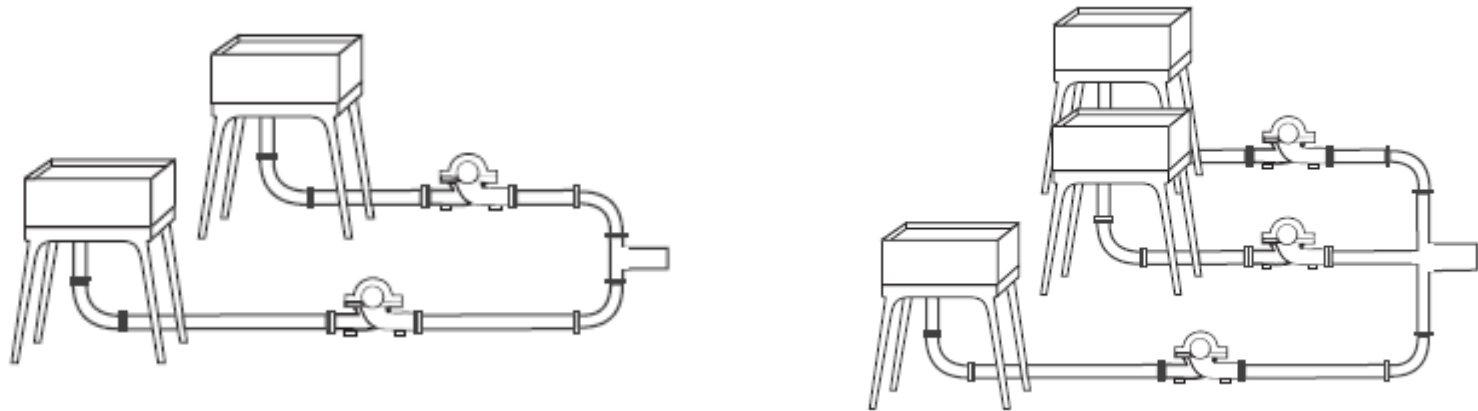




Décima primeira aula de ME5330 – associação em paralelo de bombas



Maio de 2011



Quando pensar em uma associação em paralelo?



Quando existe a necessidade de aumentar a vazão!

EM SÉRIE VISA ATENDER A DEMANDA DE UMA CARGA MAIOR



recurso adotado pelo projetista visando

- redução de custos do projeto
- aumento de segurança de operação
- flexibilidade do processo de manutenção

A associação de bombas hidráulicas em série ou paralelo

01/05/2011 - v3

associação em série

oleodutos

irrigação e abastecimento

associação em paralelo

EM PARALELO VISA ATENDER UMA VAZÃO MAIOR, QUE PODE NÃO SER CONTINUA

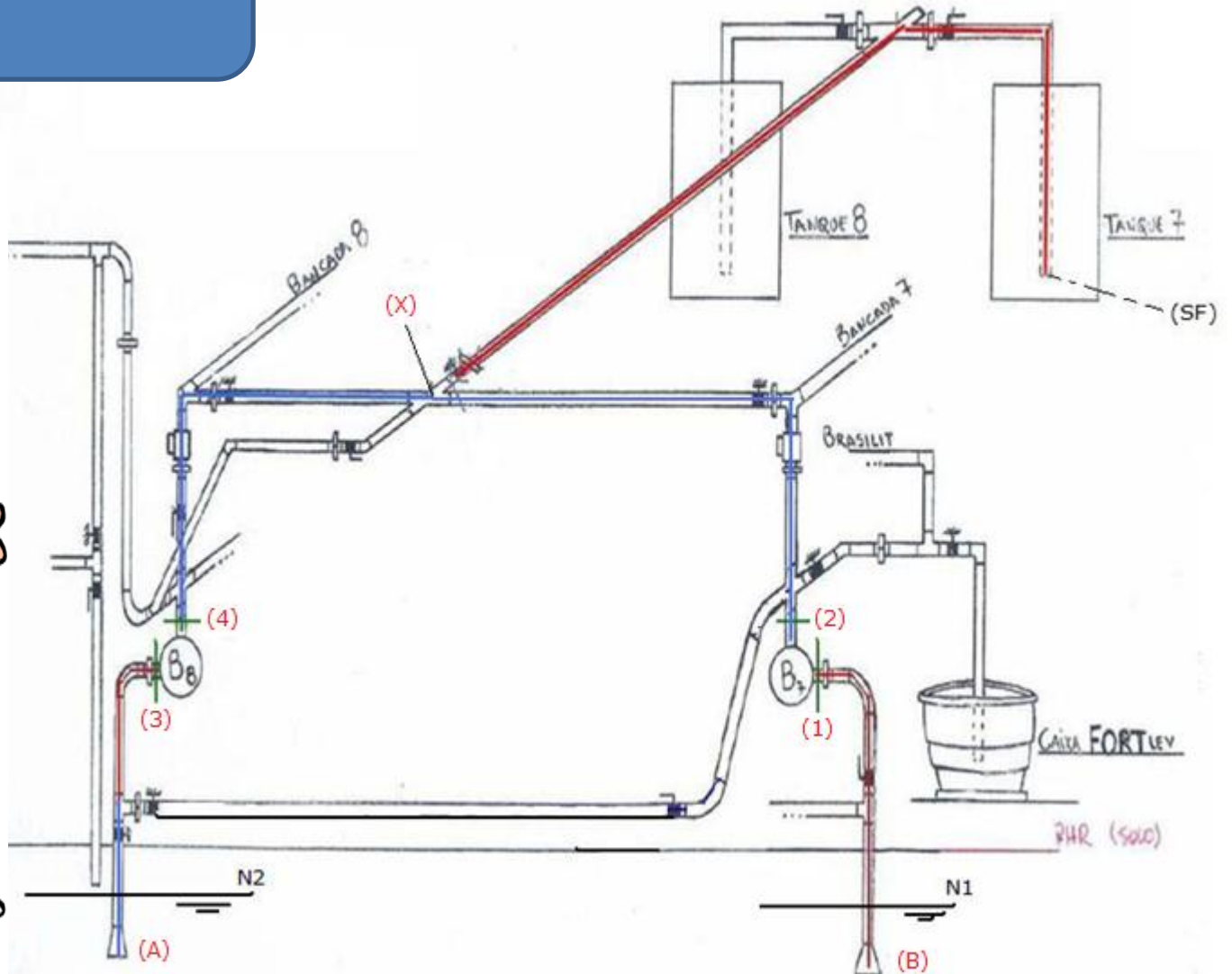
Hoje vamos falar da
associação em
paralelo de bombas



Como os transdutores de pressão não estão funcionando, alteramos as bancadas



Esquemáticamente



Aqui é importante se pensar na alimentação pela tubulação do centro, pois se houver acentuadas perdas de carga na linha, o aumento da vazão com duas ou mais bombas em paralelo será pequeno e, portanto, pouco compensador.

