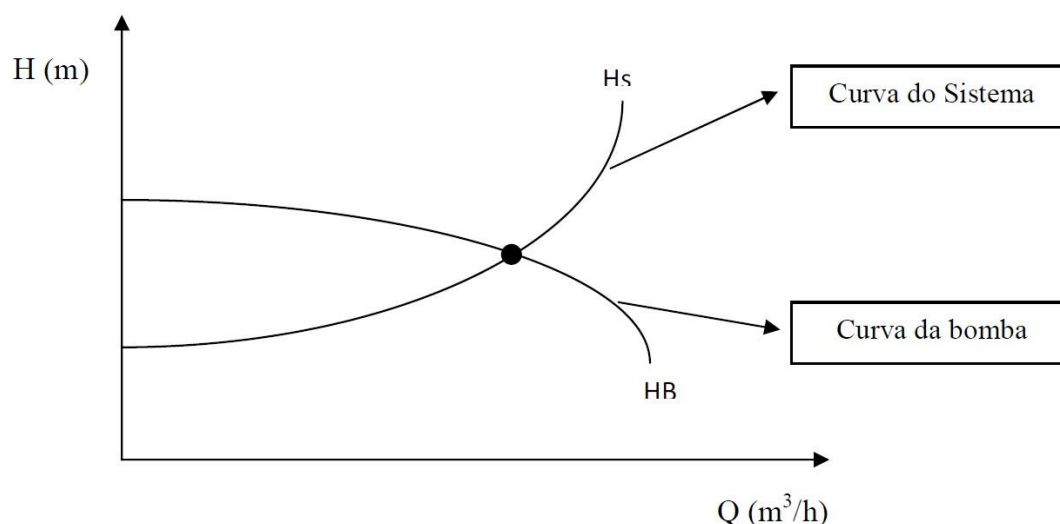


AULA PRÁTICA 02 - DETERMINAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA

Para determinação do ponto de operação de uma bomba centrífuga é necessário conhecer duas curvas:

- A **curva característica da bomba** $H \text{ (m)} \times Q \text{ (m}^3/\text{h)}$: pode ser disponibilizada pelo fabricante ou medida experimentalmente.
- A **curva do sistema**: calculada aplicando-se balanço da energia mecânica em pontos estratégicos do sistema.

Figura 1: Representação das curvas características do sistema e da bomba.



Revisão da Teoria - Balanço de Energia Mecânica

A energia mecânica em qualquer ponto em uma tubulação consiste no somatório de três parcelas: a pressão, energia cinética e energia potencial, como apresentado na equação 1.

$$E_i = \frac{P_i}{\rho} + \frac{v_i^2}{2} + g \cdot z_i \quad [\text{J/Kg}] \quad (1)$$

Para líquidos é comum exprimir a equação 1 em unidades de energia por unidade de peso de fluido, a soma resultante é conhecida como carga e possui unidade de comprimento (m).

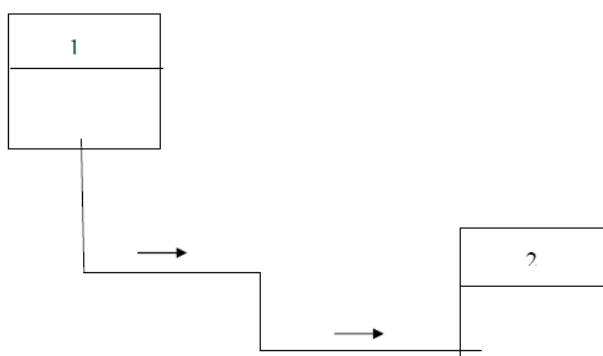
$$E_i = \frac{P_i}{\rho \cdot g} + \frac{v_i^2}{2 \cdot g} + z_i \quad [\text{m}] \quad (2)$$

A multiplicação da densidade do fluido pela aceleração da gravidade é conhecida como peso específico (γ).

$$E_i = \frac{P_i}{\gamma} + \frac{v_i^2}{2 \cdot g} + z_i \quad [\text{m}] \quad (3)$$

Quando se avalia dois pontos distintos em um sistema sem que exista trabalho útil entre eles (bombas, ventiladores, etc) o escoamento do fluido sempre se dará do ponto de maior energia para o ponto de menor energia, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Sistema com fluido escoando por gravidade.



