

Nona aula de ME5330

Segundo semestre de 2014



Gostaria de iniciar esta aula recordando a atividade proposta na bancada da sala E039 do Centro Universitário da FEI



Esta bancada que ficou pronta em Julho de 1999 e foi projetada e montada por um grupo de alunos.

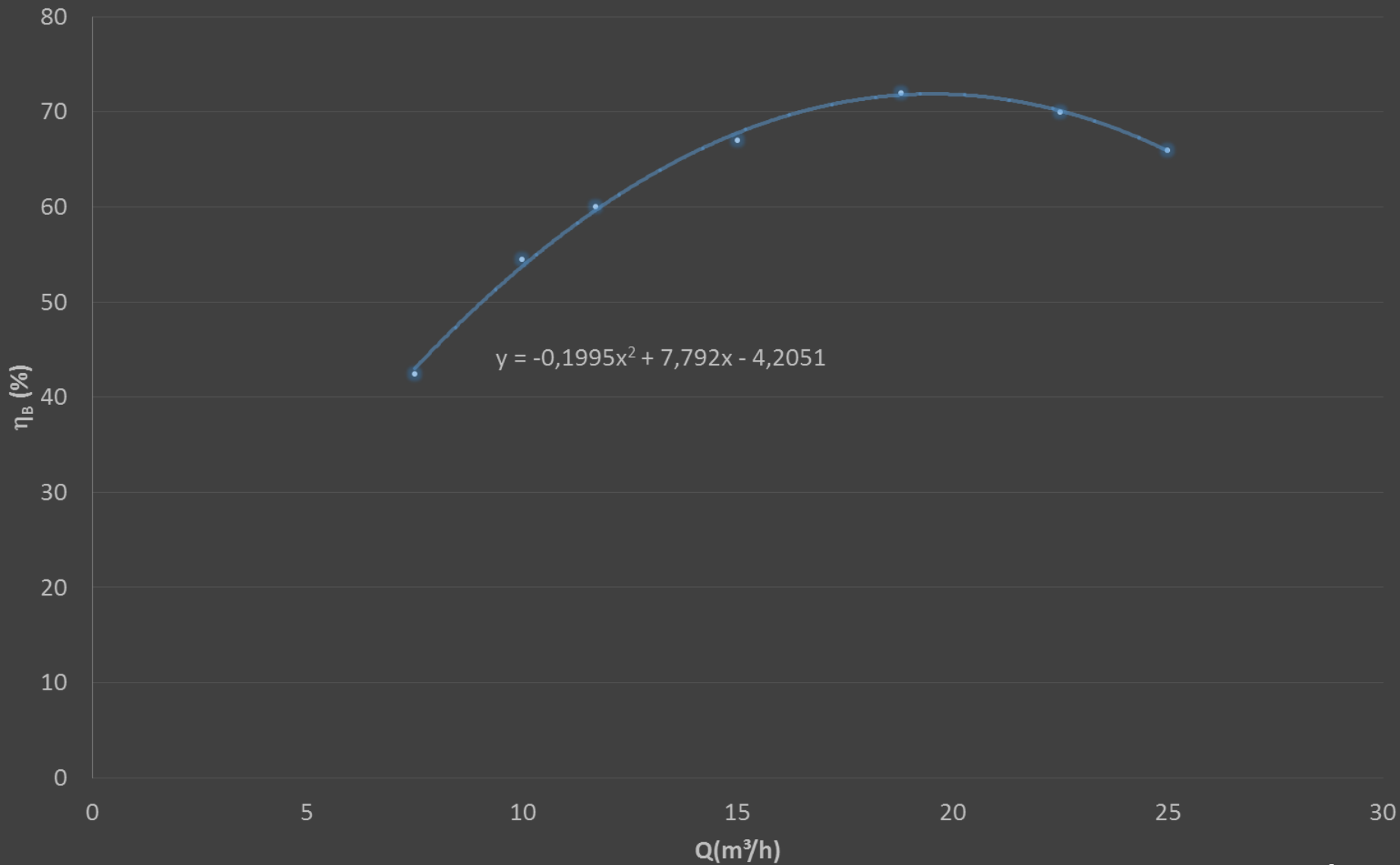
Agradecemos aos ex-alunos: **Alexandre Martins Sousa** (*Mecânica – Automobilística*), **Fernando Augusto Callado** (*Mecânica – Produção*) e **Marcelo Dietrich Martini** (*Mecânica - Produção*), formados em Julho/2000. Agradecemos também a **Newtronic** que doou o variador de frequência e a **Mark** que fez a doação da bomba utilizada. A fábrica da **Mark** foi adquirida pela **Grundfos**, atual **Grundfos-Mark**.



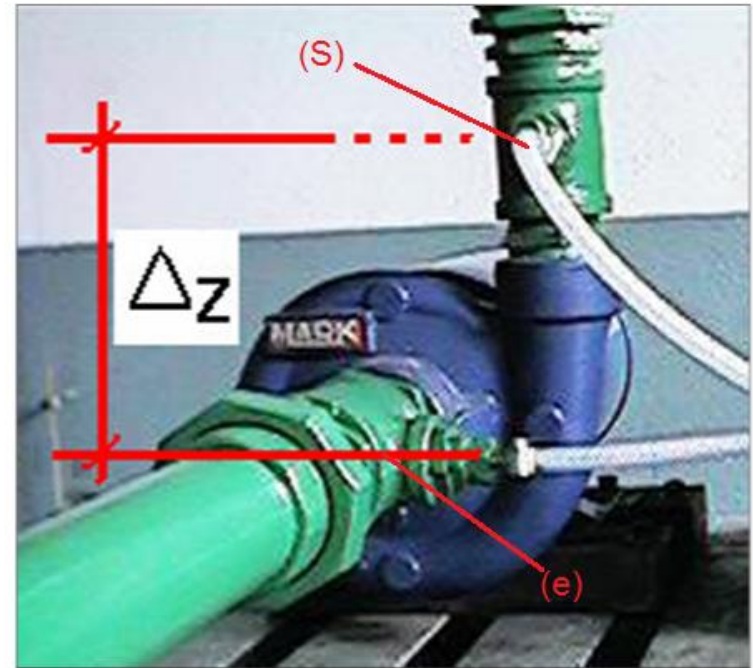
Ao construir as curvas $H_B = f(Q)$ para 60 Hz e 50 Hz, vamos procurar comprovar que a utilização do inversor trará uma redução na potência consumida e para viabilizar isto no próximo slide é dada a curva do rendimento da bomba em função da vazão.