A figura abaixo mostra exemplo para velocidades em associação em paralelo

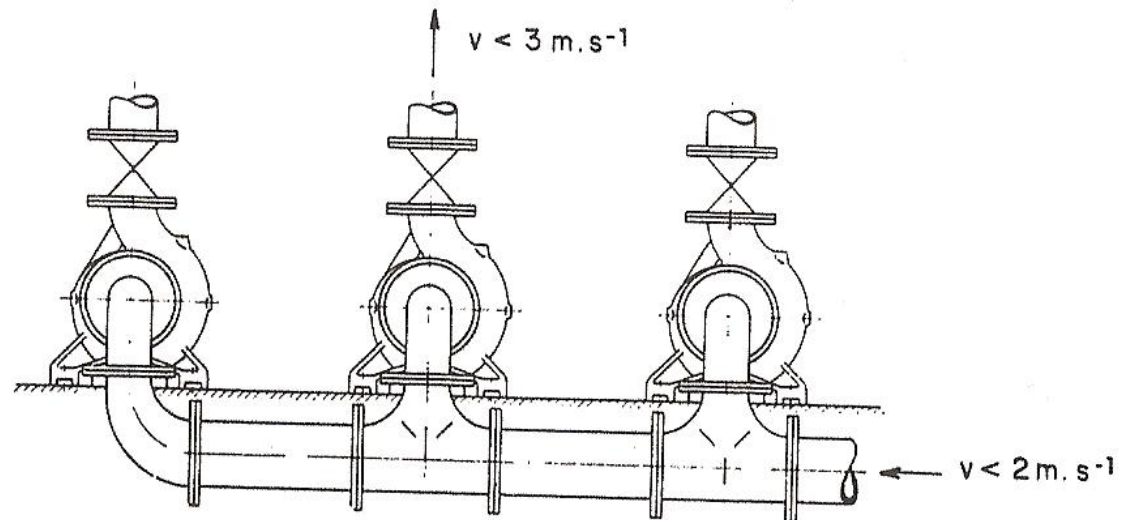
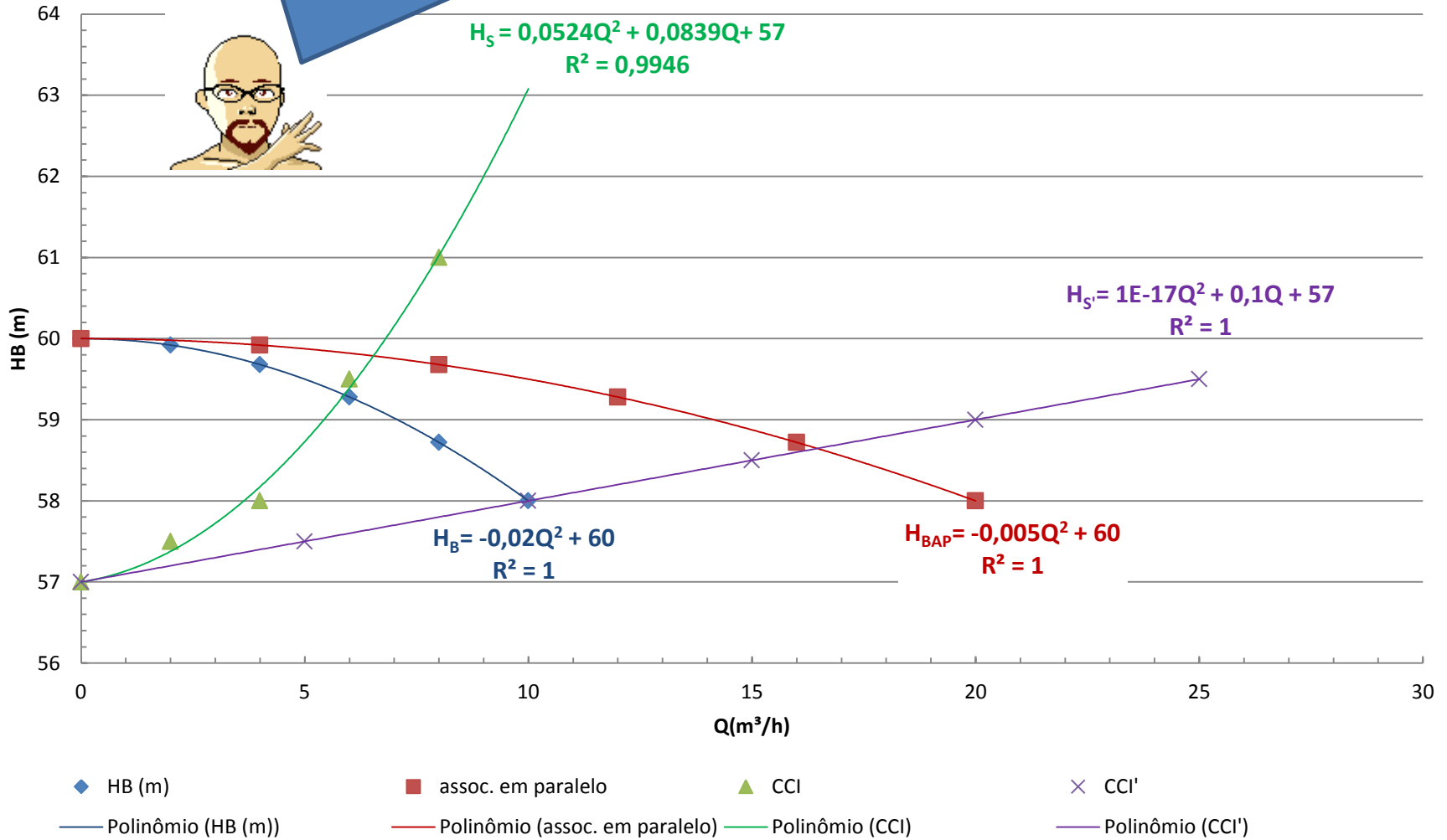


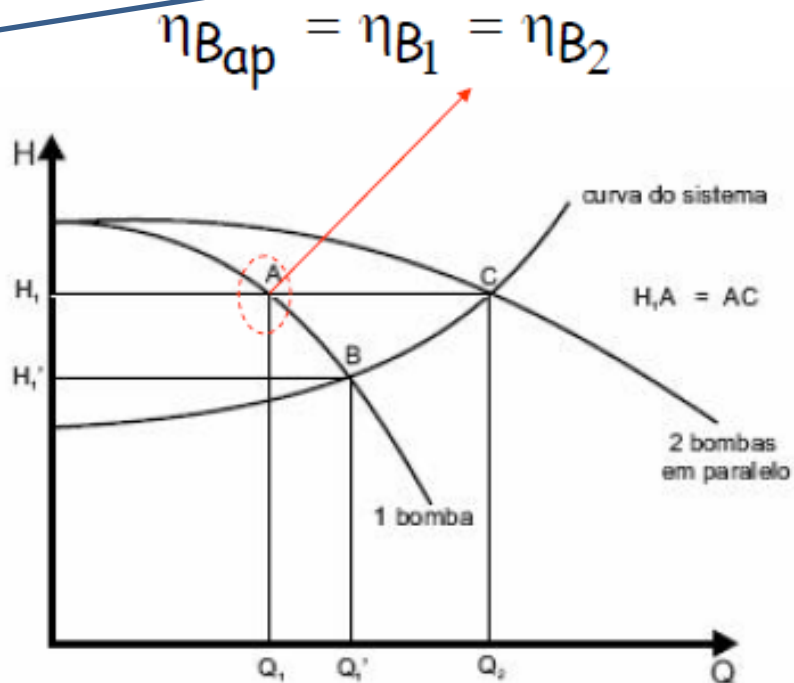
Fig. 7.7 Ligação em paralelo.

Observe que para a perda acentuada (CCI verde) a contribuição para o aumento da vazão na associação em paralelo é muito pequena.

