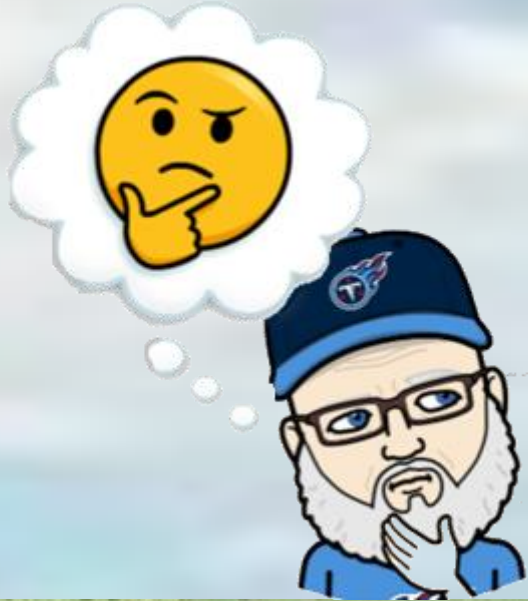
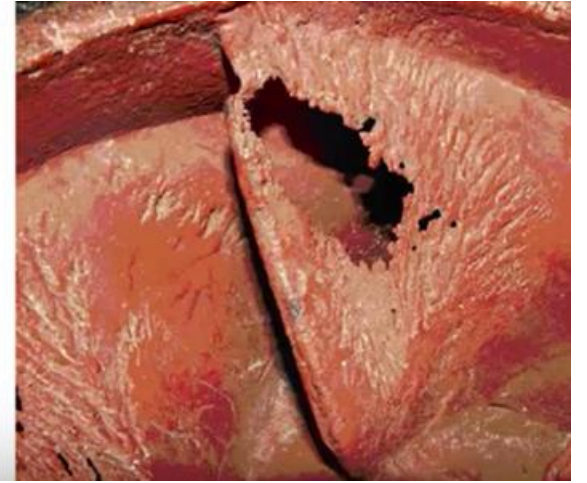


A mudança começa em nós!

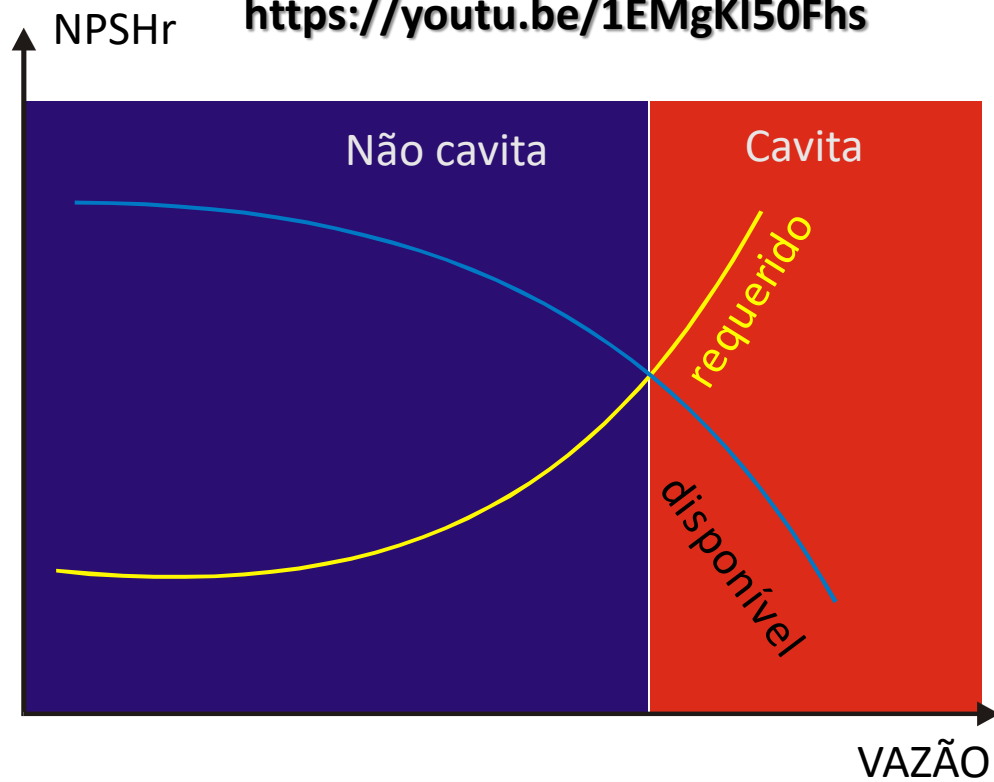


Através de uma formação responsável e sustentável, acabamos com a poluição e preservamos nosso planeta!





<https://youtu.be/1EMgKI50Fhs>



<https://youtu.be/CPn1q-ptzvQ>

CAVITAÇÃO



A figura a seguir foi extraída da dissertação apresentada por Welington Ricardo Coelho para obtenção do título de mestre em engenharia mecânica junto a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho no capítulo de revisão bibliográfica página 7.