Curva de Rendimento - DBC/MARK

3500rpm da MARK - $\phi 105\text{mm}$



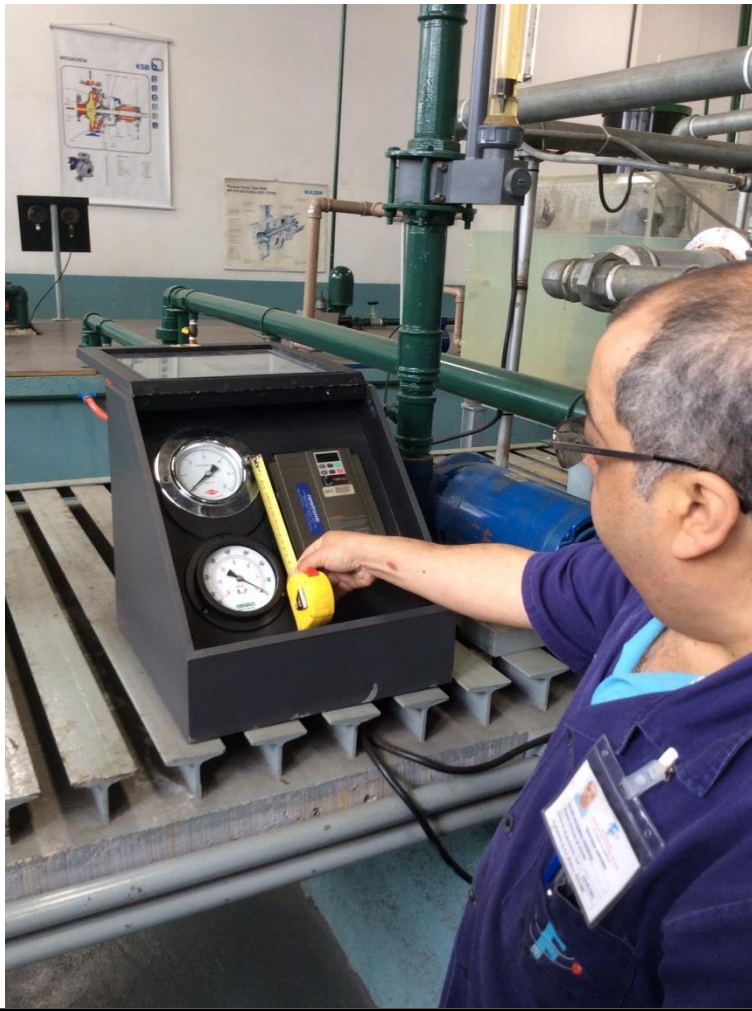
Obtenção da carga manométrica



$$H_e + H_B = H_s \therefore H_B = (z_s - z_e) + \frac{p_s - p_e}{\gamma} + \frac{\alpha_s v_s^2 - \alpha_e v_e^2}{2g}$$

Manômetros alinhados, portanto:

$$P_{m_e} = P_e \rightarrow P_{m_s} = P_s$$



Calculando a H_B

$$H_B = (z_s - z_e) + \frac{p_{m_s} - p_{m_e}}{\gamma} + \frac{\alpha_s v_s^2 - \alpha_e v_e^2}{2g} \rightarrow v = \frac{Q}{A}$$

(e) \rightarrow sucção \rightarrow 2" aço 40 $\rightarrow D_{int} = 52,5\text{mm} \rightarrow A = 21,7\text{cm}^2$

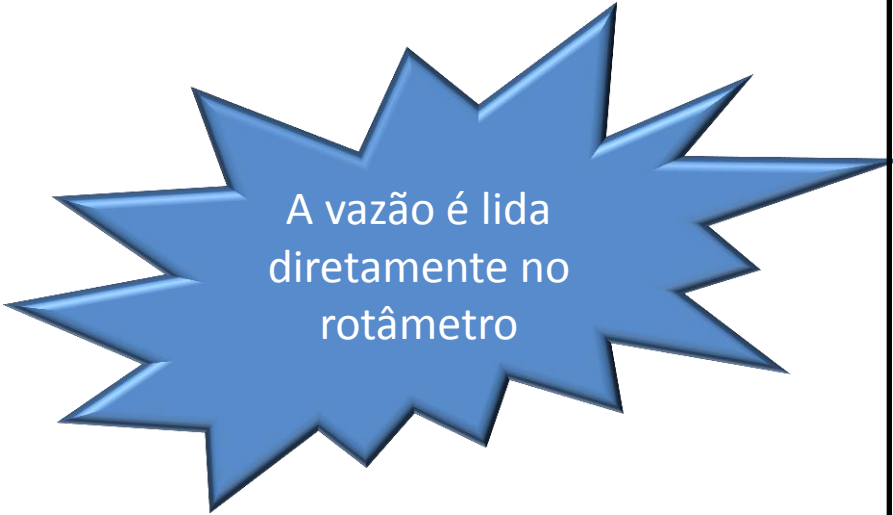
(s) \rightarrow recalque \rightarrow 1,5" aço 40 $\rightarrow D_{int} = 40,8\text{mm} \rightarrow A = 13,1\text{cm}^2$

$$z_s - z_e = 15,5\text{cm}$$

$$1\text{mmHg} = 1 \times 10^{-3} \times 9,8 \times 13600\text{Pa}$$

$$1\text{mmHg} = 133,28\text{Pa}$$

$$1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 9,8 \times 10^4 \text{Pa}$$



A vazão é lida diretamente no rotâmetro

Calculando a H_B

$$H_B = (z_s - z_e) + \frac{p_{m_s} - p_{m_e}}{\gamma} + \frac{\alpha_s v_s^2 - \alpha_e v_e^2}{2g}$$

$$H_B = 0,155 + \frac{p_{m_s} \times 98000 - p_{m_e} \times 133,28}{998,2 \times 9,8} + \frac{1 \times v_s^2 - 1 \times v_e^2}{19,6}$$

temperatura dos fluidos 20 ⁰ C				$\rho_{\text{água}}$	ρ_{Hg}	g	$V_{\text{água}}$	
				(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m/s ²)	(m ² /s)	
				998,2	13546	9,8	1,00E-06	
dados da tubulações				Entrada		Saída		
				D_{int} (mm)	A (cm ²)		D_{int} (mm)	A (cm ²)
				52,5	21,7		40,8	13,1

Exemplo de tabela de dados

Experiência do inversor de frequência – primeira parte

Frequência de 60 Hz					Frequência de 50 Hz			
	Q	p_{me}	p_{ms}	n	Q	p_{me}	p_{ms}	n
Ensaio	(m ³ /h)	(mmHg)	(kgf/cm ²)	(rpm)	(m ³ /h)	(mmHg)	(kgf/cm ²)	(rpm)
1	0	-30	2,5	3550	0	-30	1,7	2967
2	5	-90	2,5	3519	4,25	-80	1,66	2946
3	6,5	-100	2,45	3514	5	-90	1,65	2944
4	8	-120	2,4	3509	6,5	-110	1,6	2941
5	10	-150	2,35	3504	8	-120	1,6	2937
6	12,5	-190	2,2	3493	10	-150	1,5	2931
7	15,5	-250	2	3485	12,5	-200	1,35	2925
8	17,5	-300	1,8	3477	14,5	-250	1,2	2921
Frequência de 60 Hz					Frequência de 50 Hz			