CCB

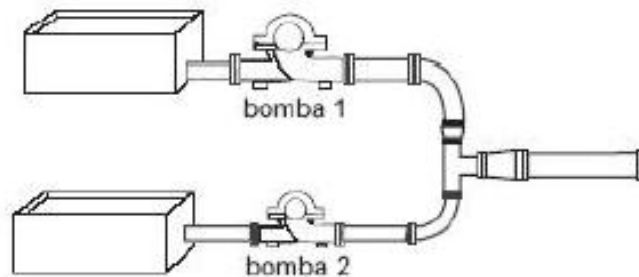


Na associação de bombas hidráulicas iguais, tem-se a curva característica da associação obtida como mencionado no slide anterior e como mostrado a seguir:



Observe que a vazão Q_2 é menor que $2 * Q_1'$

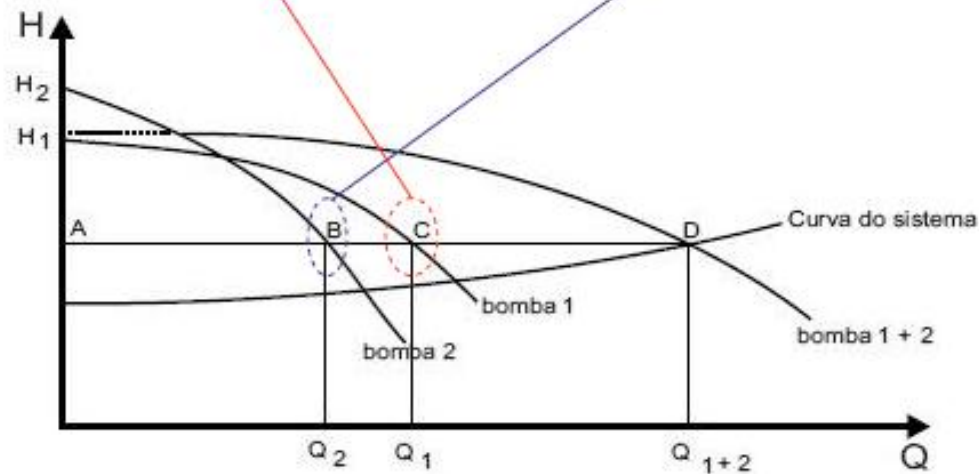




Bombas diferentes
o procedimento é
o mesmo, ou seja,
para o mesmo HB
se soma as vazões

$$\eta_{B_{ap}} = \frac{Q_{ap}}{\frac{Q_1}{\eta_{B_1}} + \frac{Q_2}{\eta_{B_2}}}$$

onde η_{B_1} se lê no ponto C e η_{B_2} se lê no ponto B





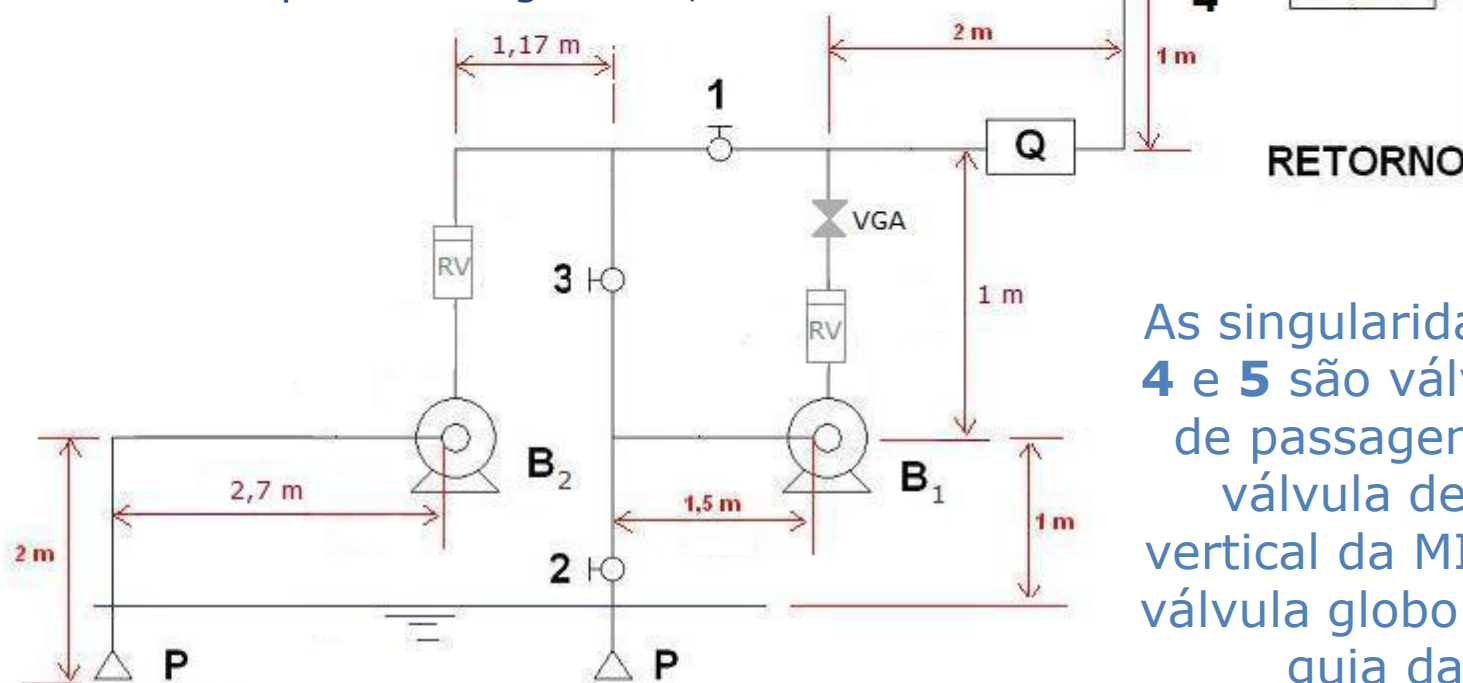
BOMBAS DE DUPLA SUCÇÃO OU
ADMISSÃO PODEM SUBSTITUIR
AS ASSOCIAÇÕES EM PARALELO
DE DUAS BOMBAS.

É MUITO IMPORTANTE SE ANALISAR
O RENDIMENTO E A RESERVA
CONTRA A CAVITAÇÃO AO SE
TRABALHAR COM BOMBAS
ASSOCIADAS, BOMBAS DE
MULTIESTÁGIOS E A BOMBA DE
DUPLA SUCÇÃO OU ADMISSÃO

Exemplo

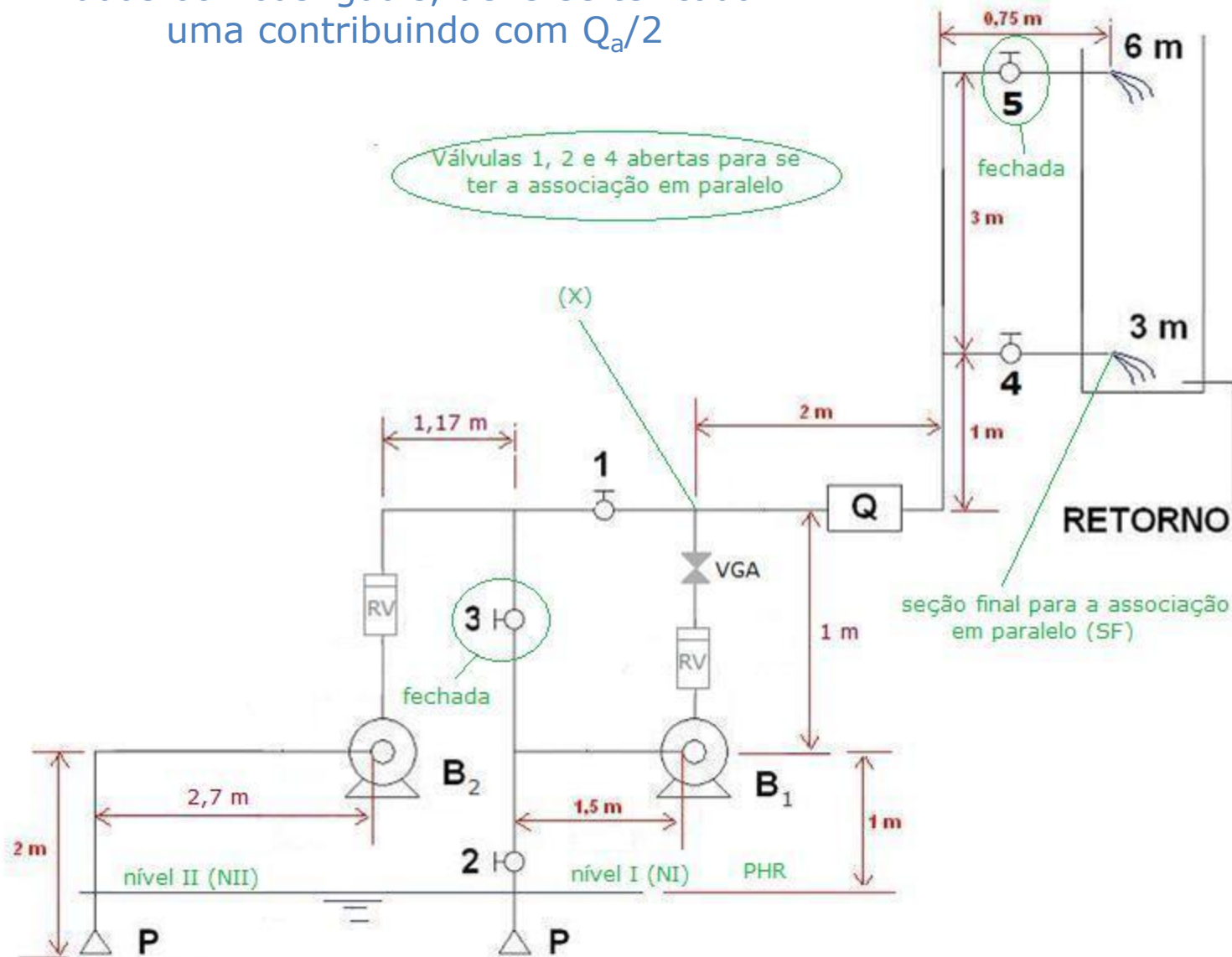
Considere a instalação ao lado, que pode operar só com uma bomba, com bombas associadas em série e paralelo.