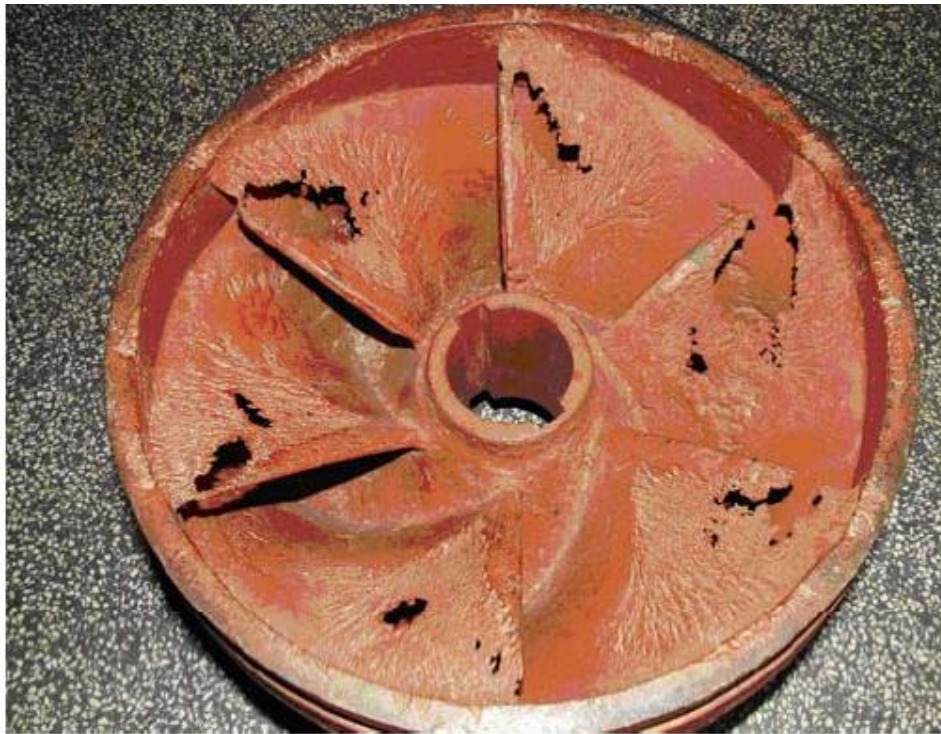


Figura 1.3 – Rotor de bomba centrífuga danificado pela cavitação.



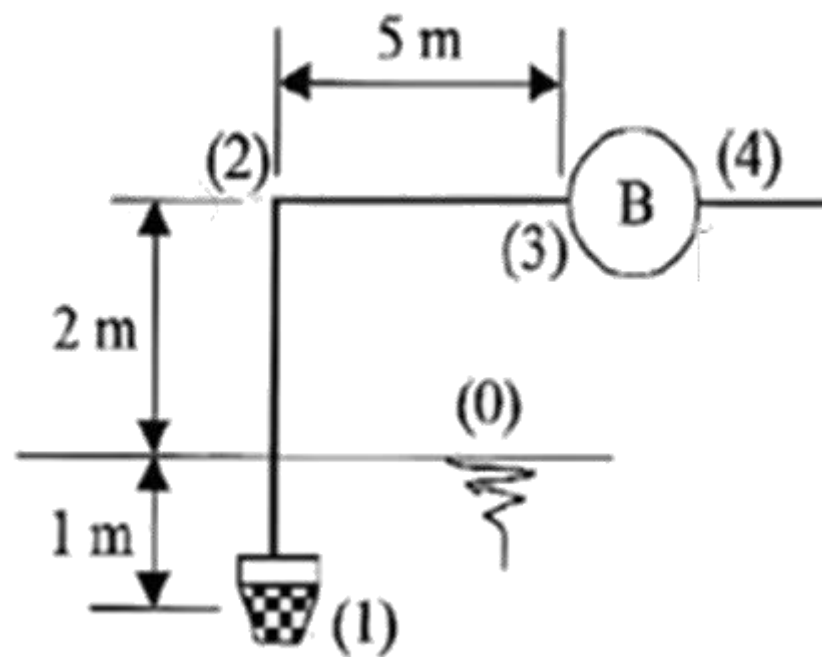
CAVITAR É TER A VAPORIZAÇÃO DEVIDO A UMA QUEDA DE PRESSÃO, E EM SEGUIDA, A CONDENSAÇÃO DEVIDO A UM AUMENTO DA PRESSÃO, AMBAS EM UM PROCESSO ISOTÉRMICO, ONDE A TEMPERATURA É A TEMPERATURA DE ESCOAMENTO DO FLUIDO CONSIDERADO.



Vamos compreender este conceito calculando a pressão na entrada de uma bomba, a qual foi instalada acima do nível de captação.



A figura a seguir mostra a tubulação antes da bomba de uma instalação que transporta água a 25°C . Sabe-se que a tubulação é de aço com diâmetro nominal de 4", onde (1) é uma válvula de poço da Mipel; (2) um cotovelo fêmea de 90° da Tupy; (3) entrada da bomba e (4) a saída da bomba





Água a
25°C:

$$\rho_{\text{água}} = 997,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$p_{\text{vapor}} = 0,03166 \text{ bar(abs)}$$

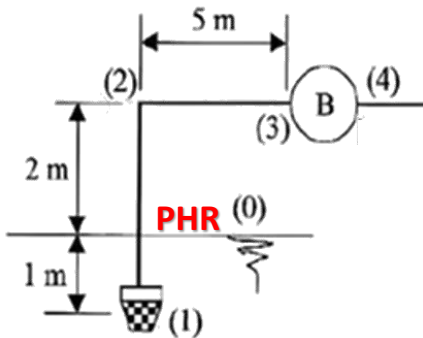
Valores obtidos
no manual de
treinamento da
KSB



Considerando o
escoamento em
regime permanente,
incompressível e na
escala efetiva,
aplicamos a equação
da energia de (0) a (3):



Ainda adotamos
o PHR em (0)



$$H_0 = H_e + H_{p_{ab}} \rightarrow z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} = z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{\alpha_e v_e^2}{2g} + H_{p_{ab}}$$

Considerando o escoamento turbulento, temos $\alpha_e \cong 1,0$

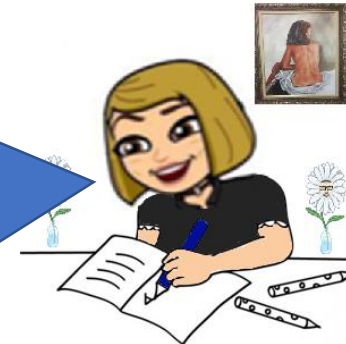
$$0 + 0 + 0 = z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{1 \times v_e^2}{2g} + f_{ab} \times \frac{(L + \sum Leq)_{ab}}{D_{H_{ab}}} \times \frac{v^2}{2g}$$

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g \times A^2} \therefore 0 = z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{Q^2}{2g \times A^2} + f_{ab} \times \frac{(L + \sum Leq)_{ab}}{D_{H_{ab}}} \times \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

$$0 = z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{Q^2}{2g \times A^2} + f_{aB} \times \frac{(L + \sum Leq)_{aB}}{D_{H_{aB}}} \times \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

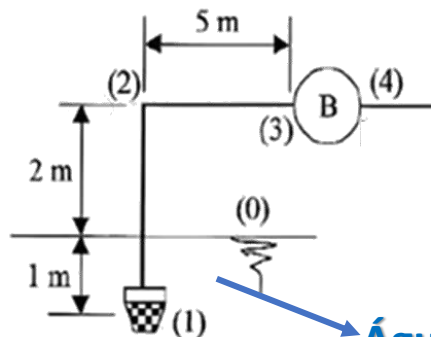
$$p_e = -\gamma \times \left\{ z_e + \left[1 + f_{aB} \times \frac{(L + \sum Leq)_{aB}}{D_{H_{aB}}} \right] \times \frac{1}{2g \times A^2} \right\} \times Q^2$$

Pressão na entrada da bomba menor que a pressão atmosférica, o que é coerente, pois para trazer a água para a bomba a mesma tem que criar uma sucção, ou seja, uma pressão menor que a atmosférica, que “empurra” a água até a bomba!