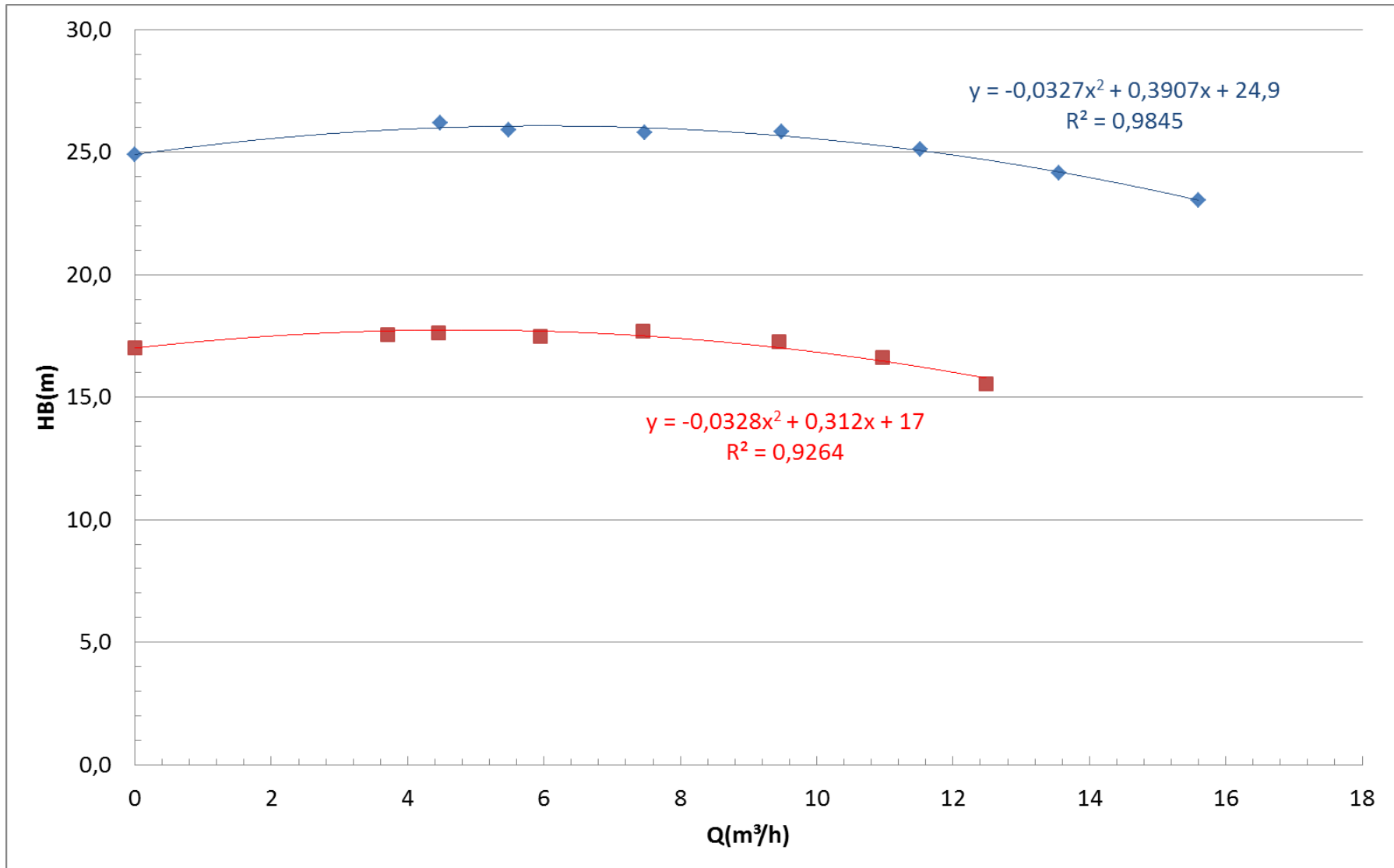
Pelo Excel

Frequência de 60 Hz					Frequência de 50 Hz			
	Q _{exp}	v _e	v _s	Re _e	Q _{exp}	v _e	v _s	Re _e
Ensaio	(m ³ /h)	(m/s)	(m/s)		(m ³ /h)	(m/s)	(m/s)	
1	0	0	0		0	0	0	
2	5	0,640	1,060	33468,3	4,25	0,544	0,901	28448,0
3	6,5	0,832	1,4	43508,8	5	0,640	1,060	33468,3
4	8	1,024	1,7	53549,2	6,5	0,832	1,4	43508,8
5	10	1,3	2,1	66936,6	8	1,024	1,7	53549,2
6	12,5	1,6	2,7	83670,7	10	1,3	2,1	66936,6
7	15,5	2,0	3,3	103751,7	12,5	1,6	2,7	83670,7
8	17,5	2,2	3,7	117139,0	14,5	1,9	3,1	97058,0

Pelo Excel

Ensaio	Frequência de 60 Hz				Frequência de 50 Hz			
	Q _{exp} (m ³ /h)	H _{Bexp} (m)	Q ₃₅₀₀ (m ³ /h)	H _{B3500} (m)	Q _{exp} (m ³ /h)	H _{Bexp} (m)	Q ₂₉₁₆ (m ³ /h)	H _{B2916} (m)
1	0	25,6	0	24,9	0	17,6	0	17,0
2	4,5	26,5	4,5	26,2	3,75	17,9	3,7	17,5
3	5,5	26,1	5,5	25,9	4,5	18,0	4,5	17,6
4	7,5	25,9	7,5	25,8	6	17,8	5,9	17,5
5	9,5	25,9	9,5	25,8	7,5	18,0	7,4	17,7
6	11,5	25,0	11,5	25,1	9,5	17,5	9,5	17,3
7	13,5	23,9	13,6	24,2	11	16,7	11,0	16,6
8	15,5	22,7	15,6	23,0	12,5	15,6	12,5	15,5

Curvas obtidas através da experiência

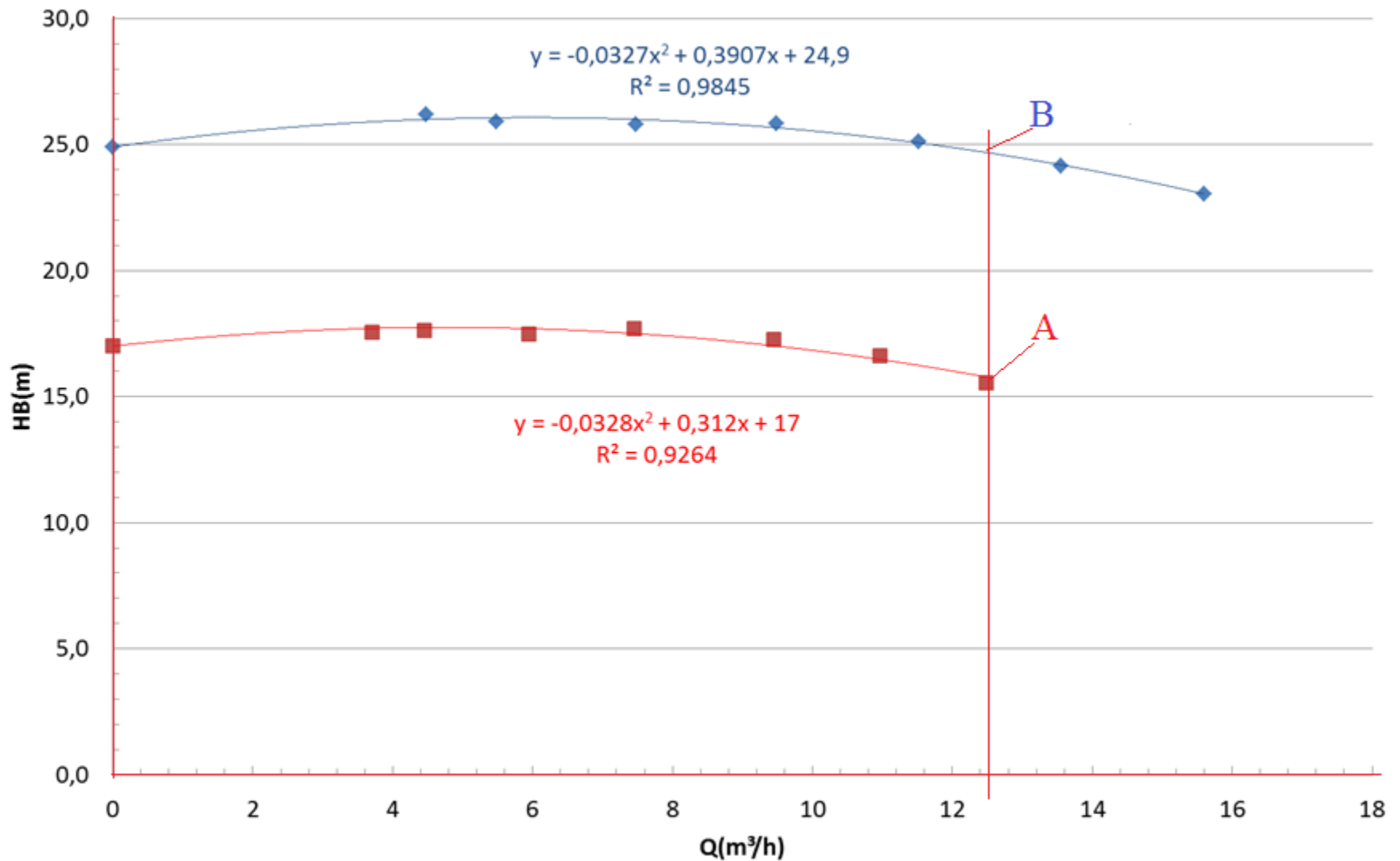




Neste ponto,
calculamos a potência
nominal da bomba
tanto para 60 Hz
(3500 rpm) como para
50 Hz (2916 rpm), isto
para a vazão máxima
obtida em 50 Hz

Seriam os pontos A e
B representados a
seguir.