Sabe-se que a tubulação é de aço 40 com um único diâmetro nominal de 1,5" ($K=4,6e-5$ m), que as válvulas são da MIPEL e os demais acessórios são da Tupy e que o medidor de vazão (**Q**) é um Venturi com comprimento equivalente igual a 4,36 m.



As singularidades **1**, **2**, **3**, **4** e **5** são válvulas esferas de passagem plena, RV válvula de retenção vertical da MIPEL e VGA é válvula globo angular sem guia da MIPEL

Para viabilizar o funcionamento adequado da associação em paralelo de duas bombas iguais, deve-se ter cada uma contribuindo com $Q_a/2$



SÓ EXISTIRÃO VAZÕES
IGUAIS ATRAVÉS DAS
BOMBAS ASSOCIADAS SE A
PERDA DE CARGA ANTES
DAS MESMAS E DEPOIS
DELAS ATÉ O PONTO QUE
AS VAZÕES SE SOMAM
FOREM IGUAIS!



Para demonstrar as condições anteriores, parte-se dos dados a seguir:

singularidade	Leq (m)
Válvula globo angular sem guia	4,88
válvula de pé com crivo	17,07
cotovelo de 90°	1,41
válvula de retenção	17,07
T de saída lateral	2,06
T de passagem direta	0,25
T de saída bilateral	2,50
válvula esfera	0,55
venturi	4,36
Saída de tub.	1,0



água	T (°C)	ρ (kg/m³)	998,2
	20	γ (N/m³)	9782,36
		ν (m²/s)	1,00E-06

D (mm)	A (cm²)
40,8	13,1

g (m/s²)	9,8
---	-----

Perdas de NI até a entrada da bomba B₁

$$H_{P_{NI-eB_1}} = f \times \frac{(3,5 + 17,07 + 0,55 + 2,06)}{0,0408} \times \frac{Q_1^2}{2 \times 9,8 \times (13,1 \times 10^{-4})^2}$$

$$H_{P_{NI-eB_1}} = f \times 16890970,59 \times Q_1^2$$

Perdas de NII até a entrada da bomba B₂

$$H_{P_{NII-eB_2}} = f \times \frac{(4,7 + 17,07 + 1,41)}{0,0408} \times \frac{Q_2^2}{2 \times 9,8 \times (13,1 \times 10^{-4})^2}$$

$$H_{P_{NII-eB_2}} = f \times 16890970,59 \times Q_2^2$$

Perdas da saída da bomba B₁ até (X)

$$H_{P_{sB_1-X}} = f \times \frac{(1 + 17,07 + 4,88)}{0,0408} \times \frac{Q_1^2}{2 \times 9,8 \times (13,1 \times 10^{-4})^2}$$

$$H_{P_{sB_1-X}} = f \times 16723372,53 \times Q_1^2$$

Perdas da saída da bomba B₂ até (X)

$$H_{P_{sB_2-X}} = f \times \frac{(1 + 17,07 + 1,41 + 1,17 + 0,25 + 0,55 + 1,5)}{0,0408} \times \frac{Q_2^2}{2 \times 9,8 \times (13,1 \times 10^{-4})^2}$$

$$H_{P_{sB_2-X}} = f \times 16723372,53 \times Q_2^2$$

CQD e onde
 $Q_1 = Q_2 = Q_{ap}/2$





Obtendo a equação da CCI

$$\gamma \times \frac{Q_{ap}}{2} \times H_{NI} + \gamma \times \frac{Q_{ap}}{2} \times H_{NII} + \gamma \times \frac{Q_{ap}}{2} \times H_{B1} + \gamma \times \frac{Q_{ap}}{2} \times H_{B1} = \gamma \times Q_{ap} \times H_{SF} + \sum N_{dissipadas}$$

$$\sum N_{dissipadas} = \gamma \times \frac{Q_{ap}}{2} \times H_{P_{NI-eB1}} + \gamma \times \frac{Q_{ap}}{2} \times H_{P_{NII-eB2}} + \gamma \times \frac{Q_{ap}}{2} \times H_{P_{sB1-X}} + \gamma \times \frac{Q_{ap}}{2} \times H_{P_{sB2-X}} + \gamma \times Q_{ap} \times H_{P_{X-SF}}$$

Agora é aplicar
no exercício
proposto



$$H_S = H_{SF} + \frac{1}{2} \times 16890970,59 \times f_{Q_{ap}/2} \times \left(\frac{Q_{ap}}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \times 16890970,59 \times f_{Q_{ap}/2} \times \left(\frac{Q_{ap}}{2}\right)^2 +$$

$$\frac{1}{2} \times 16723372,53 \times f_{Q_{ap}/2} \times \left(\frac{Q_{ap}}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \times 16723372,53 \times f_{Q_{ap}/2} \times \left(\frac{Q_{ap}}{2}\right)^2 + H_{P_{X-SF}}$$

$$H_{P_{X-SF}} = f_{Q_{ap}} \times \frac{(2+1+0,75+2,5+4,36+1,41+2,06+0,55+1)}{0,0408} \times \frac{Q_{ap}^2}{2 \times 9,8 \times (13,1 \times 10^{-4})^2}$$

$$H_{P_{X-SF}} = f_{Q_{ap}} \times 11389381,81 \times Q_{ap}^2$$

$$H_{SF} = 3 + \frac{Q_{ap}^2}{2 \times 9,8 \times (13,1 \times 10^{-4})^2} = 3 + 29730,5 \times Q_{ap}^2$$

$$H_S = 3 + 29730,5 \times Q_{ap}^2 + 4222742,65 \times f_{Q_{ap}/2} \times Q_{ap}^2 + 4180843,14 \times f_{Q_{ap}/2} \times Q_{ap}^2$$

$$+ 11389381,81 \times f_{Q_{ap}} \times Q_{ap}^2$$

$$H_S = 3 + 29730,5 \times Q_{ap}^2 + 8403585,79 \times f_{Q_{ap}/2} \times Q_{ap}^2 + 11389381,81 \times f_{Q_{ap}} \times Q_{ap}^2$$

Dados do fabricante:

CCB FABRICANTE


Q (m ³ /h)	H_B (m)	η (%)
0	26	-
2	26,8	52
4	26,3	54
6	24,6	55,5
8	21,5	56
10	17,1	56
12	11,5	55,5
14	4,5	54
14,5	2,6	



Obtendo a CCB



CCB FABRICANTE			
Q (m ³ /h)	Q_{ap} (m ³ /h)	H_B (m)	η (%)
0	0	26	-
2	4	26,8	52
4	8	26,3	54
6	12	24,6	55,5
8	16	21,5	56
10	20	17,1	56
12	24	11,5	55,5
14	28	4,5	54
14,5	29	2,6	



Completando
esse exercício.