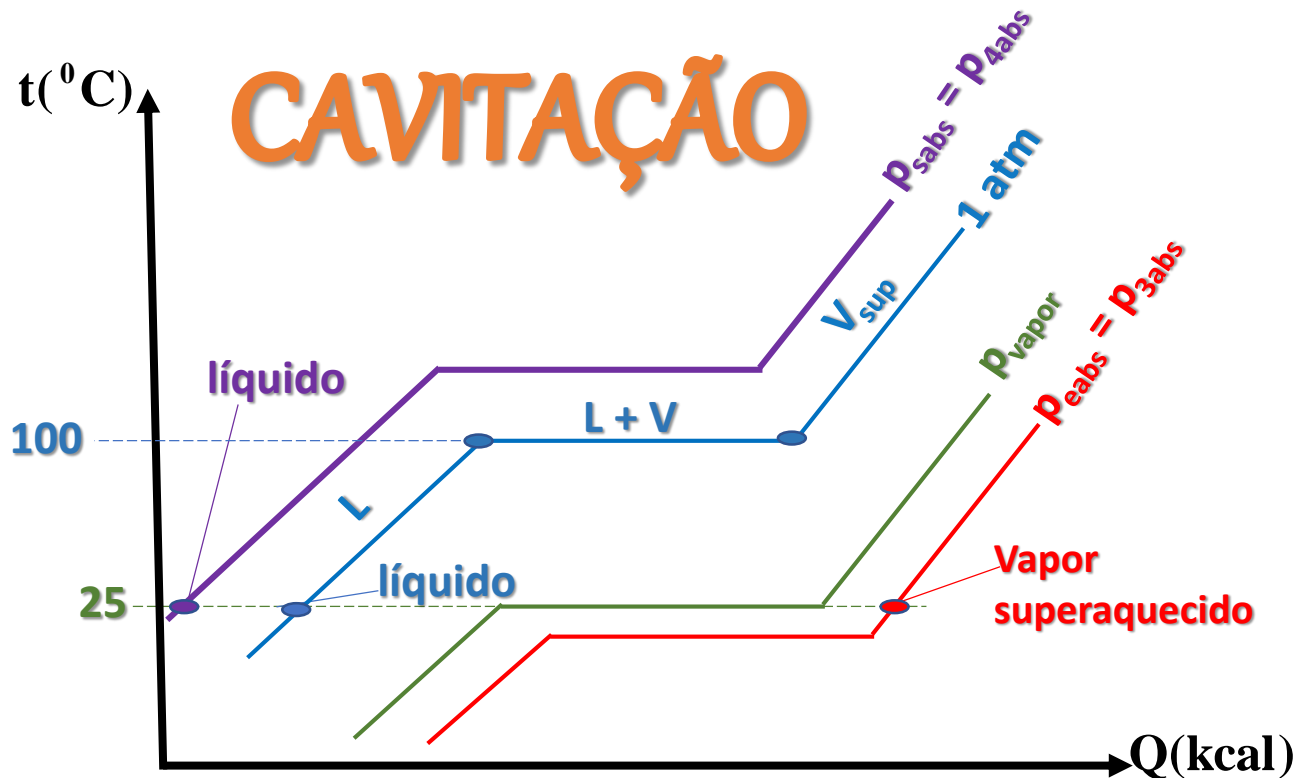


Recordando:

$$p_{atm} = 1atm$$



Água 25°C



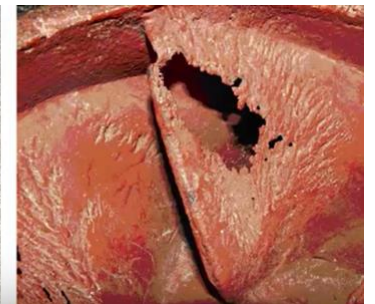
CONSEQUÊNCIAS DA CAVITAÇÃO



QUEDA DE RENDIMENTO

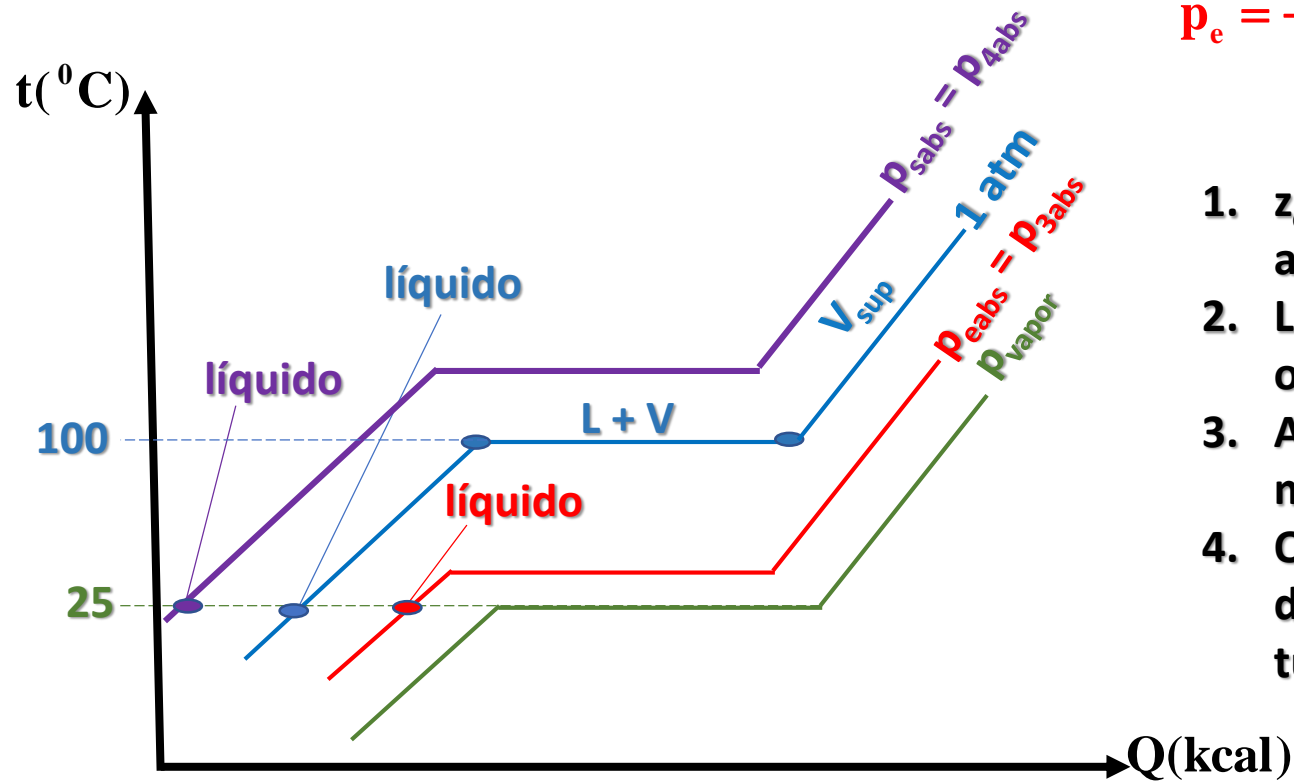
DESBALANCEAMENTO
PROVADO PELAS VIBRAÇÕES