Pontos para os cálculos das potências nominais da bomba a 60 e 50 Hz



O ponto B é obtido com a válvula controladora fechada parcialmente, já o ponto A é obtido com a válvula totalmente aberta!



$$Q_A = Q_B = 12,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$H_{B_A} = 15,6\text{m}$$

$$H_{B_B} = -0,0327 \times 12,5^2 + 0,3907 \times 12,5 + 24,9 \cong 24,7\text{m}$$

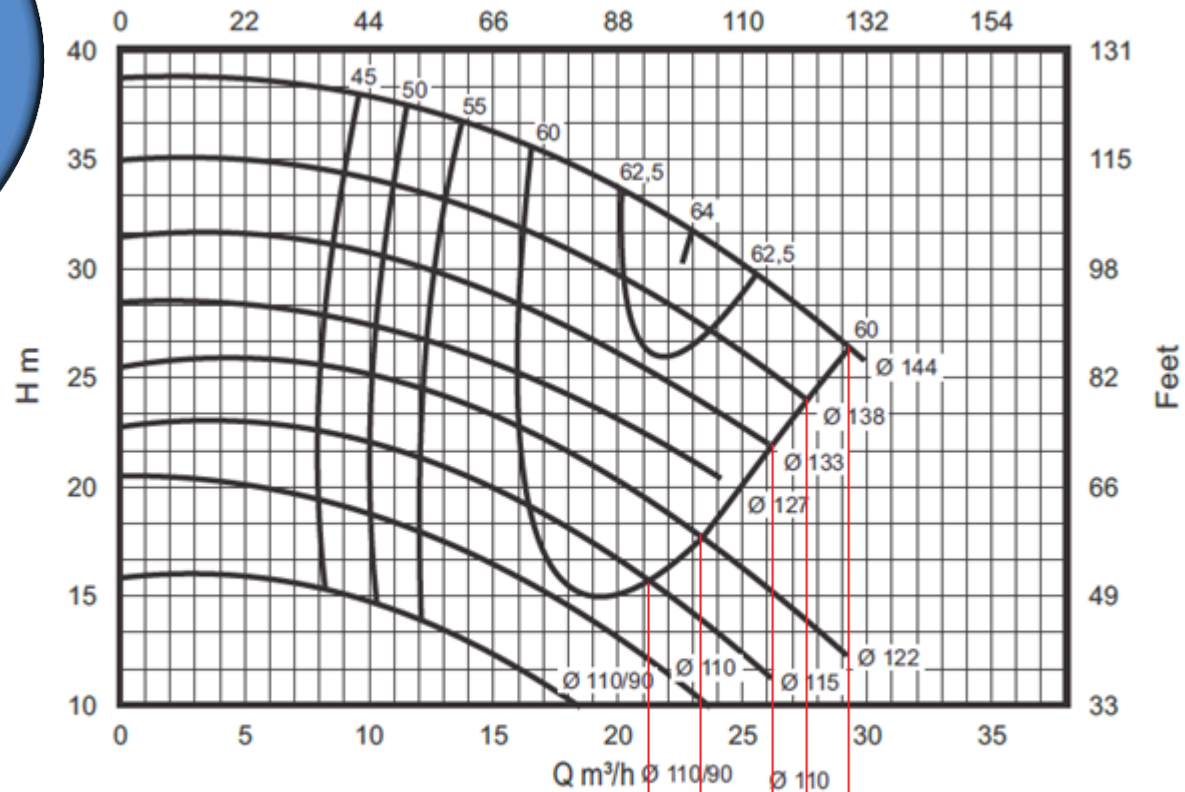
$$\eta_{B_B} = -0,1995 \times 12,5^2 + 7,792 \times 12,5 - 4,2051 \cong 62\%$$

$$N_{B_B} = \frac{998,2 \times 9,8 \times \left(\frac{12,5}{3600}\right) \times 24,7}{0,62} \cong 1353,2\text{W}$$

O rendimento do ponto B deve ser determinado com auxílio da análise dimensional



O gráfico ao lado
fornecido pelo
fabricante justifica o
porque devemos
recorrer a análise
dimensional.



**vazões diferentes para o mesmo
rendimento**

$$\frac{Q_{B60\text{Hz}}}{3500 \times D_R^3} = \frac{Q_{B50\text{Hz}}}{2916 \times D_R^3}$$

$$Q_{B60\text{Hz}} = 12,5 \times \frac{3500}{2916} \cong 15,04 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Recorremos ao
coeficiente de
vazão.

$$\eta_{BB} = -0,1995 \times 15,04^2 + 7,792 \times 15,04 - 4,2051 \cong 67,8\%$$

$$\eta_{BB} = \eta_{BA}$$

$$N_{BA} = \frac{998,2 \times 9,8 \times \left(\frac{12,5}{3600} \right) \times 15,5}{0,678} \cong 776,6\text{W}$$



Portanto
ocorreu uma
redução de
cerca de 56,4%
na potência
nominal da
bomba



A partir deste ponto deveríamos fazer uma análise financeira e ambiental, pois verificaríamos o tempo de amortização do investimento inicial na compra e instalação do inversor de frequência com a redução do custo da energia e aí entra também a parte ambiental

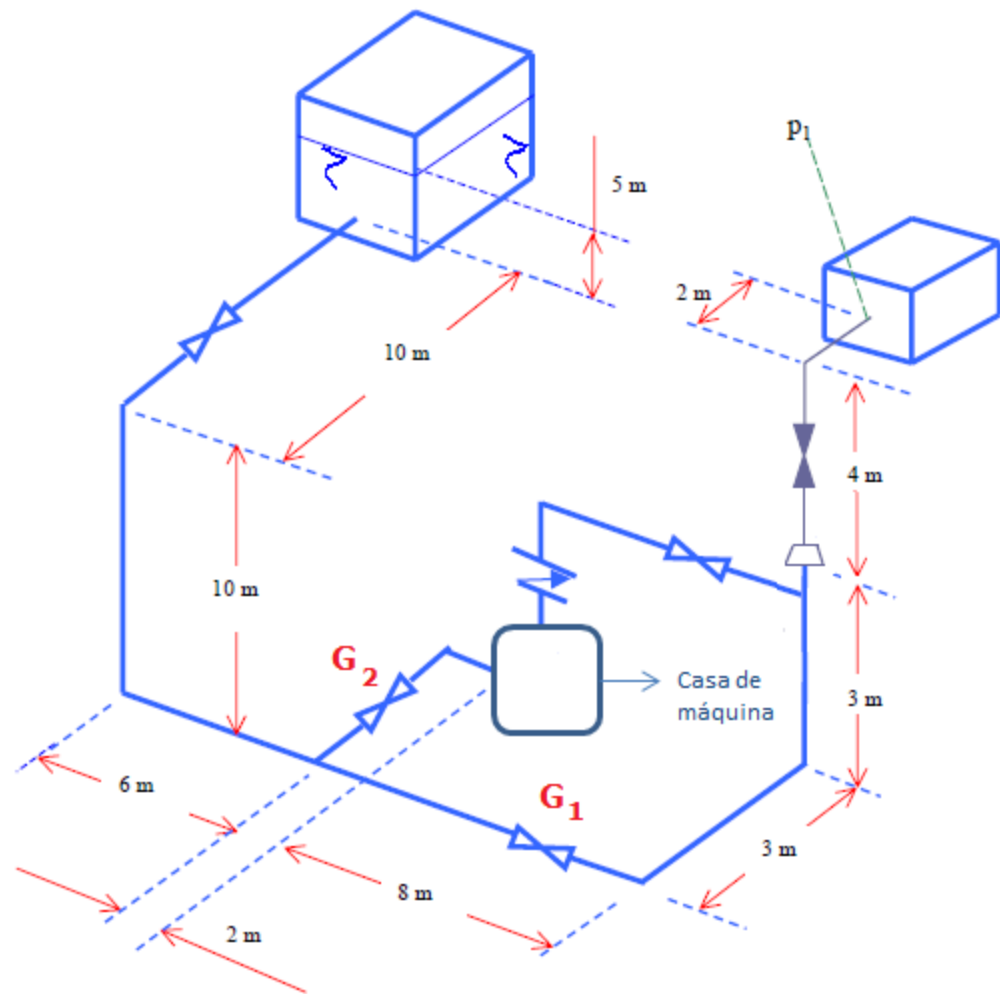


Principalmente porque a geração de energia no Brasil em grande parte está alicerçada em hidroelétricas!