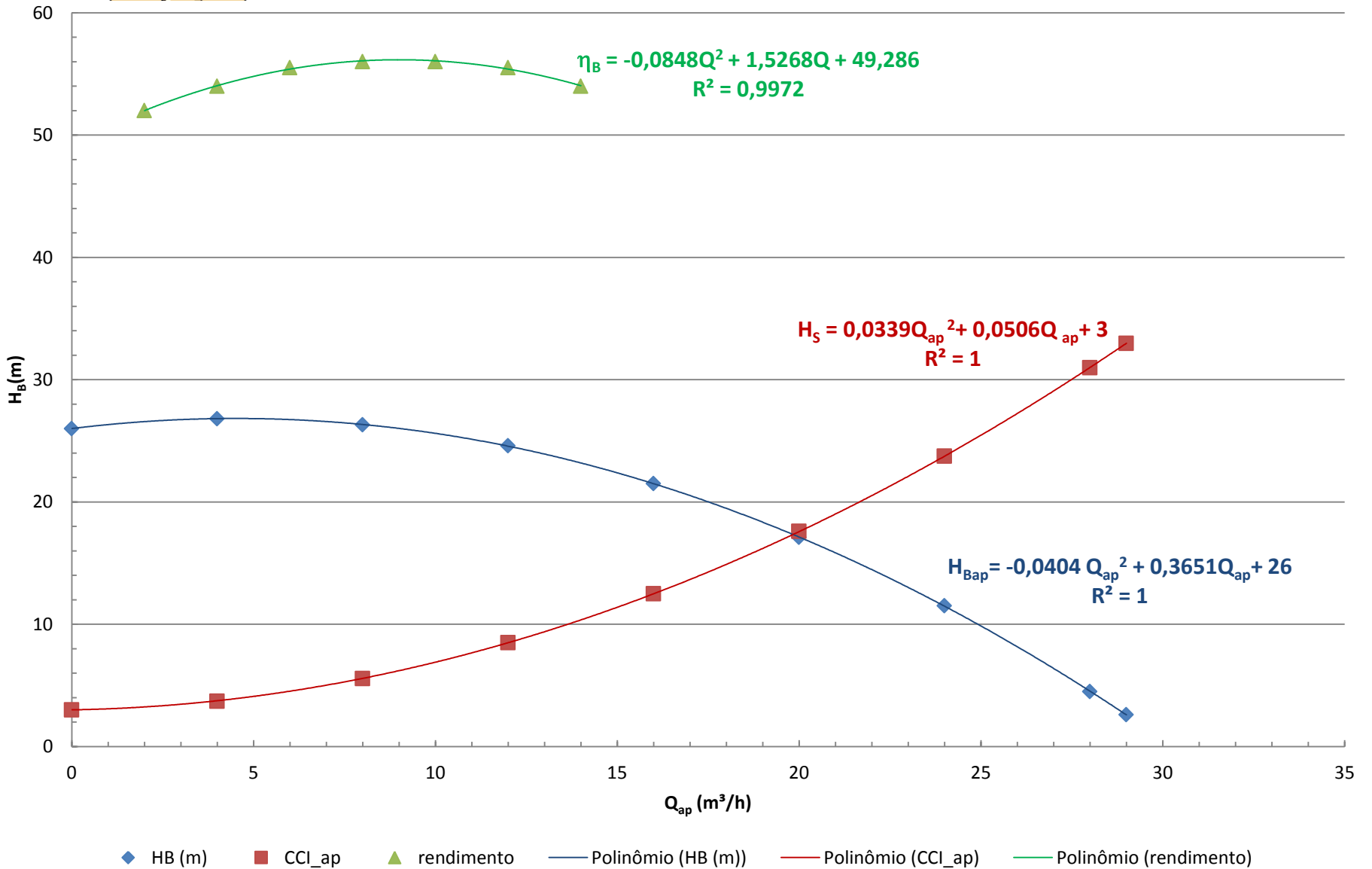
Através da tabela abaixo
nós podemos obter a
representação gráfica da
CCB e CCI



Q (m ³ /h)	Q _{ap} (m ³ /h)	H _B (m)	η (%)	f _{Q/2}	f _Q	HS (m)
0	0	26	-	0	0	3,0
2	4	26,8	52	0,0292	0,0259	3,7
4	8	26,3	54	0,0259	0,0236	5,5
6	12	24,6	55,5	0,0244	0,0227	8,5
8	16	21,5	56	0,0236	0,0222	12,5
10	20	17,1	56	0,0231	0,0219	17,6
12	24	11,5	55,5	0,0227	0,0216	23,8
14	28	4,5	54	0,0224	0,0215	31,0
14,5	29	2,6		0,0224	0,0214	33,0



No cruzamento da CCB com a CCI nós obtemos o ponto de trabalho



$$H_S = H_{B_{ap}}$$

$$0,0339Q_{ap}^2 + 0,0506Q_{ap} + 3 = -0,0404Q_{ap}^2 + 0,3651Q_{ap} + 26$$

$$0,0743Q_{ap}^2 - 0,3145Q_{ap} - 23 = 0$$

$$Q_{ap\tau} = \frac{0,3145 + \sqrt{0,3145^2 + 4 \times 0,0743 \times 23}}{2 \times 0,0743} \cong 19,84 \frac{m^3}{h} \approx 19,9 \frac{m^3}{h}$$

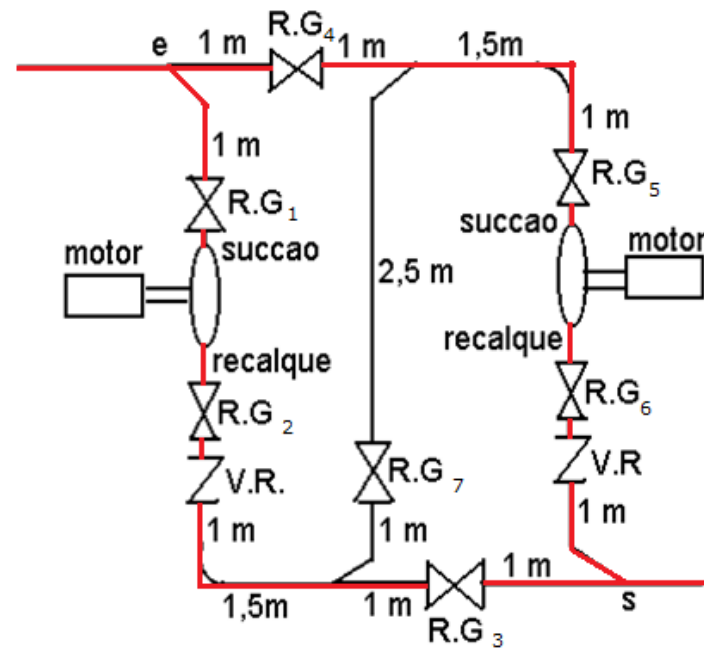
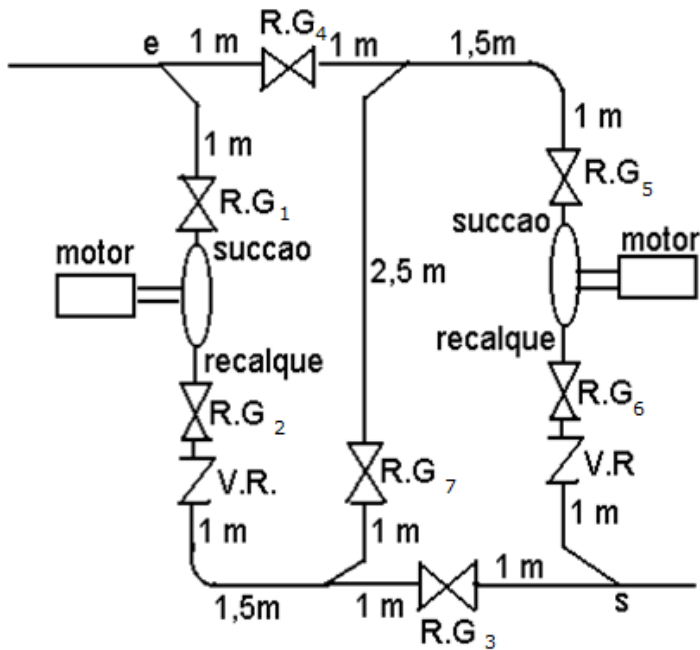
$$H_{B_{ap\tau}} = 0,0339 \times 19,9^2 + 0,0506 \times 19,9 + 3 \cong 17,5m$$