REDUÇÃO DO TEMPO VIDA DA BOMBA



CUIDADOS INICIAIS PARA EVITAR A CAVITAÇÃO

$$p_{eabs} > p_{vapor}$$



$$p_e = -\gamma \times \left\{ z_e + \left[1 + f_{aB} \times \frac{(L + \sum Leq)_{aB}}{D_{H_{aB}}} \right] \times \frac{1}{2g \times A^2} \right\} \times Q^2$$

1. z_e o menor possível e se der, negativo, ou seja, bomba afogada.
2. L o menor possível, ou seja, a bomba deve ser instalada o mais perto possível do reservatório de captação.
3. A somatória dos comprimento equivalentes deve ser a menor possível.
4. O diâmetro da tubulação antes da bomba é um diâmetro imediatamente superior ao definido para a tubulação de recalque.



Infelizmente a condição $p_{eabs} > p_{vapor}$
não é suficiente para garantir que não
ocorra o fenômeno de cavitação!

A CONDIÇÃO NECESSÁRIA PARA NÃO OCORRER O FENÔMENO DE CAVITAÇÃO:

$$\text{NPSH}_{\text{disponível}} \geq \text{NPSH}_{\text{requerido}}$$



O QUE É
NPSH?



NPSH

NPSH disponível → **projetista**

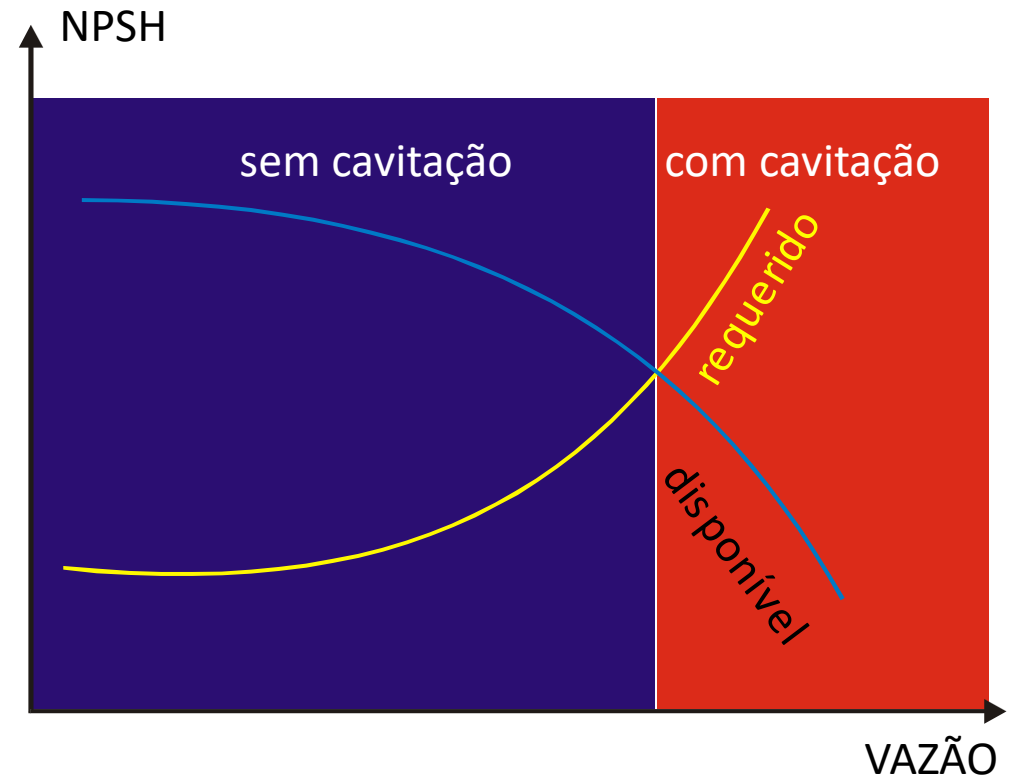
NPSH requerido → **fabricante**

N → **NET**

P → **POSITIVE**

S → **SUCTION**

H → **HEAD**



CALCULANDO O $NPSH_{REQUERIDO} = NPSH_{req}$:

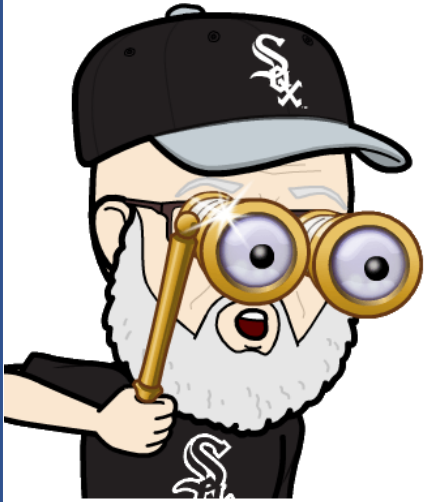
$$NPSH_{req} = H_{\text{entrada_bomba_absoluta}} - \frac{p_{\text{vapor}}}{\gamma}$$

$$\text{entrada_bomba_absoluta} = e - B_{\text{abs}}$$

$$NPSH_{req} = z_{e_B_{\text{abs}}} + \frac{p_{e_B_{\text{abs}}}}{\gamma} + \frac{\alpha_e \times v_{e_B_{\text{abs}}}^2}{2g} - \frac{p_{\text{vapor}}}{\gamma}$$