770 - A instalação da figura deve atender um tanque de processo e a pressão na entrada deste tanque (1) deve ser $p_1 = 1,5 \text{ kgf / cm}^2$, se o escoamento for por gravidade (G_2 - fechada). A bomba H 50 - C com diâmetro de rotor igual a 214 mm será acionada sempre que o processo exigir uma pressão $p_1 = 3,5 \text{ kgf/cm}^2$ (G_1 - fechada). Pede-se:

- a equação da CCI para as duas possibilidades mencionadas acima;
- o ponto de trabalho para as possibilidades de funcionamento da instalação



Nota: — = 3" Sch 40

— = 2" Sch 40

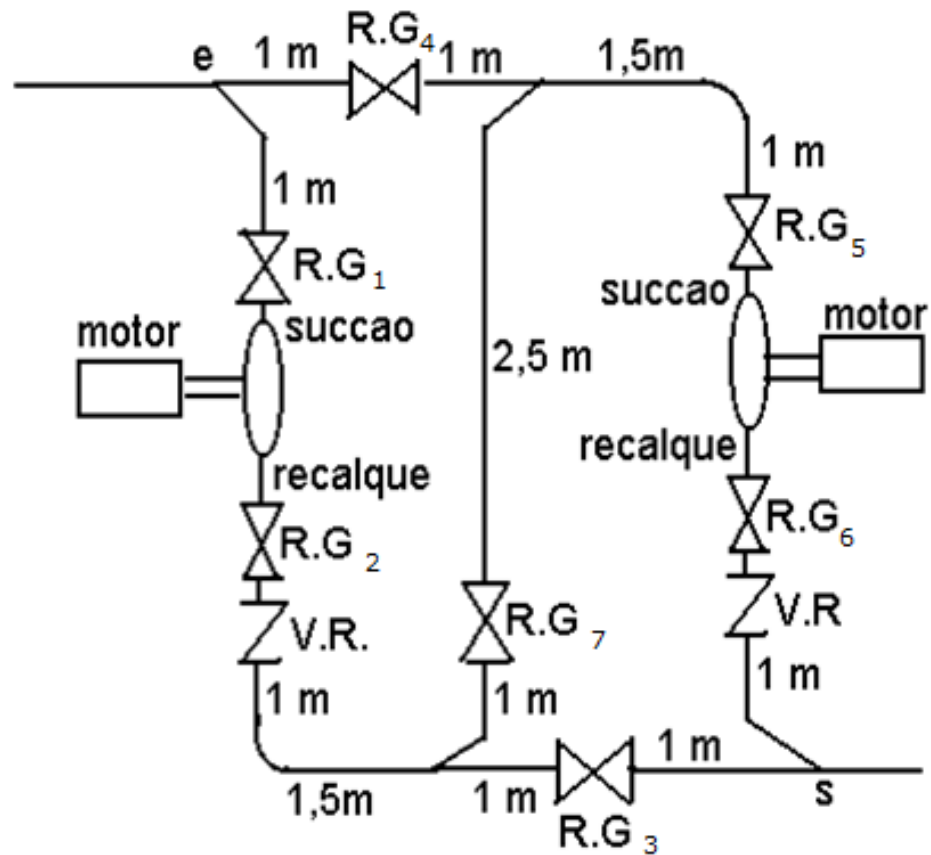
A tabela a seguir fornece os valores para a bomba com diâmetro do rotor 214 mm

$Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$H_B \text{ (m)}$	17,2	17,2	17	16,5	16	15	13,5	12	9	5,5	3
$\eta_B \text{ (\%)}$	-	-	35	46	55	57,5	60	57,5	46	-	-



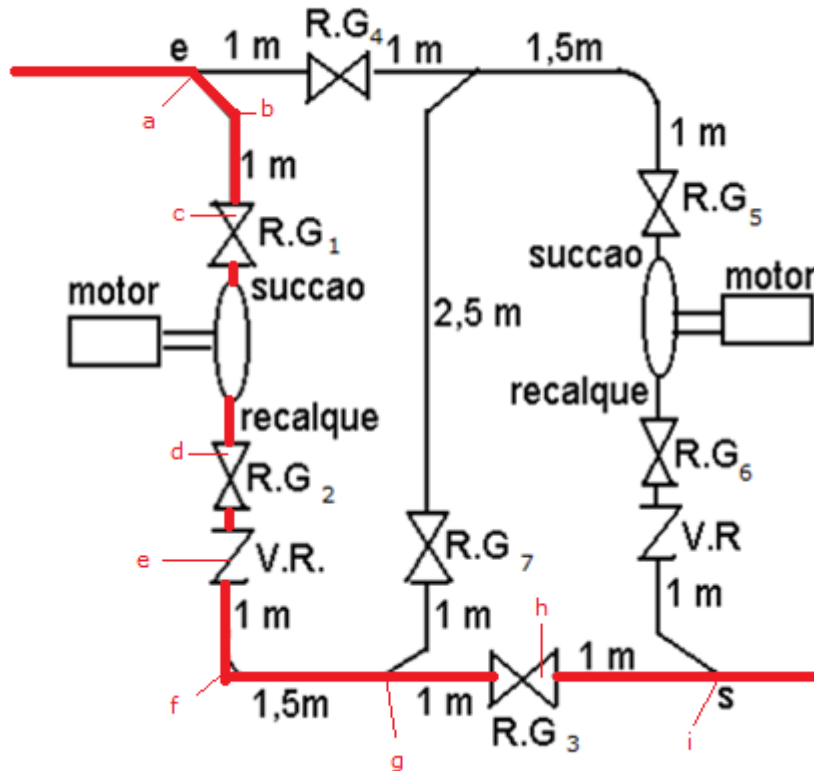
Considere a água a 22°C e a rugosidade equivalente do aço igual a 4,6e-5m.

Casa de máquina



PRIMEIRA POSSIBILIDADE DE FUNCIONAMENTO: REGISTROS GAVETAS FECHADOS: 4, 5, 6 E 7 E REGISTROS GAVETAS ABERTOS: 1, 2 E 3. Nesse caso opera-se com uma só bomba.

LEGENDA



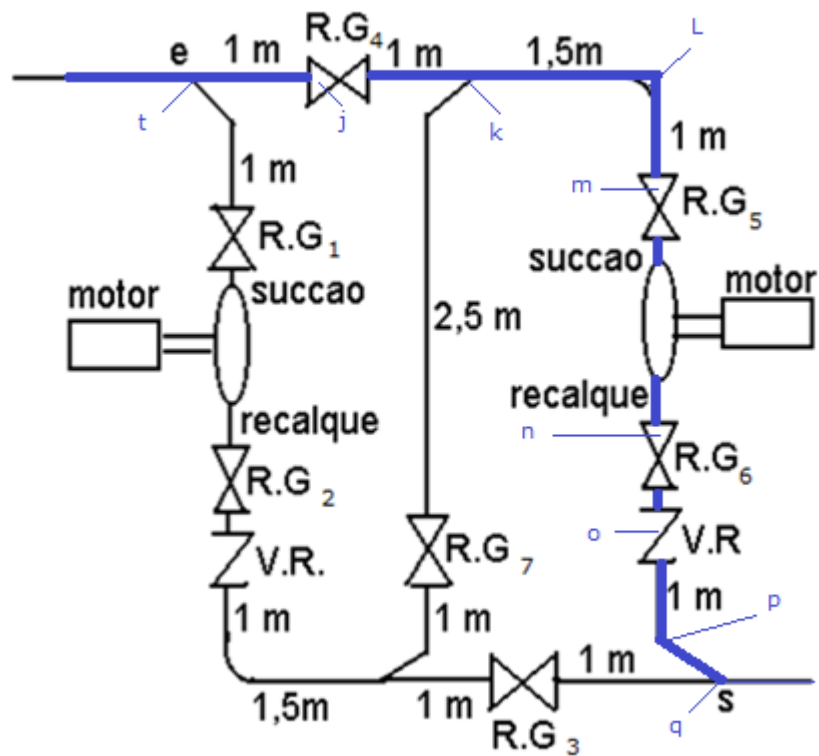
- a = tê de saída de lado (Tupy)
- b = joelho (fêmea) de 90° (Tupy)
- c, d, h = registros ou válvulas gaveta (Mipel)
- e = válvula de retenção com portinhola (Mipel)
- f = curva (fêmea) de 90° (Tupy)
- g, i = tê de passagem direta (Tupy)