Analisando a Figura 2 pode-se notar que a energia no ponto 1 (energia potencial) é maior que a energia no ponto 2.

No caso de um sistema de tubulações com uma bomba entre os dois pontos do sistema, como o observado na Figura 3, a análise pode ser feita da seguinte forma:

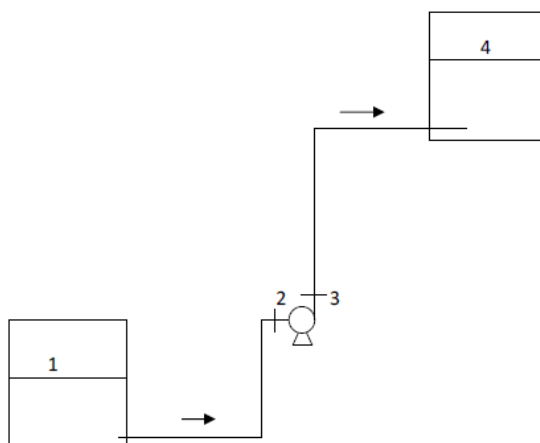
Analisando os pontos 2 e 4, pode-se concluir que a energia potencial em 2 é maior que a energia potencial em 1 e a energia potencial no ponto 4 é maior que no ponto 3, entretanto as energias de pressão (P_i/γ) não são.

O funcionamento de uma bomba centrífuga se dá através da conversão de energia cinética resultante do movimento do rotor da bomba em energia de pressão. As pás do rotor ao girarem produzem uma redução da pressão na entrada da bomba (centro do rotor). Isto ocorre devido à ação da força centrífuga, que faz com que o líquido se desloque em direção à periferia do rotor. Isto obriga o líquido a escoar do cano de sucção (entrada) para dentro do rotor. A zona de alta pressão ocorre na periferia do rotor. O líquido que chega às extremidades do rotor, sob a ação centrífuga,



encontra um aumento progressivo na área do escoamento (difusor), o que provoca uma transformação de energia cinética em pressão. Desta forma, existe uma zona de baixa pressão localizada na entrada da bomba, e uma região de alta pressão localizada na descarga.

Figura 3: Sistema de bombeamento.



A variação das energias de pressão, cinética e potencial entre dois pontos de um sistema é resultante das perdas de carga (em unidades de carga). No caso do sistema apresentado na Figura 3 teríamos:

$$E_1 - E_2 = lw_{1-2} \quad (4)$$

$$E_3 - E_4 = lw_{3-4} \quad (5)$$

Para que o fluido se movimente, a bomba deve fornecer trabalho. Esse trabalho é dado por:

$$H = E_3 - E_2 \quad (6)$$

Para o sistema todo, dos pontos 1 a 4, somando as equações de 4 a 6, tem-se:

$$H = E_4 - E_1 + lw_{1-2} + lw_{3-4} \quad (7)$$

$$H = \frac{\Delta P}{\gamma} + \frac{\Delta v^2}{2g} + \Delta z + lw_{1-2} + lw_{3-4} \quad (8)$$

Cálculo das perdas de carga

São dois os tipos de perdas de carga: as perdas de carga distribuídas que ocorrem devido à turbulência e ao atrito do fluido com as paredes da tubulação, e as localizadas que ocorrem devido às mudanças de direção ou da velocidade do escoamento. As perdas de carga localizadas ocorrem nos acessórios do sistema (cotovelos, válvulas, reduções etc.).

As perdas de carga total do sistema podem ser calculadas através da equação de Darcy-Weisbach apresentada na equação 9.

$$lw = f \frac{(L + \Sigma L_{eq}) \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D} \quad (9)$$

em que: f – fator de atrito

L – comprimento da tubulação

ΣL_{eq} – soma dos comprimentos equivalentes dos acessórios da tubulação

D – diâmetro interno da tubulação.

Os comprimentos equivalentes são comprimentos de tubos de um dado material que provocam uma perda de carga distribuída com o mesmo valor de perda de carga localizada no acessório.