$z_{e_B_{\text{abs}}} \Rightarrow$ PHR no eixo da bomba





$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = H_0 - H_{p_{aB}} - \frac{p_{\text{vapor}}}{\gamma}$$

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = z_0 + \frac{(p_0 - p_{\text{vapor}})_{\text{abs}}}{\gamma} - f_{aB} \times \frac{(L + \sum L_{\text{eq}})_{aB}}{D_{H_{aB}}} \times \frac{Q^2}{2g \times A_{aB}^2}$$

$z_0 \Rightarrow$ PHR no eixo da bomba

PORTANTO: A CONDIÇÃO NECESSÁRIA E SUFICIENTE PARA NÃO OCORER A CAVITAÇÃO É:

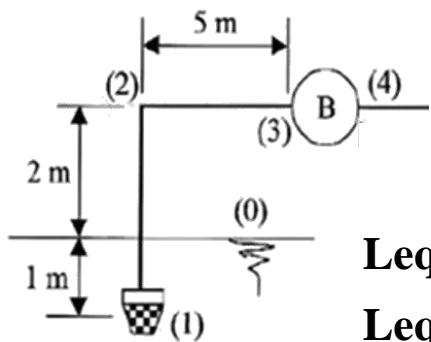
CALCULANDO O
 $\text{NPSH}_{\text{DISPONÍVEL}} =$
 $\text{NPSH}_{\text{disp}}$:

$$\text{NPSH}_{\text{disponível}} - \text{NPSH}_{\text{requerido}} \geq 0$$

$$\text{NPSH}_{\text{disponível}} - \text{NPSH}_{\text{requerido}} = \text{reserva contra a cavitação}$$



EXERCÍCIO



$$Leq_1 = 42,65\text{m}$$

$$Leq_2 = 3,76\text{m}$$

Água a
25°C:

$$\rho_{\text{água}} = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$p_{\text{vapor}} = 0,03166 \text{ bar(abs)}$$

$$g = 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

DADOS:

$$f = 0,02 = \text{constante}$$

$$p_{\text{atm}} = 98420 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$D_N = 4'' \rightarrow \text{aço 40} \rightarrow D=102,3\text{mm} \\ \rightarrow A=82,1\text{cm}^2$$

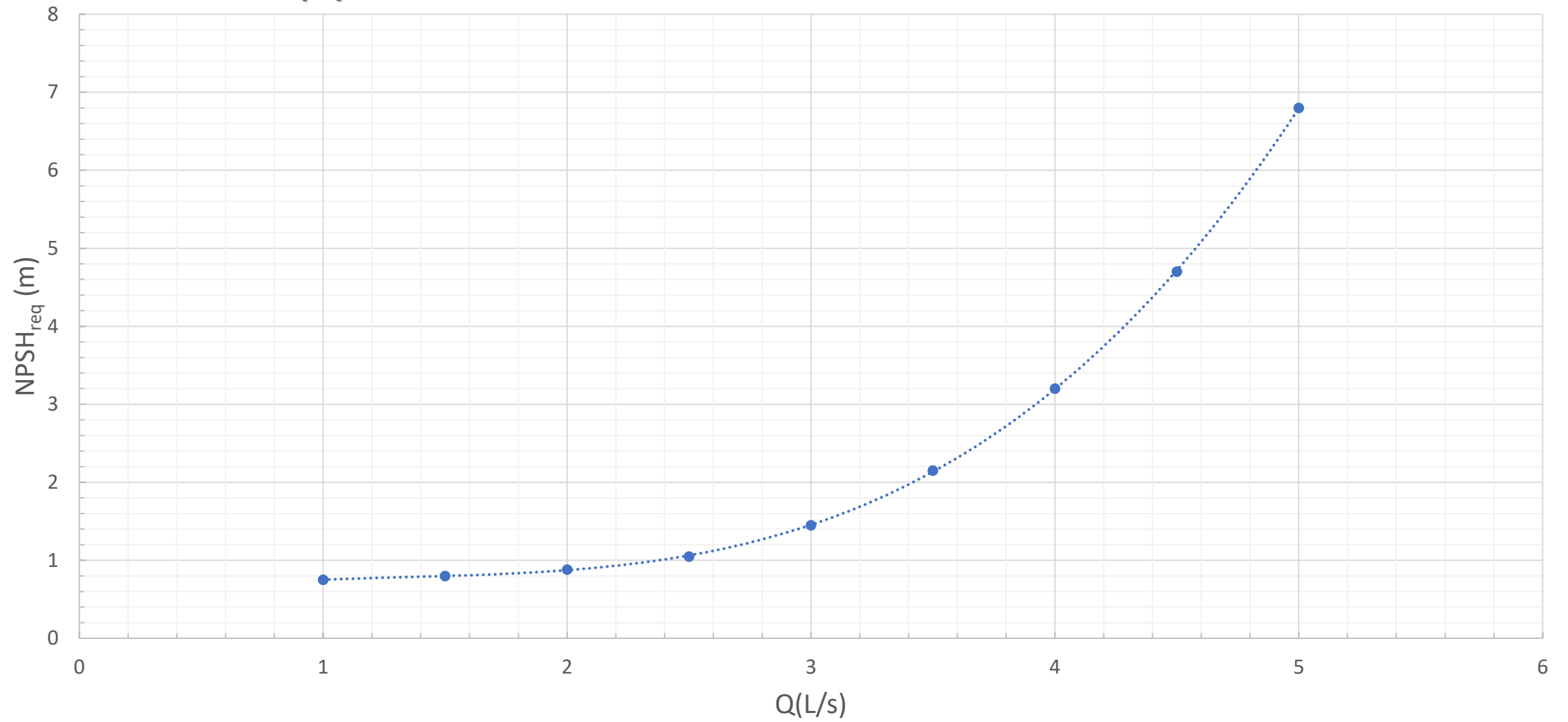
Para a bomba
selecionada, temos
a tabela a seguir:

Q(L/s)	NPSH(m)
1	0,75
1,5	0,8
2	0,88
2,5	1,05
3	1,45
3,5	2,15
4	3,2
4,5	4,7
5	6,8

Através do Excel, traçamos a
curva que representa
 $NPSH_{\text{req}} = f(Q)$

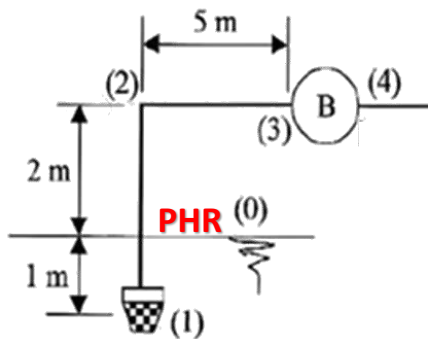
NPSH(m) de uma bomba

$$y = 0,1168x^3 - 0,4714x^2 + 0,7194x + 0,3862$$
$$R^2 = 1$$





O PHR deve ser no eixo da bomba!