Singularidades	Diâmetro nominal	Leq (m)
a	3"	4,11
b	3"	2,82
c, d, h	3"	1,03
e	3"	3,95
f	3"	1,64
g, i	3"	0,50

$L_{CM} = 5,5 \text{ m e a}$
 $\Sigma leq = 16,61 \text{ m}$

SEGUNDA POSSIBILIDADE DE FUNCIONAMENTO: REGISTROS GAVETAS FECHADOS: 1, 2, 3 E 7 E REGISTROS GAVETAS ABERTOS: 4, 5 E 6. Nesse caso opera-se com uma só bomba.

LEGENDA



t, k = tê de passagem direta (Tupy)

p = joelho (fêmea) de 90° (Tupy)

j, m, n = registros ou válvulas gaveta (Mipel)

o = válvula de retenção com portinhola (Mipel)

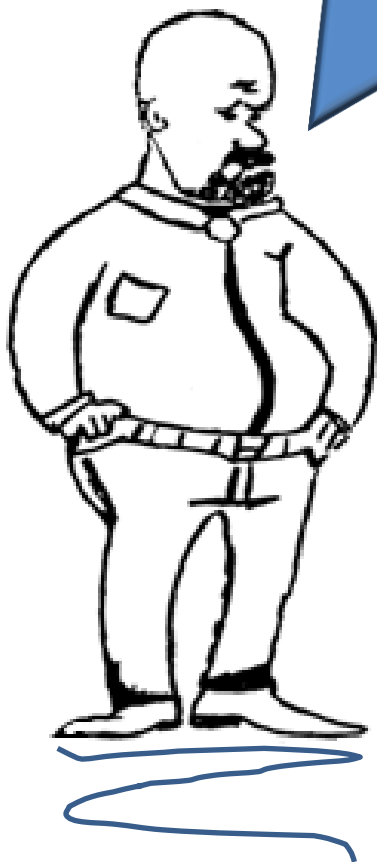
L = curva (fêmea) de 90° (Tupy)

q = tê de passagem de lado (Tupy)

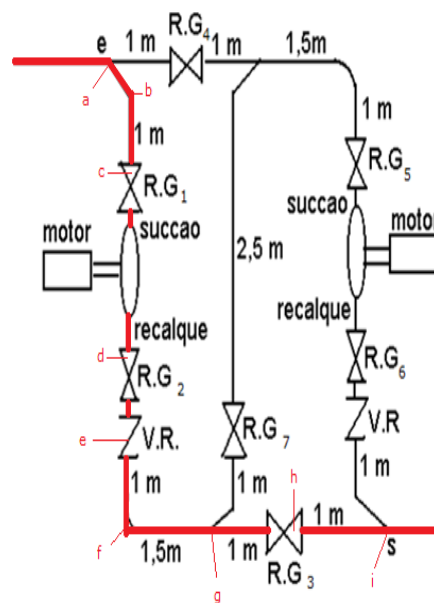
Singularidades	Diâmetro nominal	Leq (m)
q	3"	4,11
p	3"	2,82
j, m, n	3"	1,03
o	3"	3,95
L	3"	1,64
t, k	3"	0,50

$L_{CM} = 5,5 \text{ m e a}$
 $\Sigma leq = 16,61 \text{ m}$

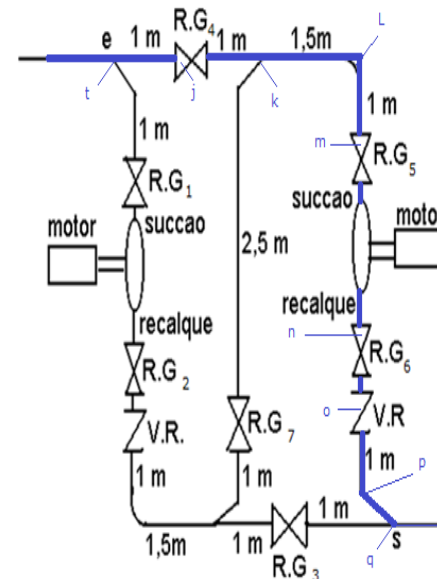
EM RELAÇÃO A CASA DE MÁQUINA AS
DUAS POSSIBILIDADES SÃO IDÊNTICAS,
POIS EM AMBAS SE TEM O MESMO
COMPRIMENTO TOTAL DE TUBULAÇÃO E
A MESMA SOMATÓRIA DE
COMPRIMENTOS EQUIVALENTES.