O valor do fator de atrito (f) pode ser calculado pelas seguintes relações:

Regime laminar ($Re < 2100$):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

Regime turbulento ($Re \geq 4100$):

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (11)$$

As perdas de carga localizadas (nos acessórios) também podem ser calculadas pela expressão geral:

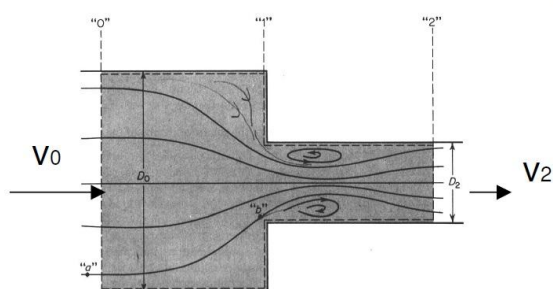
$$lw_{ac} = K \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$



Contrações e expansões

Parte da energia potencial se dissipa nos turbilhões formados na expansão ou na contração. Deve-se levar em consideração os diâmetros envolvidos e a velocidade do tubo de menor diâmetro. O valor de k_f calcula-se com expressões semi-empíricas.

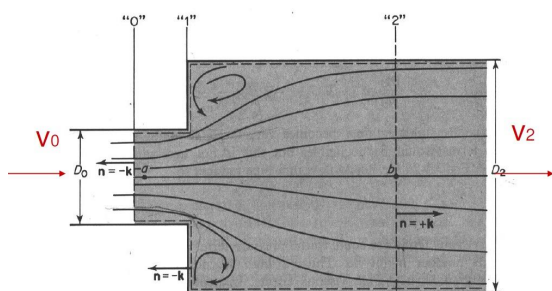
Contração súbita



$$k_f = 0,5 \left(1 - \frac{D_2^2}{D_0^2} \right)$$

D_0 = diâmetro do tubo de entrada
 D_2 = diâmetro do tubo de saída

Expansão súbita



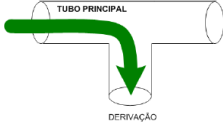
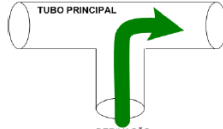
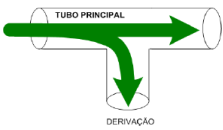
$$k_f = \left(1 - \frac{D_0^2}{D_2^2} \right)^2$$

D_0 = diâmetro do tubo de entrada
 D_2 = diâmetro do tubo de saída

Tipo de saída		k_f	Tipo de saída		k_f
Reentrante		0,78	Bordas arredondadas		0,23
Bordas retas		0,5	Perfil fluidodinâmico		0,05

Fonte: Adaptado de Foust, 1982.

	UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” INSTITUTO DE QUÍMICA – ARARAQUARA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA, FÍSICA E MATEMÁTICA ENGENHARIA QUÍMICA OPERAÇÕES UNITÁRIAS I	
---	---	---

Tê (padrão)		k_f
usada ao longo do tubo principal, com derivação fechada		0,40
usada como joelho, entrada no tubo principal		1,00
usada como joelho, entrada na derivação		1,00
Escoamento em derivação		1,00
Luva		0,04
União		0,04

Fonte: Adaptado de Foust, 1982.

Curva do Sistema

Para construção da curva do sistema ($H \times Q$) é necessário escrever a equação 8 em termos de vazão. A equação da continuidade relaciona a velocidade do escoamento com a vazão, no regime permanente, da seguinte forma:

$$Q = v_i \cdot S_i \quad (13)$$

em que: v_i é a velocidade no ponto analisado,

S_i é a área da seção de escoamento, para tubos cilíndricos $S_i = \pi \cdot D^2/4$

Q é a vazão volumétrica.

Substituindo a velocidade por (Q/S_i) na equação da perda de carga, equação 9, tem-se:

$$lw = \left(\frac{8.f}{g.\pi^2} \cdot \frac{(L+\Sigma L_{eq})}{D^5} \right) \cdot Q^2 \quad (14)$$

Substituindo valores na equação 7 para obtenção da **curva do sistema** tem-se:

$$H_s = \left(\frac{P_4 - P_1}{\gamma} \right) + (z_4 + z_1) + \frac{8}{g.\pi^2} \left[\left(\frac{1}{D_{32}^4} - \frac{1}{D_{12}^4} \right) + \left(f_{12} \frac{L_{12} + \Sigma L_{eq_{12}}}{D_{12}^5} \right) + \left(f_{34} \frac{L_{34} + \Sigma L_{eq_{34}}}{D_{34}^5} \right) \right] \quad (15)$$

