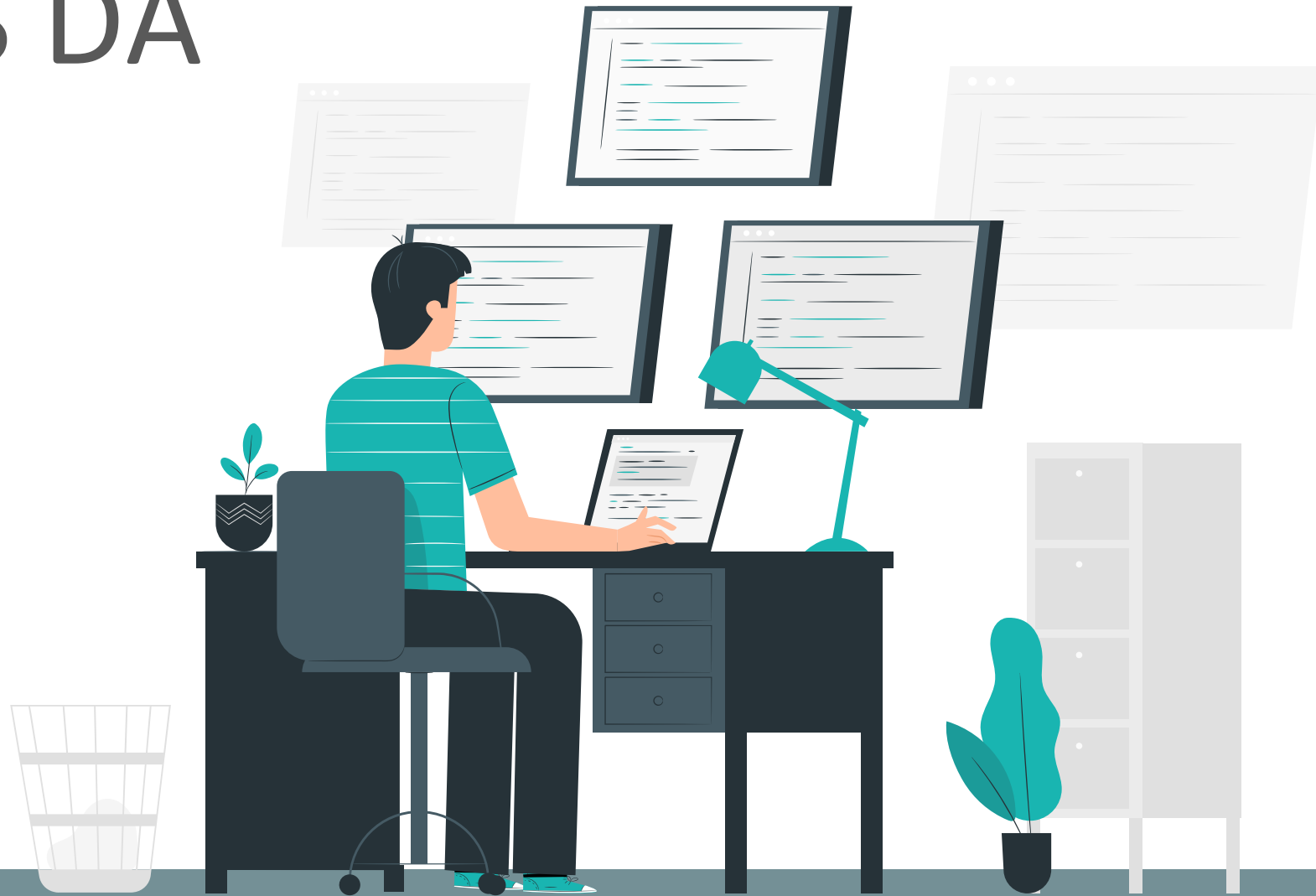
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