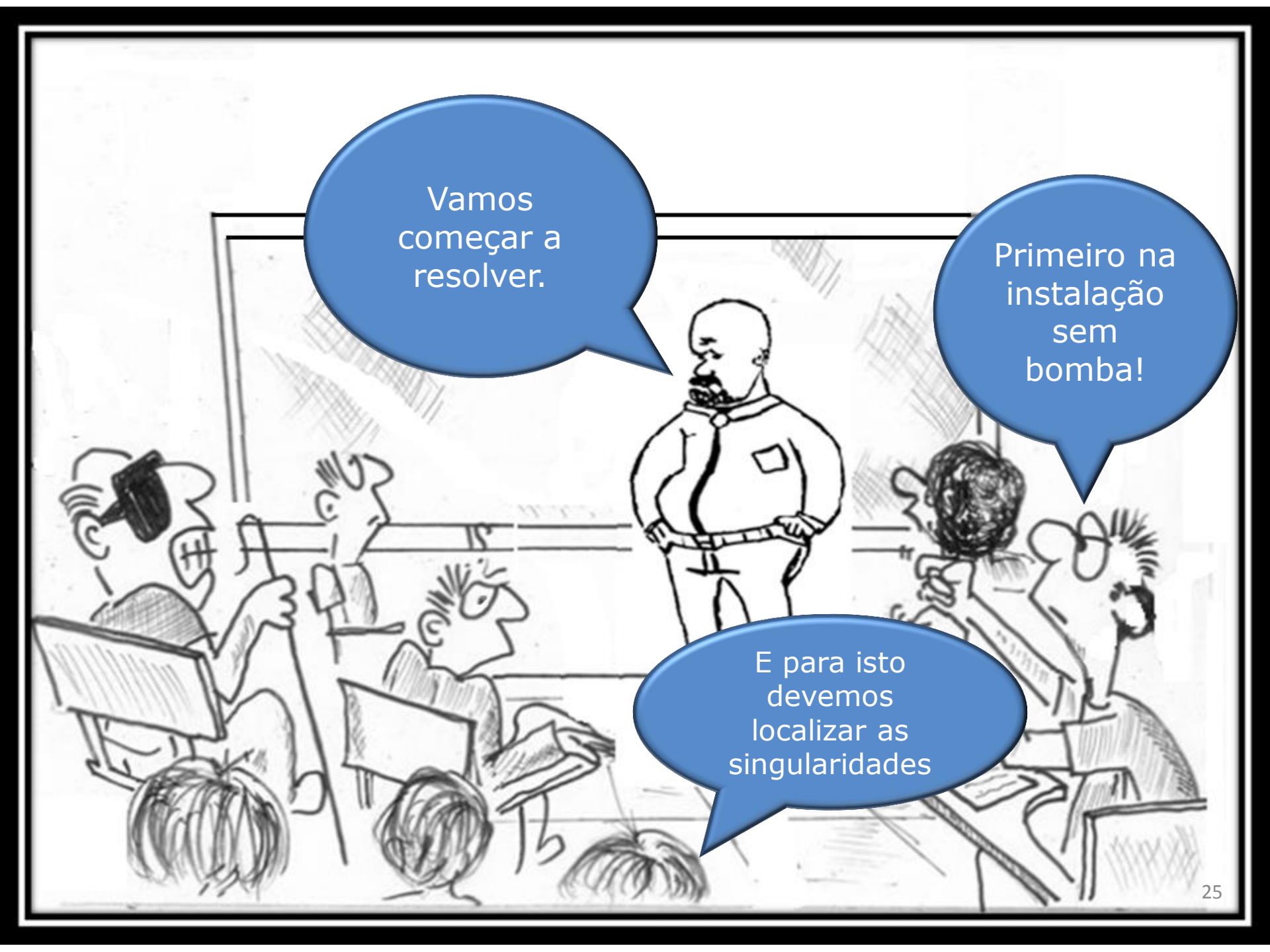


Primeira
possibilidade



Segunda
possibilidade

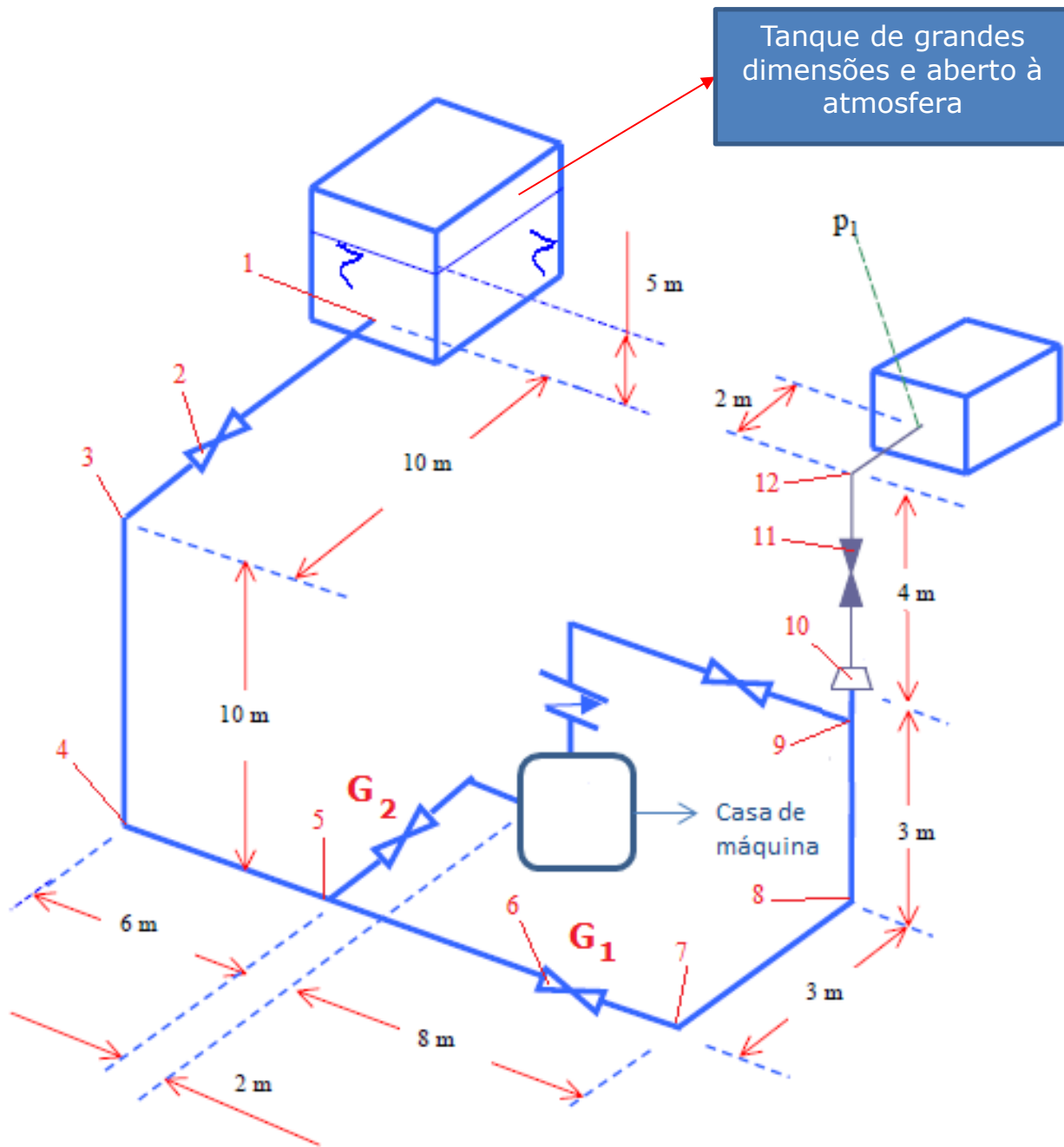




Vamos
começar a
resolver.


Primeiro na
instalação
sem
bomba!

E para isto
devemos
localizar as
singularidades



Número	Singularidade
1	Saída normal de reservatório
2	Válvula gaveta
3	Joelho fêmea de 90°
4	Joelho fêmea de 90°
5	Tê de passagem direta
6	Válvula gaveta
7	Joelho fêmea de 90°
8	Joelho fêmea de 90°
9	Tê de passagem direta
10	Redução de 3 para 2"
11	Válvula globo reta sem guia
12	Joelho fêmea de 90°

Número	Singularidade	Leq (m)	Referência	D _N	Dint (mm)	A (cm ²)
1	Saída normal de reservatório	1,1	Tupy	3"	77,9	47,7
2	Válvula gaveta	1,03	Mipel	3"	77,9	47,7
3	Joelho fêmea de 90 ⁰	2,82	Tupy	3"	77,9	47,7
4	Joelho fêmea de 90 ⁰	2,82	Tupy	3"	77,9	47,7
5	Tê de passagem direta	0,50	Tupy	3"	77,9	47,7
6	Válvula gaveta	1,03	Mipel	3"	77,9	47,7
7	Joelho fêmea de 90 ⁰	2,82	Tupy	3"	77,9	47,7
8	Joelho fêmea de 90 ⁰	2,82	Tupy	3"	77,9	47,7
9	Tê de passagem direta	0,50	Tupy	3"	77,9	47,7
10	Redução de 3 para 2"	0,70	Tupy	2"	52,5	21,7
11	Válvula globo reta sem guia	17,68	Mipel	2"	52,5	21,7
12	Joelho fêmea de 90 ⁰	1,88	Tupy	2"	52,5	21,7

A black and white cartoon illustration of a classroom. A bald lecturer with a beard stands at the front, looking thoughtful. He is surrounded by several students sitting at desks. One student on the left is looking at a book, while others on the right are looking towards the lecturer. A large blue speech bubble is positioned above the lecturer, and a smaller one is below him. The background shows a chalkboard with some faint lines.

Como as uniões tem comprimentos equivalentes muito pequenos ($0,01\text{ m}$), poderíamos até desprezá-las, mas vamos considerar a existência de 1 apenas.

Eta
precisão!

Situação 1 = válvula 2 fechada e a 1 aberta

$$H_{\text{estática}} = (7 - 15) + \left(\frac{1,5 \times 10^4 \times 9,8 - 0}{997,8 \times 9,8} \right)$$

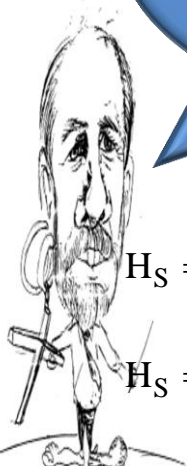
$$H_{\text{estática}} \cong 7,1\text{m}$$


Como a carga estática deu positiva, podemos afirmar que não existe o escoamento em queda livre.