Ponto de operação

O projeto de um sistema de bombeamento segue mais ou menos os seguintes passos:

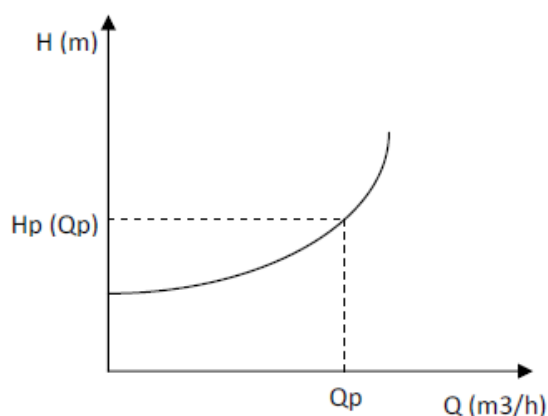
1- A indústria deseja movimentar um fluido de um ponto 1 para um ponto 4.

2- A vazão desejada é a vazão de projeto (Q_p)

3- O *engenheiro de projeto* escolhe o layout do processo: material da tubulação, caminho que ela percorrerá entre os pontos 1 e 4, acessórios e posicionamento da bomba.

4- Com isso ele conhece a curva do sistema $H_s(Q)$ e, portanto, o valor de $H_s(Q_p)$.

Figura 4: Curva do sistema.

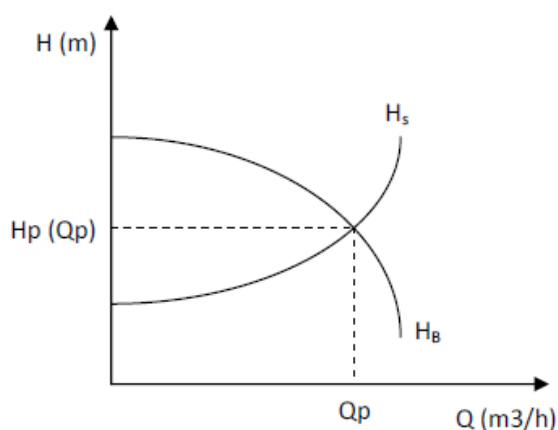


5- Pesquisa nos manuais dos fabricantes de curvas de bombas centrífugas, que forneçam valores de alturas manométricas totais H_B em função das vazões. Escolhe a bomba que seja mais adequada para o escoamento.



6- Isso permite encontrar o ponto de *operação de projeto*, em que $H_S = H_B$

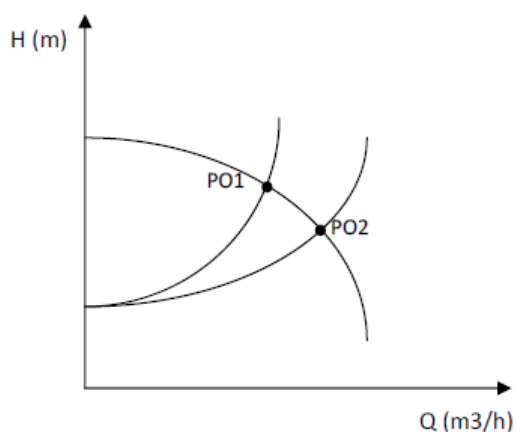
Figura 5: Curva do sistema e da bomba - Ponto de operação da bomba.



7- Até este ponto foram cálculos teóricos baseados em escolhas arbitrárias de comprimentos equivalentes, rugosidade, valores encontrados na literatura. Esses valores além de apresentarem discrepâncias, dependendo da fonte, são valores médios, assim como a curva do fabricante da bomba. Após isso, o sistema de bombeamento é instalado e se obtém a vazão de processo Q_{op} , que será próxima, mas não necessariamente igual à de projeto.

8- Para fazer a vazão de processo alcançar o valor do projeto o *engenheiro de processo* poderá mexer nos comprimentos equivalentes (através de válvulas), de tal forma que a vazão de processo alcance o valor de projeto.

Figura 6: Alteração do ponto de operação da bomba centrífuga.