UFTM



EXERCÍCIOS DA AULA 2

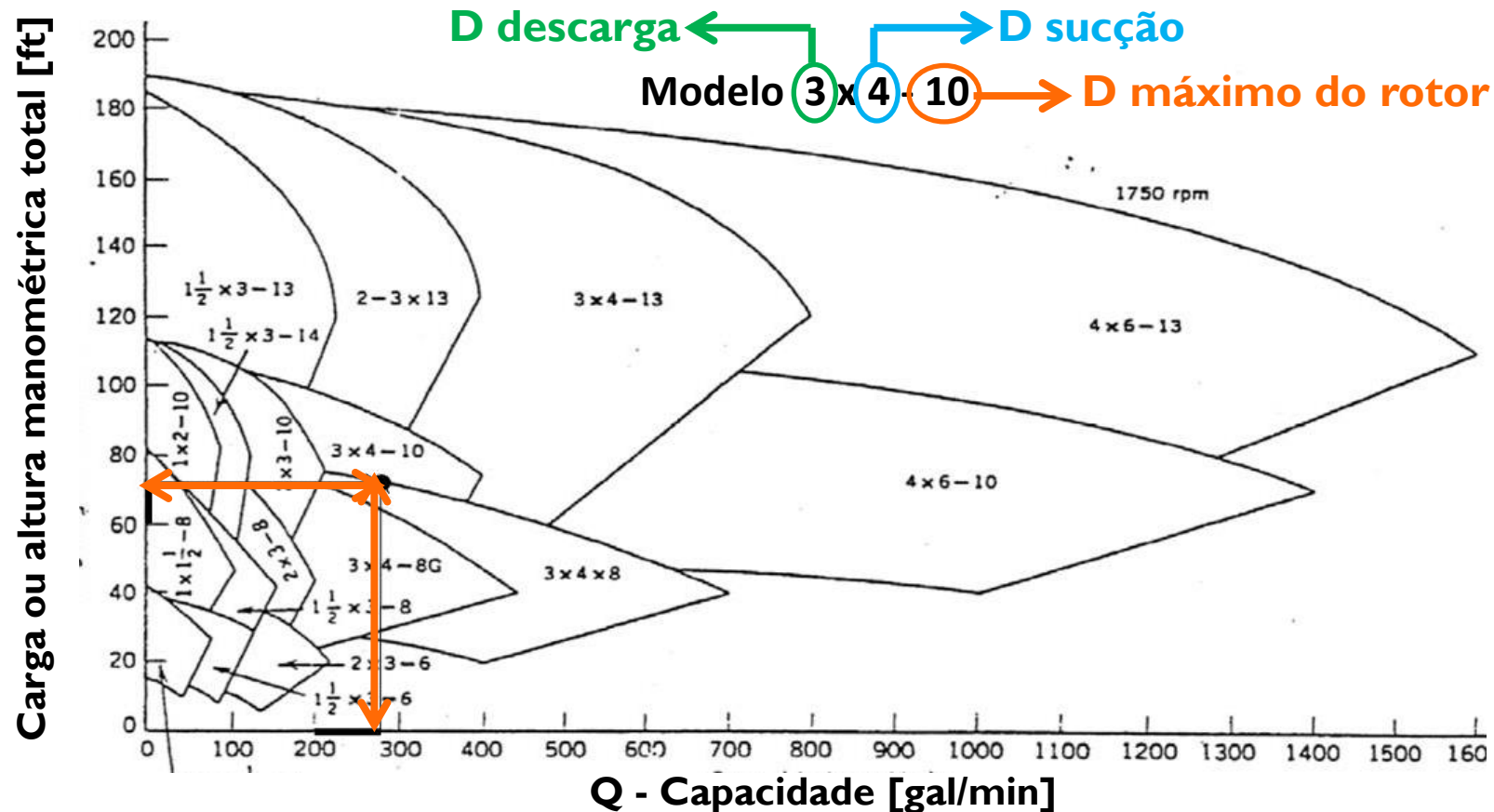
1.3. BOMBAS CENTRÍFUGAS



Projeto de Bombas Centrífugas

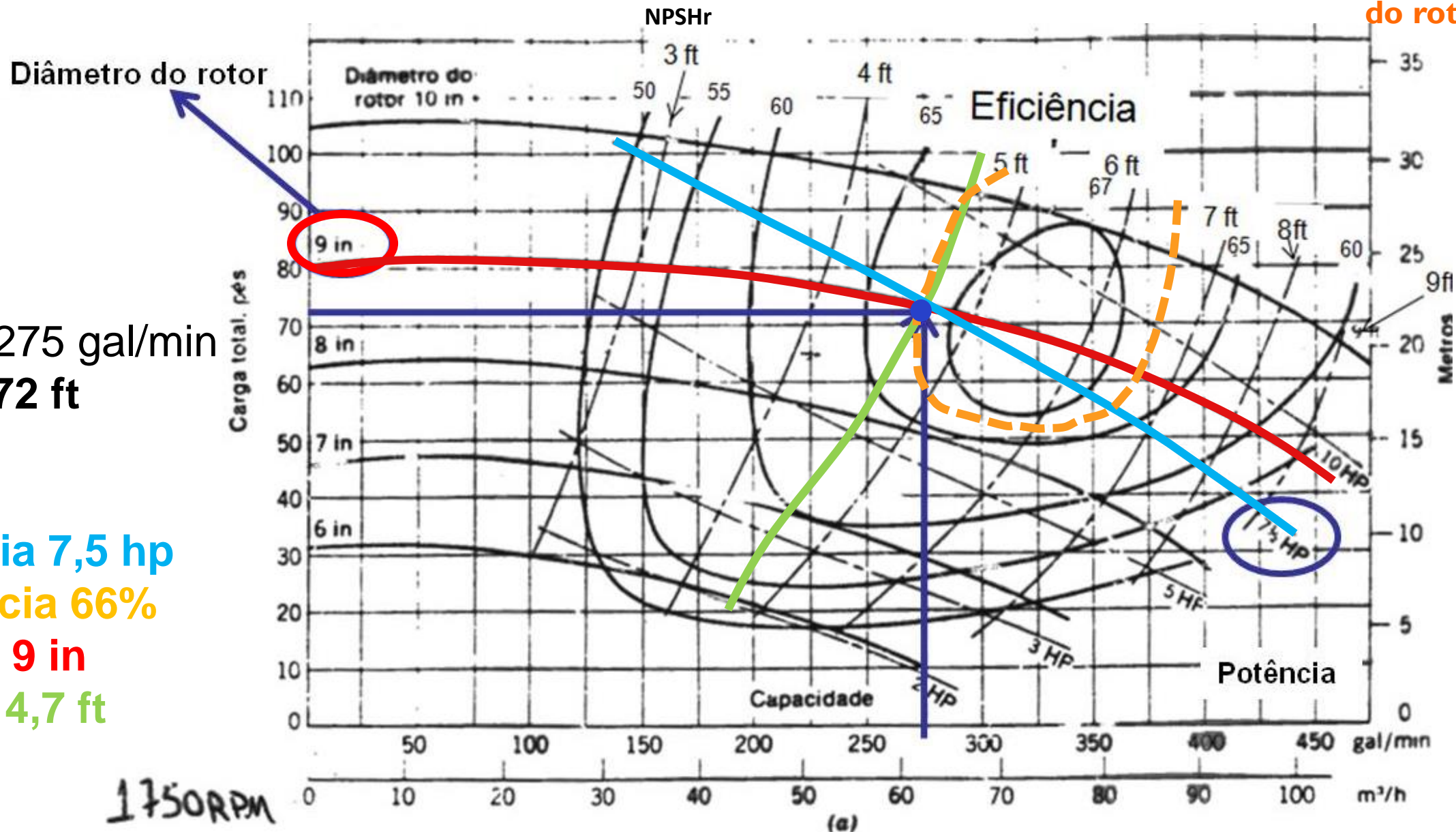
Ex 4: Bombeamento de um líquido, a uma vazão de 275 gal/min contra uma altura manométrica de 72 ft.

1º - Selecionar o Modelo da bomba no Catálogo



2º - Na curva do Modelo Selecionado - Especificação

D descarga ← D sucção
Modelo 3x4-10 → D máximo do rotor



Com
Vazão 275 gal/min
Carga 72 ft

Obter
Potência 7,5 hp
Eficiência 66%
D rotor 9 in
NPSHr 4,7 ft

Ex. 5

Necessita-se de uma bomba para operar nas seguintes condições de serviço: $Q = 300$ gal/min; Carga = 70ft; $NPSH_d = 7$ ft.

No almoxarifado existe uma bomba em estoque, sem uso, com os seguintes dados da placa:

- Modelo: 3x4-10
- Vazão: 175 gal/min
- D_{rotor} : 8 in
- Potência: 5 hp
- 1750 rpm

Esta bomba poderá ser usada nesta nova condição de serviço?