CALCULANDO O $NPSH_{disp}$:

$$NPSH_{disp} = z_0 + \frac{(p_0 - p_{vapor})_{abs}}{\gamma} - f_{aB} \times \frac{(L + \sum Leq)_{aB}}{D_{H_{aB}}} \times \frac{Q^2}{2g \times A_{aB}^2}$$

$$NPSH_{disp} = -2 + \frac{(98420 - 0,03166 \times 10^5)_{abs}}{997 \times 9,8} - 0,02 \times \frac{(8 + 46,41)}{0,1023} \times \frac{Q^2}{19,6 \times (82,1 \times 10^{-4})^2}$$

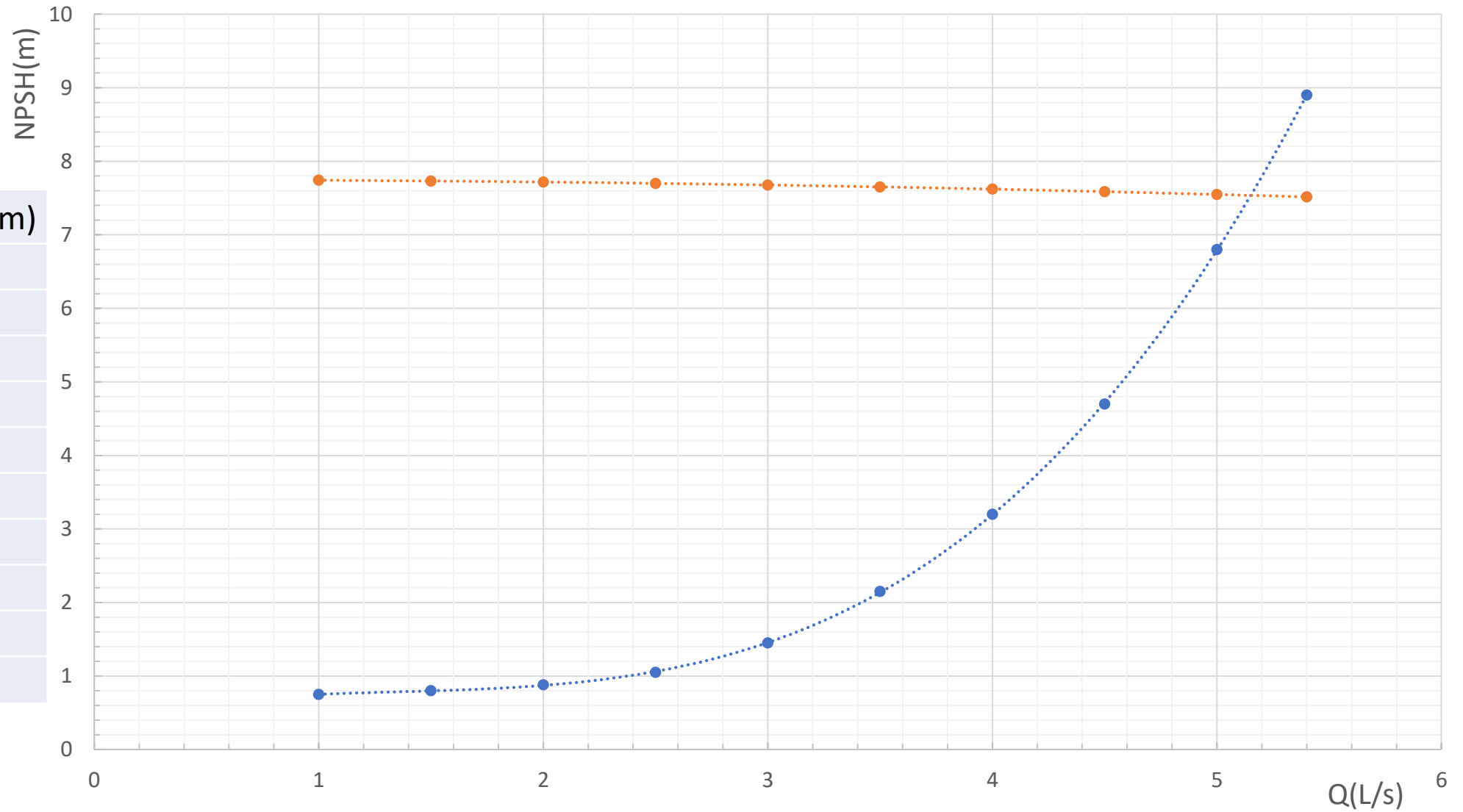
$$NPSH_{disp} = 7,75 - 8051,8 \times Q^2$$

NPSH(m) de uma bomba

$$y = -0,0081x^2 + 3E-14x + 7,75$$
$$R^2 = 1$$

$$y = 0,116x^3 - 0,4653x^2 + 0,7044x + 0,3966$$
$$R^2 = 1$$

Q(L/s)	NPSH _{disp} (m)
1	7,7
1,5	7,7
2	7,7
2,5	7,7
3	7,7
3,5	7,7
4	7,6
4,5	7,6
5	7,5
5,4	7,5





A partir de que vazão
passa a existir o
fenômeno de
cavitação?