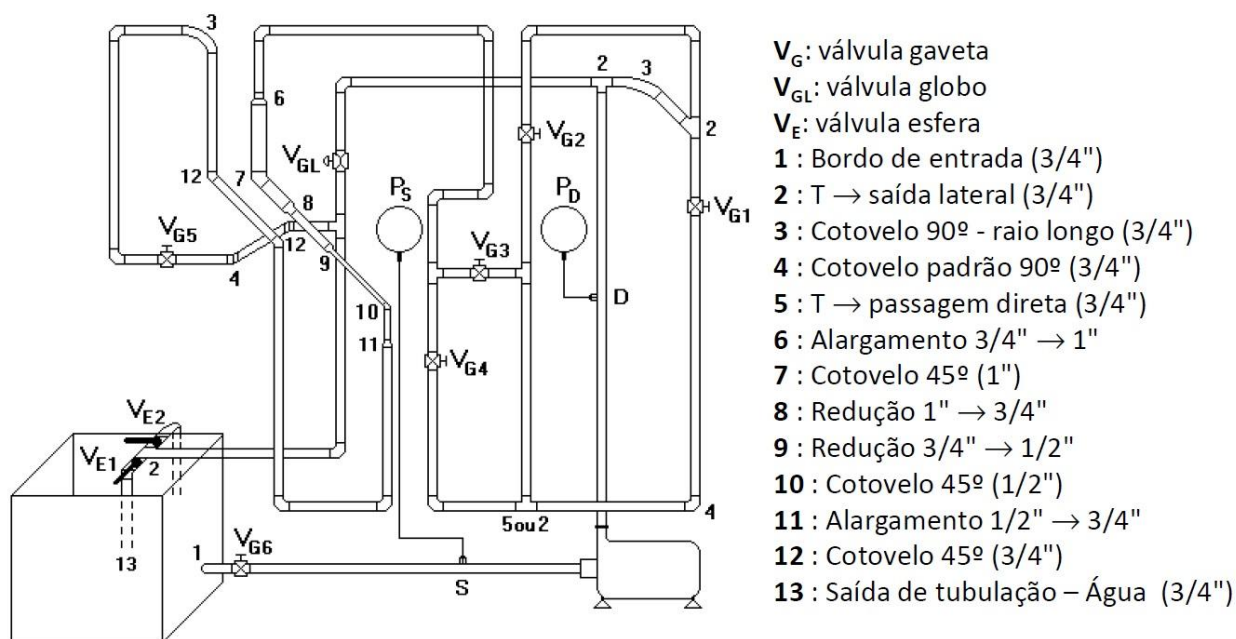




Descrição do Equipamento

A Figura 7 é um esquema do equipamento utilizado para determinação do ponto de operação de uma bomba centrífuga.

Figura 7: Esquema do equipamento.



Procedimento Experimental

Um circuito com diferentes sistemas de tubulações será fornecido para cada grupo.

Sistema 1: V_{G1} e V_{G3} : abertas; V_{G2} e V_{G4} : fechadas;

Sistema 2: V_{G1} e V_{G4} : abertas; V_{G2} e V_{G3} : fechadas;

Sistema 3: V_{G2} e V_{G3} : abertas; V_{G1} e V_{G4} : fechadas;

Sistema 4: V_{G2} e V_{G4} : abertas; V_{G1} e V_{G3} : fechadas;

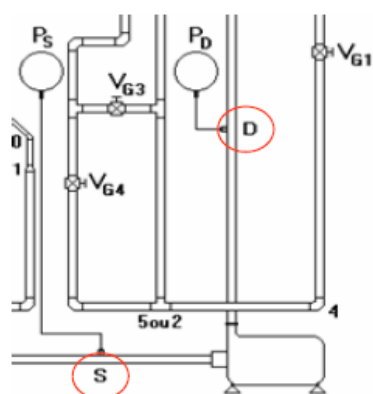


OPERAÇÕES UNITÁRIAS I

O grupo deverá calcular a vazão de projeto do seu circuito e comparar com a vazão de processo (obtida experimentalmente). Desta forma, este experimento se divide nas seguintes etapas:

Obtenção da curva característica da bomba

Aplicação da Equação de Balanço de Energia Mecânica entre os pontos de sucção (S) e de descarga (D) da bomba, em unidades de altura (m):



$$\frac{1}{2g} \cdot (v_D^2 - v_S^2) + y_D - y_S + \frac{p_D - p_S}{\rho \cdot g} + H_L = H_{MT}$$

entre S e D:

$$y_S \approx y_D$$

$$v_S = v_D$$

$$H_L = 0$$

Então, a **altura da bomba H_{MT}** (em m) é determinada por:

$$H_{MT} = \frac{p_D - p_S}{\rho \cdot g}$$

A curva é obtida, então, levantando-se dados da pressão desenvolvida pela bomba, Δp , para várias vazões volumétricas (Q ou $\dot{V}$) e construindo-se o gráfico de **H_{MT} (m) versus Q (m^3/s)**.