$$\eta_B = -0,0848 \times \left(\frac{19,9}{2}\right)^2 + 1,5268 \times \frac{19,9}{2} + 49,286 \cong 56,1\%$$

$$N_{B_{ap\tau}} = \frac{9782,36 \times \left(\frac{19,9}{3600}\right) \times 17,5}{0,561} \cong 1686,9W$$

A seguir é mostrado uma das possibilidades de se associar em paralelo duas bombas em uma casa de máquina

Vamos acompanhar mais um exemplo

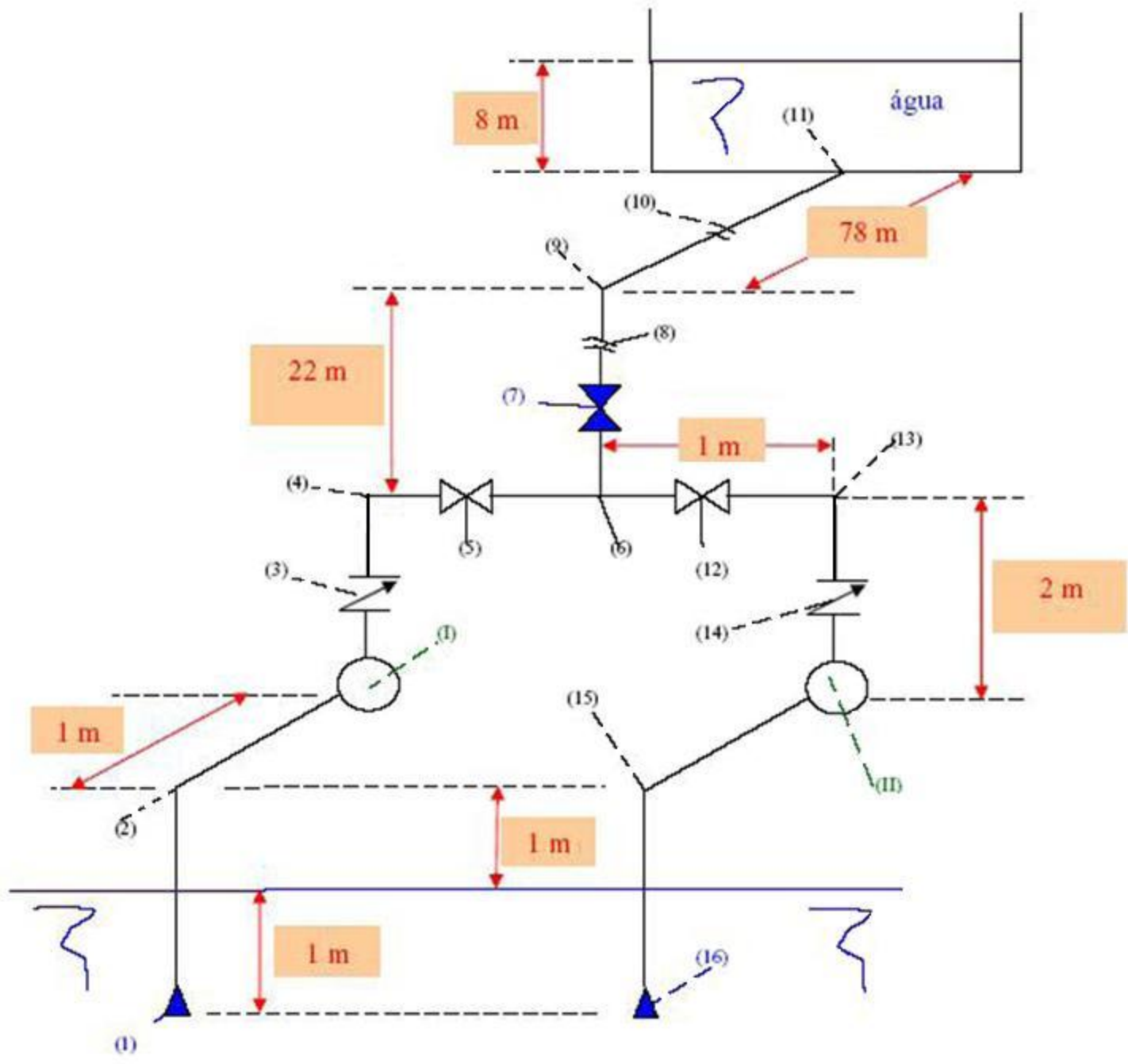


A instalação representada a seguir pode operar com uma bomba ou com as duas bombas associadas em paralelo. Sabendo-se que as bombas são iguais e que apresentam as características indicadas na tabela (I), pede-se:

- a. a potência útil do motor elétrico quando apenas uma bomba operar;
- b. verificar o fenômeno de cavitação para a situação anterior, sabendo-se que a pressão de vapor da água para a situação descrita é igual a $0,0238 \text{ kgf/cm}^2$ (abs) e que a leitura barométrica é igual a 700 mmHg ;
- c. o ponto de trabalho para associação em paralelo das bombas;
- d. a verificação do fenômeno de cavitação para esta nova situação.

Dados:

Tubulação de aço 40, que para a sucção tem um diâmetro nominal de 3" ($D_{\text{int}} = 77,9 \text{ mm}$ e $A = 47,7 \text{ cm}^2$) e para o recalque tem um diâmetro nominal de 2,5" ($D_{\text{int}} = 62,7 \text{ mm}$ e $A = 30,9 \text{ cm}^2$), peso específico da água igual a $998,2 \text{ kgf/m}^3$; viscosidade cinemática da água igual a $1,004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e aceleração da gravidade igual a $9,8 \text{ m/s}^2$.