<http://www.profcardy.com/calculadoras/aplicativos.php?calc=1>

Você pode inserir os coeficientes reais **a**, **b**, **c** & **d** de equações da forma:

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0.$$

Os coeficientes podem ser quaisquer números reais (a não nulo). Lembre-se que se todos os coeficientes são reais, então pelo menos uma raiz será real. Não deixe campos em branco.

$$0.116 x^3 + -0.4572 x^2 + 0.7044 x + -7.3534 = 0.$$

Calcule as soluções

	parte real
X ₁	5.151393838946682
X ₂	-0.605007264300927
X ₃	-0.605007264300927

	parte imaginária
	+ 0 i
	+ 3.4553786175934915 i
	+ -3.4553786175934915 i

Como o método de cálculo é numérico, aproveite alguns tipos de resultados de $p(x) = 0$ para fazer os cálculos na mão. Por exemplo, aproveitar uma raiz A para dividir $p(x)$ por $x - A$ e resolver a equação do 2º grau.

Tente ver se uma solução aproximada é, na verdade, um número racional. Por exemplo, é apresentado que uma solução 1,99999999999 que pode ser o número 2. Basta, para tirar essa dúvida verificar se $p(2) = 0$.

Cavita para vazões aproximadamente superiores a 5,1514 L/s



7.8 TABELA 1 - PRESSÃO DE VAPOR E DENSIDADE DA ÁGUA

t °C	T K	p _D bar	ρ kg/dm ³	t °C	T K	p _D bar	ρ kg/dm ³	t °C	T K	p _D bar	ρ kg/dm ³
0	273.15	0.00611	0.9998					138	411.15	3.414	0.9276
1	274.15	0.00657	0.9999	61	334.15	0.2086	0.9826	140	413.15	3.614	0.9258
2	275.15	0.00706	0.9999	62	335.15	0.2184	0.9821	145	418.15	4.155	0.9214
3	276.15	0.00758	0.9999	63	336.15	0.2286	0.9816	150	423.15	4.760	0.9168
4	277.15	0.00813	1.0000	64	337.15	0.2391	0.9811	155	428.15	5.433	0.9121
5	278.15	0.00872	1.0000	65	338.15	0.2501	0.9805	160	433.15	6.181	0.9073
6	279.15	0.00935	1.0000	66	339.15	0.2615	0.9799	165	438.15	7.008	0.9024
7	280.15	0.01001	0.9999	67	340.15	0.2733	0.9793	170	433.15	7.920	0.8973
8	281.15	0.01072	0.9999	68	341.15	0.2856	0.9788	175	448.15	8.924	0.8921
9	282.15	0.01147	0.9998	69	342.15	0.2984	0.9782	180	453.15	10.027	0.8869
10	283.15	0.01227	0.9997	70	343.15	0.3116	0.9777	185	458.15	11.233	0.8815
11	284.15	0.01312	0.9997	71	344.15	0.3253	0.9770	190	463.15	12.551	0.8760
12	285.15	0.01401	0.9996	72	345.15	0.3396	0.9765	195	468.15	13.987	0.8704
13	286.15	0.01497	0.9994	73	346.15	0.3543	0.9760	200	473.15	15.55	0.8647
14	287.15	0.01597	0.9993	74	347.15	0.3696	0.9753	205	478.15	17.243	0.8588
15	288.15	0.01704	0.9992	75	348.15	0.3855	0.9748	210	483.15	19.077	0.8528
16	289.15	0.01817	0.9990	76	349.15	0.4019	0.9741	215	488.15	21.060	0.8467
17	290.15	0.01936	0.9988	77	350.15	0.4189	0.9735	220	493.15	23.198	0.8403
18	291.15	0.02062	0.9987	78	351.15	0.4365	0.9729	225	498.15	25.501	0.8339
19	292.15	0.02196	0.9985	79	352.15	0.4547	0.9723	230	503.15	27.976	0.8273
20	293.15	0.02337	0.9983	80	353.15	0.4736	0.9716				
21	294.15	0.02485	0.9981	81	354.15	0.4931	0.9710				

t °C	T K	p _D bar	ρ kg/dm ³	t °C	T K	p _D bar	ρ kg/dm ³	t °C	T K	p _D bar	ρ kg/dm ³
22	295.15	0.02642	0.9978	82	355.15	0.5133	0.9704	235	508.15	30.632	0.8205
23	296.15	0.02808	0.9976	83	356.15	0.5342	0.9697	240	513.15	33.478	0.8136
24	297.15	0.02982	0.9974	84	357.15	0.5557	0.9691	245	518.15	36.523	0.8065
25	298.15	0.03166	0.9971	85	358.15	0.5780	0.9684	250	523.15	39.776	0.7992
26	299.15	0.03360	0.9968	86	359.15	0.6011	0.9678	255	528.15	43.246	0.7916
27	300.15	0.03564	0.9966	87	360.15	0.6249	0.9671	260	533.15	46.943	0.7839
28	301.15	0.03778	0.9963	88	361.15	0.6495	0.9665	265	538.15	50.877	0.7759
29	302.15	0.04004	0.9960	89	362.15	0.6749	0.9658	270	543.15	55.058	0.7678
30	303.15	0.04241	0.9957	90	363.15	0.7011	0.9652	275	548.15	59.496	0.7593
31	304.15	0.04491	0.9954	91	364.15	0.7281	0.9644	280	553.15	64.202	0.7505
32	305.15	0.04753	0.9951	92	365.15	0.7561	0.9638	285	558.15	69.186	0.7415
33	306.15	0.05029	0.9947	93	366.15	0.7849	0.9630	290	563.15	74.461	0.7321
34	307.15	0.05318	0.9944	94	367.15	0.8146	0.9624	295	568.15	80.037	0.7223
35	308.15	0.05622	0.9940	95	368.15	0.8453	0.9616	300	573.15	85.927	0.7122
36	309.15	0.05940	0.9937	96	369.15	0.8769	0.9610	305	578.15	92.144	0.7017
37	310.15	0.06274	0.9933	97	370.15	0.9094	0.9602	310	583.15	98.700	0.6906
38	311.15	0.06624	0.9930	98	371.15	0.9430	0.9596	315	588.15	105.61	0.6791
39	312.15	0.06991	0.9927	99	372.15	0.9776	0.9586	320	593.15	112.89	0.6669
40	313.15	0.07375	0.9923	100	373.15	1.0133	0.9581	325	598.15	120.56	0.6541
41	314.15	0.07777	0.9919	102	375.15	1.0878	0.9567	330	603.15	128.63	0.6404
42	315.15	0.08198	0.9915	104	377.15	1.1668	0.9552	340	613.15	146.05	0.6102
43	316.15	0.08639	0.9911	106	379.15	1.2504	0.9537	350	623.15	165.35	0.5743
44	317.15	0.09100	0.9907	108	381.15	1.3390	0.9522	360	633.15	186.75	0.5275
45	318.15	0.09582	0.9902	110	383.15	1.4327	0.9507	370	643.15	210.54	0.4518
46	319.15	0.10086	0.9898	112	385.15	1.5316	0.9491	374.15	647.30	221.2	0.3154
47	320.15	0.10612	0.9894	114	387.15	1.6362	0.9476				
48	321.15	0.11162	0.9889	116	389.15	1.7465	0.9460				
49	322.15	0.11736	0.9884	118	391.15	1.8628	0.9445				
50	323.15	0.12335	0.9880	120	393.15	1.9854	0.9429				