Dados experimentais:

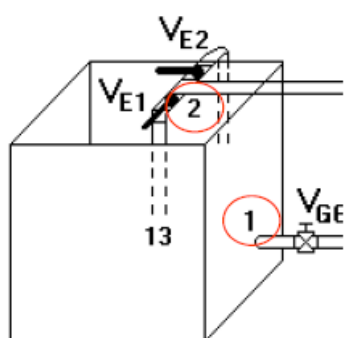
Construir tabela de dados de vazão e altura manométrica fornecidos pela bomba para obtenção da equação da curva da bomba.

Obtenção da curva do Sistema



OPERAÇÕES UNITÁRIAS I

Aplicação da Eq. de Balanço de Energia Mecânica entre os pontos (1) e (2), para uma determinada configuração do sistema, em unidades de altura (m):



$$\frac{1}{2g} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + (y_2 - y_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + H_L = H_{MT}$$

entre 1 e 2:

$$y_1 \approx y_2$$

$$v_1 = v_2$$

$$p_1 = p_2$$

Então, a **altura manométrica total** (energia requerida pelo sistema) é determinada por:

$$H_L = H_{MT}$$

A curva é obtida, então, simulando-se dados de perda H_L para várias vazões volumétricas (Q ou $\dot{V}$), ou seja, para várias velocidades v (em m/s), e construindo-se o gráfico de **H_{MT} (m) versus Q (m^3/s)**.

IMPORTANTE: Medir, com auxílio de uma trena, as tubulações retas do circuito de tubulações montado no laboratório, além disso, contabilizar todos os acidentes existentes no sistema. Anotar as especificações de cada tubulação e de cada acidente.

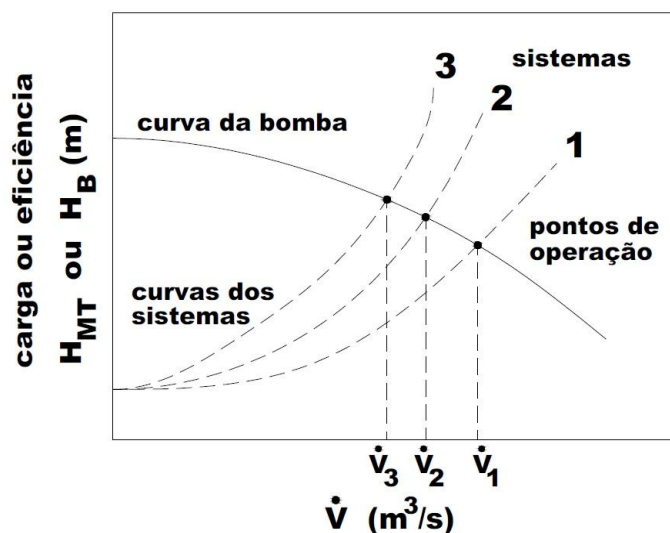
Medida da vazão de processo

Realizar as seguintes medidas:

- temperatura da água durante a operação;
- massa do balde utilizado para medir a vazão;
- medidas do tempo e da massa (balde + água);



Exemplo de um gráfico de altura da bomba (ou altura manométrica total) versus vazão volumétrica, para vários sistemas.



Apresentação dos Resultados

Incluir todos os dados medidos em laboratório e as informações retiradas da literatura, com suas respectivas referências.

Apresentar as equações, memorial de cálculos e resultados de cálculos na forma de gráficos e tabelas.

Discutir os resultados e apresentar uma conclusão sucinta.

Referências Bibliográficas

FOUST, A. S. et.al. (1982). "Princípios das Operações Unitárias" – Ed LTC, Rio de Janeiro – RJ, 2ª edição.

SILVA, R. G. da. Transporte de fluidos. São Carlos : EdUFSCar, 2010. 147 p. (Coleção UAB-UFSCar). Disponível em: [Coleção UAB-UFSCar Transporte de fluidos](#). Acesso: 06 out. 2020.