Ex. 5

DADOS:

Necessidade:

Q= 300 gal/min;

Carga= 70ft

NPSH_d=7ft

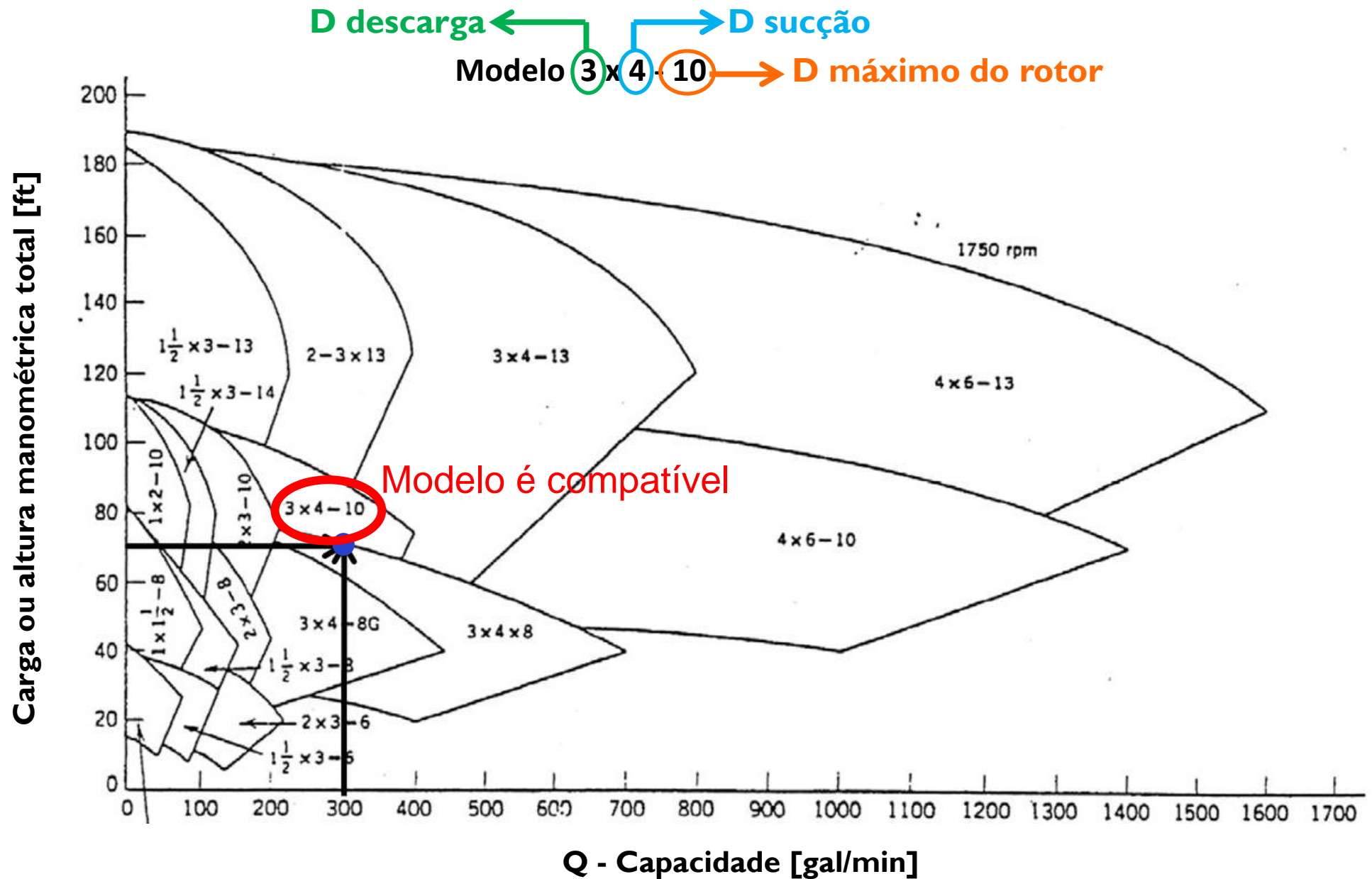
Bomba atual:

Modelo: 3x4-10

Q_b=175 gal/minD_{rotor}: 8 in

Potência: 5 hp

1750 rpm



Ex. 5

DADOS:

Necessidade:

$Q = 300 \text{ gal/min}$;

Carga = 70 ft

$\text{NPSH}_d = 7 \text{ ft}$

Bomba atual:

Modelo: 3x4-10

$Q_b = 175 \text{ gal/min}$

$D_{\text{rotor}} = 8 \text{ in}$

Potência: 5 hp

1750 rpm

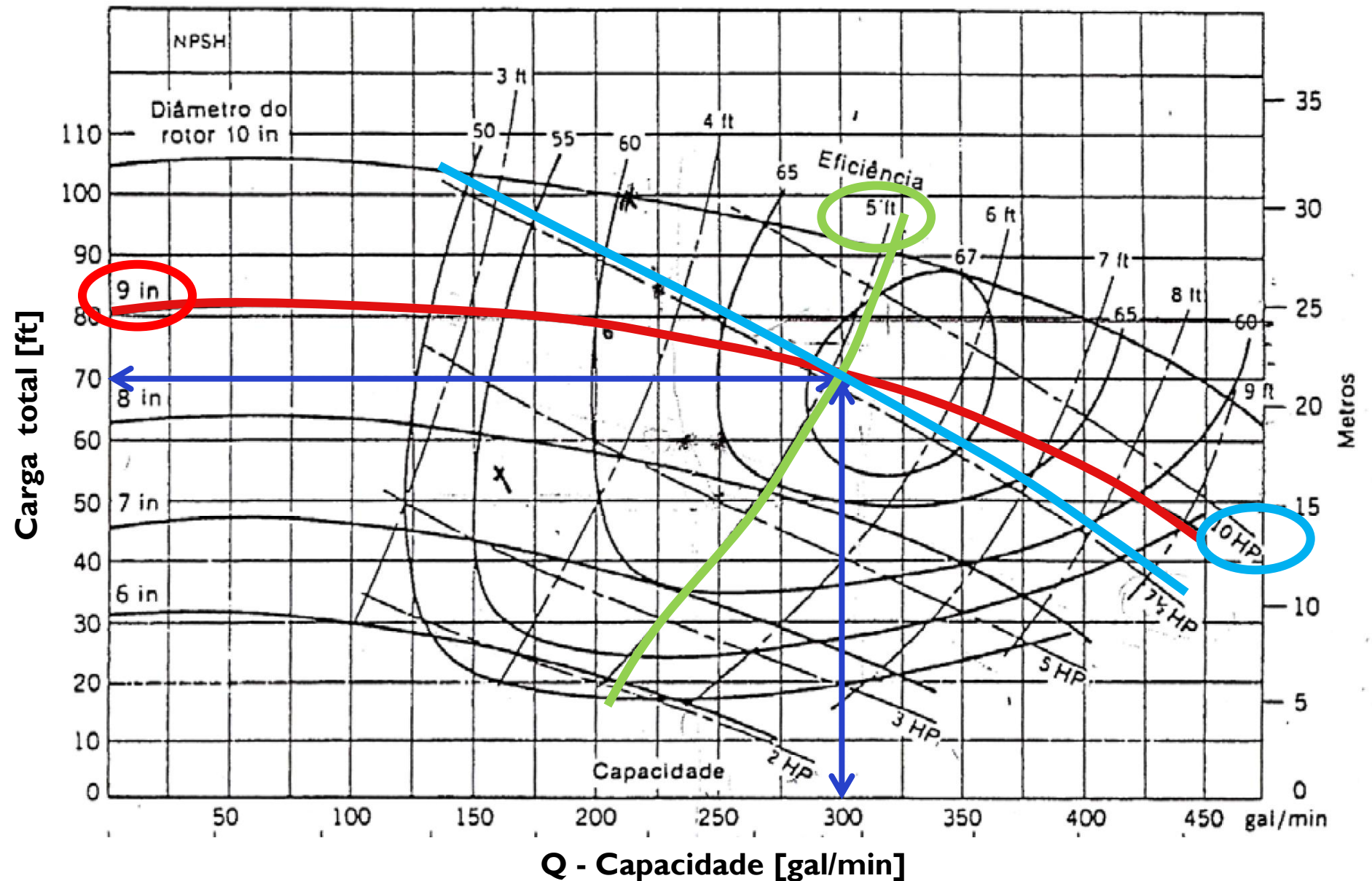
Precisa de:

Potência 10 hp

Eficiência 66%

D rotor 9 in

$\text{NPSH}_r = 5,1 \text{ ft}$



Para $Q = 300 \text{ gal/min}$ e carga de 70 ft, a bomba precisaria de um rotor de 9 in de diâmetro e um motor de 10 hp