- (1) e (16) - válvulas de poço da Mipel
- (2), (4), (9), (13) e (15) - joelhos de 90° da Tupy
- (3) e (14) - válvulas de retenção vertical da Mipel
- (5) e (12) - válvulas gavetas da Mipel
- (6) – tê da Tupy
- (7) - válvula globo reta sem guia da Mipel
- (8) e (10) - representação de corte no desenho da tubulação
- (11) - entrada normal Leq da tabela da Tupy
- (I) e (II) - bombas centrífugas radiais

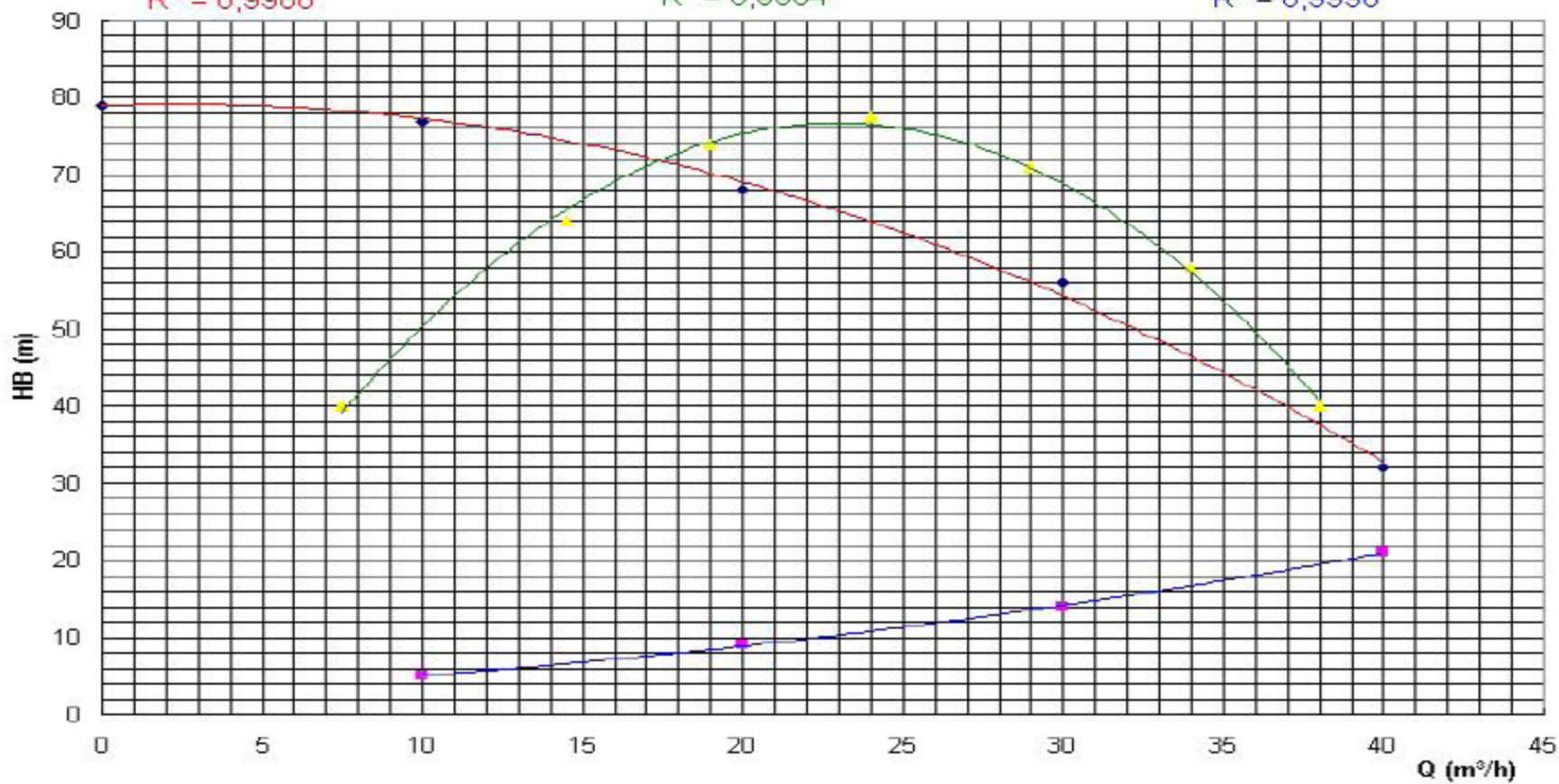
Nota:

Os trechos de (1) a (6) e de (16) a (6) são idênticos e a tubulação é de aço considerada nova

$$y = -0,0331x^2 + 0,1655x + 79$$
$$R^2 = 0,9966$$

$$y = -0,158x^2 + 7,2418x - 6,2346$$
$$R^2 = 0,9964$$

$$y = 0,0075x^2 + 0,155x + 2,75$$
$$R^2 = 0,9996$$



◆ HB (m) ■ NPSH req (m) ▲ rendimento (%) — Poly. (HB (m)) — Poly. (NPSH req (m)) — Poly. (rendimento (%))

Solução

Trata-se de uma instalação com duas entradas e uma saída, adotando-se o PHR nos níveis de captação, tem-se:

$$\gamma \times Q_{ap} \times H_{s_{ap}} = \gamma \times Q_{ap} \times H_{distribuição} + 2 \times \gamma \times \frac{Q_a}{2} \times H_{p_{3''}} + 2 \times \gamma \times \frac{Q_a}{2} \times H_{p_{dB-6}} + \gamma \times Q_a \times H_{p_{6-11}}$$

Dividindo-se todos os membros por $\gamma \times Q_a$ resulta:

$$H_{sa} = H_{distribuição} + H_{p_{3''}} + H_{p_{depoisda\ bomba\ até\ 6}} + H_{p_{6-11}}$$

$$H_{p_{3''}} \rightarrow \text{calculado para } \frac{Q_a}{2}$$

$$H_{p_{depoisda\ bomba\ até\ 6}} \rightarrow \text{calculado para } \frac{Q_a}{2}$$

$$H_{p_{6-11}} \rightarrow \text{calculado para } Q_a$$

$$H_{P_{3''}} = f_{3''_{Q_{a/2}}} \times \frac{(3+32+2,82)}{0,0779} \times \frac{\left(\frac{Q_a}{2}\right)^2}{2 \times 9,8 \times (47,7 \times 10^{-4})^2} = f_{3''_{Q_{a/2}}} \times 272164,4 \times Q_a^2$$

$$H_{P_{2,5''_{dB-6}}} = f_{2,5''_{Q_{a/2}}} \times \frac{(3+32+2,35+1,03)}{0,0627} \times \frac{\left(\frac{Q_a}{2}\right)^2}{2 \times 9,8 \times (30,9 \times 10^{-4})^2} = f_{2,5''_{Q_{a/2}}} \times 817719,6 \times Q_a^2$$

$$H_{P_{2,5''_{6-dist}}} = f_{2,5''_{Q_a}} \times \frac{(100+4,16+21,38+2,35+0,9)}{0,0627} \times \frac{(Q_a)^2}{2 \times 9,8 \times (30,9 \times 10^{-4})^2} = f_{2,5''_{Q_a}} \times 10975936,2 \times Q_a^2$$

$$H_{S_{ap}} = 33 + f_{3''_{Q_{a/2}}} \times 272164,4 \times Q_a^2 + f_{2,5''_{Q_{a/2}}} \times 817719,6 \times Q_a^2 + f_{2,5''_{Q_a}} \times 10975936,2 \times Q_a^2$$

$$H_{S_{ap}} = 33 + f_{3''_{Q_{a/2}}} \times 272164,4 \times Q_a^2 + f_{2,5''_{Q_{a/2}}} \times 817719,6 \times Q_a^2 + f_{2,5''_{Q_a}} \times 10975936,2 \times Q_a^2$$

Dados para a determinação dos coeficientes de perda de carga distribuída

propriedades do fluido transportado				
temp (°C)	μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	p_v (Pa)	v (m ² /s)
20	1,00E-03	998,2		1,004E-06

propriedades do local		
g =	9,8	m/s ²
patm =		Pa

mat. tubo aço			
espessura	Dint (mm)	A (cm ²)	
40	62,7	30,9	
	77,9	47,7	
K(m)	DH/k		
4,80E-05	1306		