t °C	T K	p _D bar	ρ kg/dm ³	t °C	T K	p _D bar	ρ kg/dm ³	t °C	T K	p _D bar	ρ kg/dm ³
51	324.15	0.12961	0.9876								
52	325.15	0.13613	0.9871	122	395.15	2.1145	0.9412				
53	326.15	0.14293	0.9866	124	397.15	2.2504	0.9396				
54	327.15	0.15002	0.9862	126	399.15	2.3933	0.9379				
55	328.15	0.15741	0.9857	128	401.15	2.5435	0.9362				
56	329.15	0.16511	0.9852	130	403.15	2.7013	0.9346				
57	330.15	0.17313	0.9846								
58	331.15	0.18147	0.9842	132	405.15	2.8670	0.9328				
59	332.15	0.19016	0.9837	134	407.15	3.041	0.9311				
60	333.15	0.19920	0.9832	136	409.15	3.223	0.9294				

TABELA RETIRADA DA PÁGINA:

file:///C:/Users/RaimundoFerreira/Downloads/manual_de_treinamento.pdf



Vamos aprender fazendo, para tal, desenvolva o projeto proposto a seguir até a etapa da verificação do fenômeno de cavitação!

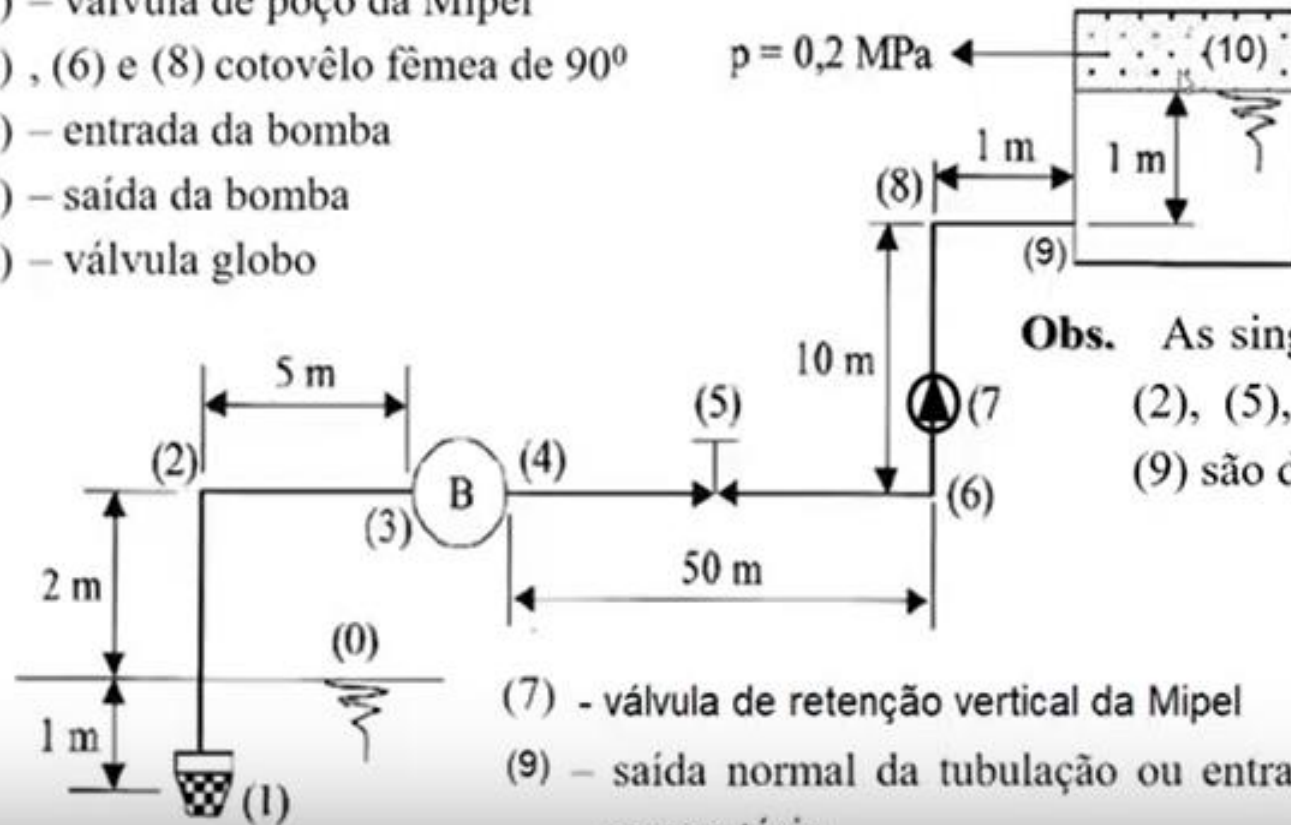
http://www.escoladavida.eng.br/mecanica_dos_fluidos_para_eng_quimica.htm

20^o - Considerando a instalação de recalque (linha de sucção + linha de recalque) cujo esboço é dado pela figura 1 e que foi projetada para transportar água a 25^oC com uma vazão desejada igual a 10L/s, especifique a bomba adequada e o seu ponto de trabalho.

Exercício extraído da Proposta de Mangá para Bibliografia Básica página 88 e que pode ser acessado pela internet no endereço acima!



- (1) – válvula de poço da Mipel
- (2) , (6) e (8) cotovêlo fêmea de 90^o
- (3) – entrada da bomba
- (4) – saída da bomba
- (5) – válvula globo



Obs. As singularidades (2), (5), (6), (8) e (9) são da Tupy

- (7) - válvula de retenção vertical da Mipel
- (9) – saída normal da tubulação ou entrada normal do reservatório