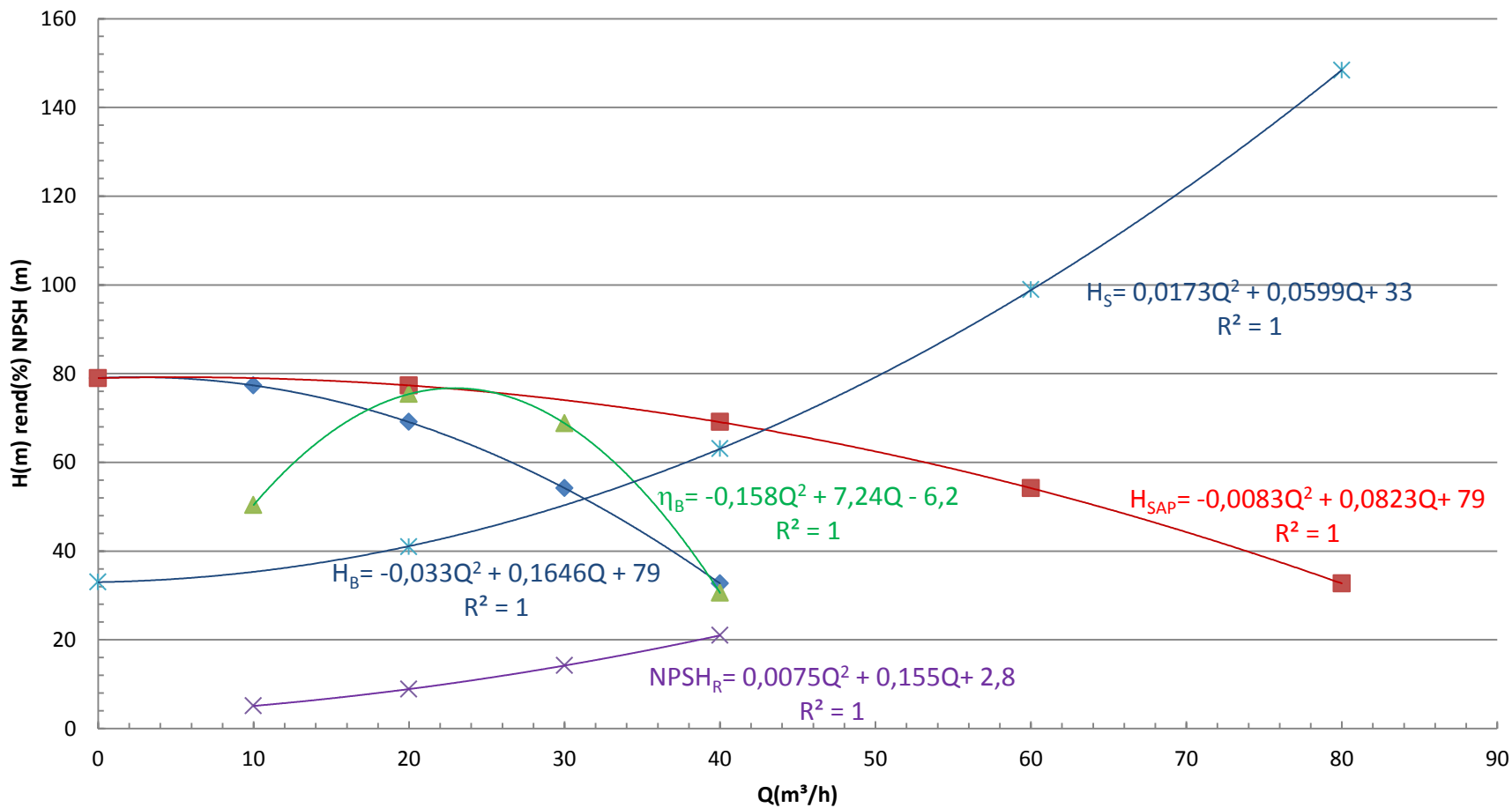
18229

A partir deste ponto se determina os coeficientes de perda de carga distribuída e traçam-se a CCI e a CCB para obtenção do ponto de trabalho.



Resultados

Q(m ³ /h)	Q _{ap} (m ³ /h)	H _B (m)	η _B (%)	NPSH (m)	f _{3" Qa/2}	f _{2,5"Qa/2}	f _{2,5"Qa}	H _s (m)
0	0	79			0	0	0	33,0
10	20	77,3	50,4	5,1	0,0234	0,0231	0,0212	41,0
20	40	69,1	75,4	8,9	0,0212	0,0212	0,0201	63,1
30	60	54,2	68,8	14,2	0,0202	0,0205	0,0196	98,9
40	80	32,7	30,6	21,0	0,0197	0,0201	0,0193	148,4



- ◆ HB (m)
- ◆ assoc paralelo
- ▲ rendimento
- × NPSH
- × CCI
- Polinômio (HB (m))
- Polinômio (assoc paralelo)
- Polinômio (rendimento)
- Polinômio (NPSH)
- Polinômio (CCI)

Ponto de trabalho para a associação em paralelo

$$H_S = H_{B_{ap}}$$

$$0,0173Q^2 + 0,0599Q + 33 = -0,0083Q^2 + 0,0823Q + 79$$

$$0,0256Q^2 - 0,0224Q - 46 = 0$$

$$Q_\tau = \frac{0,0145 + \sqrt{0,0224^2 + 4 \times 0,0256 \times 46}}{2 \times 0,0256} \cong 42,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$H_{B_\tau} = 0,0173 \times 42,7^2 + 0,0599 \times 42,7 + 33 \cong 67,1\text{m}$$

$$\eta_{B_\tau} = -0,158 \times \left(\frac{42,7}{2}\right)^2 + 7,24 \times \left(\frac{42,7}{2}\right) - 6,2 \cong 76,4\%$$

$$\text{NPSH}_R = 0,0075 \times \left(\frac{42,7}{2}\right)^2 + 0,155 \times \left(\frac{42,7}{2}\right) + 2,8 \cong 9,6\text{m}$$

$$N_{B_{1\tau}} = \frac{998,2 \times 9,8 \times \left(\frac{42,7}{2 \times 3600}\right) \times 67,1}{0,764} \cong 5095,3\text{W}$$

Verificação do fenômeno de cavitação

Determinação da pressão de vapor segundo a tabela da KSB

Temperatura °C	Pressão de vapor		Peso específico (kgf/dm ³)
	mm Hg	kgf/cm ²	
15	12,7	0,0174	0,999
20	17,4	0,0238	0,998
25	23,6	0,0322	0,997
30	31,5	0,0429	0,996
35	41,8	0,0572	0,994
40	54,9	0,0750	0,992
45	71,4	0,0974	0,990
50	92,0	0,1255	0,988
55	117,5	0,1602	0,986
60	148,8	0,2028	0,983
65	186,9	0,2547	0,981
70	233,1	0,3175	0,978
75	288,5	0,3929	0,975
80	354,6	0,4828	0,972
85	433,0	0,5894	0,969
90	525,4	0,7149	0,965
95	633,7	0,8620	0,962
100	760,0	1,0333	0,958
105	906,0	1,2320	0,955
110	1075,0	1,4609	0,951
115	1269,0	1,7260	0,947
120	1491,0	2,0270	0,943

Verificação da cavitação para uma das bombas

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = z_{\text{inicial}} + \frac{P_{\text{inicial}_{\text{abs}}} - P_{\text{vapor}}}{\gamma} - H_{P_{\text{aB}}}$$

$$z_{\text{inicial}} = -1 \text{ m}$$

$$P_{\text{inicial}_{\text{abs}}} = 700 \text{ mmHg} \cong 93325,7 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{vapor}} = 0,0238 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} (\text{abs}) \cong 2332,4 \text{ Pa}$$

$$H_{P_{\text{aB}}} = 0,0211 \times 272164,4 \times \left(\frac{42,7}{3600} \right)^2 \cong 0,808 \text{ m}$$

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = -1 + \frac{93325,7 - 2332,4}{998,2 \times 9,8} - 0,808 \rightarrow \text{NPSH}_{\text{disp}} \cong 7,5 \text{ m}$$

Verificação do fenômeno

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} - \text{NPSH}_{\text{req}} = 7,5 - 9,6$$

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} - \text{NPSH}_{\text{req}} = -2,1 \text{ m}$$

Está ocorrendo o
fenômeno de
cavitação



Extra

Escreva a equação da CCI para o funcionamento de uma única bomba e compare com a CCI da associação em paralelo.