A equação abaixo mostra a equação da CCI supondo instalação sem bomba (válvula G₂ fechada).

$$H_S = 7,1 + \frac{Q^2}{19,6 \times (21,7 \times 10^{-4})^2} + f_{3''} \times \frac{(42 + 15,45)}{0,0779} \times \frac{Q^2}{19,6 \times (47,7 \times 10^{-4})^2} + f_{2''} \times \frac{(6 + 20,26)}{0,0525} \times \frac{Q^2}{19,6 \times (21,7 \times 10^{-4})^2}$$

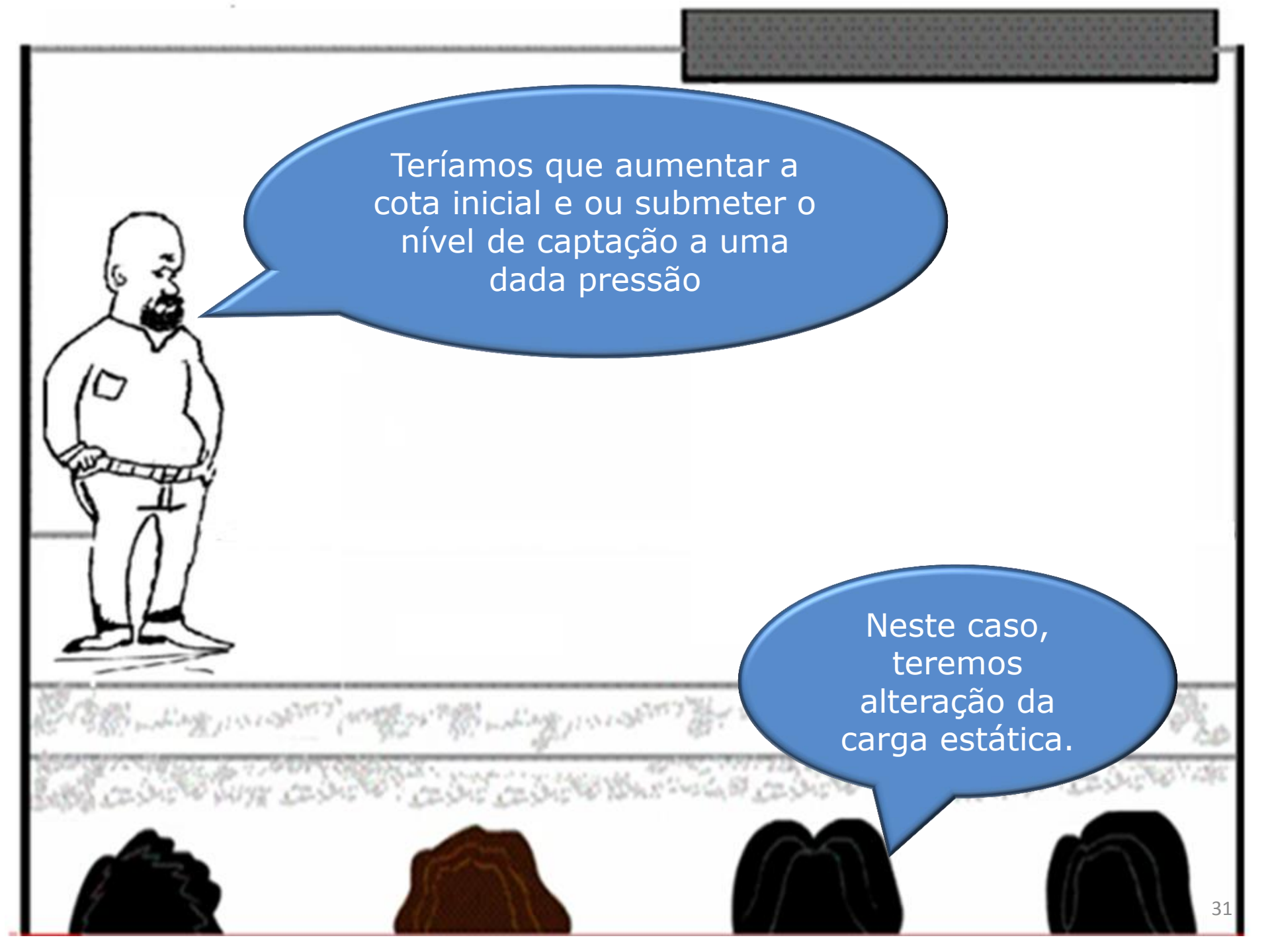
$$H_S = 7,1 + 10834,9 \times Q^2 + f_{3''} \times 1653711,5 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2$$





Como a carga estática de positiva concluimos que não existe o escoamento em queda livre.

E como poderia funcionar sem bomba?



Teríamos que aumentar a cota inicial e ou submeter o nível de captação a uma dada pressão

Neste caso, teremos alteração da carga estática.



Isto mesmo. Exemplo: supondo que seja viável fechar o reservatório de captação e sobre o nível d'água impor uma pressão inicial (p_i) através da injeção de um ar comprimido, pede-se determinar o valor da pressão inicial para se ter uma vazão de queda livre igual a $25 \text{ m}^3/\text{h}$.

Este é praticamente um exercício extra, seria o 78!

Exatamente.

$$H_{\text{estática}} = (7 - 15) + \left(\frac{1,5 \times 10^4 \times 9,8 - p_i}{997,8 \times 9,8} \right)$$

$$H_{\text{estática}} \cong 7,1 - \frac{p_i}{997,8 \times 9,8}$$

$$H_S = 7,1 - \frac{p_i}{9778,44} + 10834,9 \times Q^2 + f_{3''} \times 1653711,5 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2$$



No caso de existir a vazão de queda livre temos $H_s = 0$

$$0 = 7,1 - \frac{P_i}{9778,44} + 10834,9 \times Q^2 + f_{3''} \times 1653711,5 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2$$

$$\frac{P_i}{9778,44} = 7,1 + 10834,9 \times \left(\frac{25}{3600}\right)^2 + f_{3''} \times 1653711,5 \times \left(\frac{25}{3600}\right)^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times \left(\frac{25}{3600}\right)^2$$

$$\frac{P_i}{9778,44} = 7,622516397 + f_{3''} \times 79,75074749 + f_{2''} \times 261,3574605$$

Portanto, devemos calcular $f_{2''}$ e $f_{3''}$



propriedades do fluido transportado

temp (°C)		μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	pv (Pa)	v (m ² /s)
22		9,55E-04	997,8		9,570E-07

propriedades do local

g = m/s²
 patm = Pa

mat. tubo
aço

	Dint (mm)	A (cm ²)
espessura	52,5	21,7

K(m)	DH/k
4,60E-05	1141

Legenda

- deve ser preenchida
- será calculada
- preenchimento opcional
- copiado de outra planilha



Este é o f₂"

Q Q(m³/s) Q(L/s) Q(L/min)
 deve transformar para
 m³/h m³/h
 25,0

Q(m ³ /h)	v(m/s)	Re	f _{Haaland}	f _{Swamee e Jain}	f _{Churchill}	f _{planilha}
25,0	3,20	175560	0,0205	0,0209	0,0209	0,0207

propriedades do fluido transportado

temp (°C)		μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	pv (Pa)	v (m ² /s)
22		9,55E-04	997,8		9,570E-07

propriedades do local

g = m/s²
 patm = Pa

mat. tubo
aço

espessura	Dint (mm)	A (cm ²)
	77,9	47,7

K(m)	DH/k
4,60E-05	1693

Legenda

- deve ser preenchida
- será calculada
- preenchimento opcional
- copiado de outra planilha



E este é o f_{3"}

Q (L/min)
 Q (m³/s) Q (L/s))
 deve transformar para
 m³/h
 25,0

Q(m ³ /h)	v(m/s)	Re	f _{Haaland}	f _{Swamee e Jain}	f _{Churchill}	f _{planilha}
25,0	1,46	118507	0,0200	0,0204	0,0204	0,0203

Tendo os coeficientes de perda de carga distribuída, temos



$$\frac{P_i}{9778,44} = 7,622516397 + 0,0204 \times 79,75074749 + 0,0209 \times 261,3574605$$

$$\therefore p_i \cong 143858,5\text{Pa} \approx 143,9\text{kPa}$$

Com esta pressão a carga estática fica negativa?

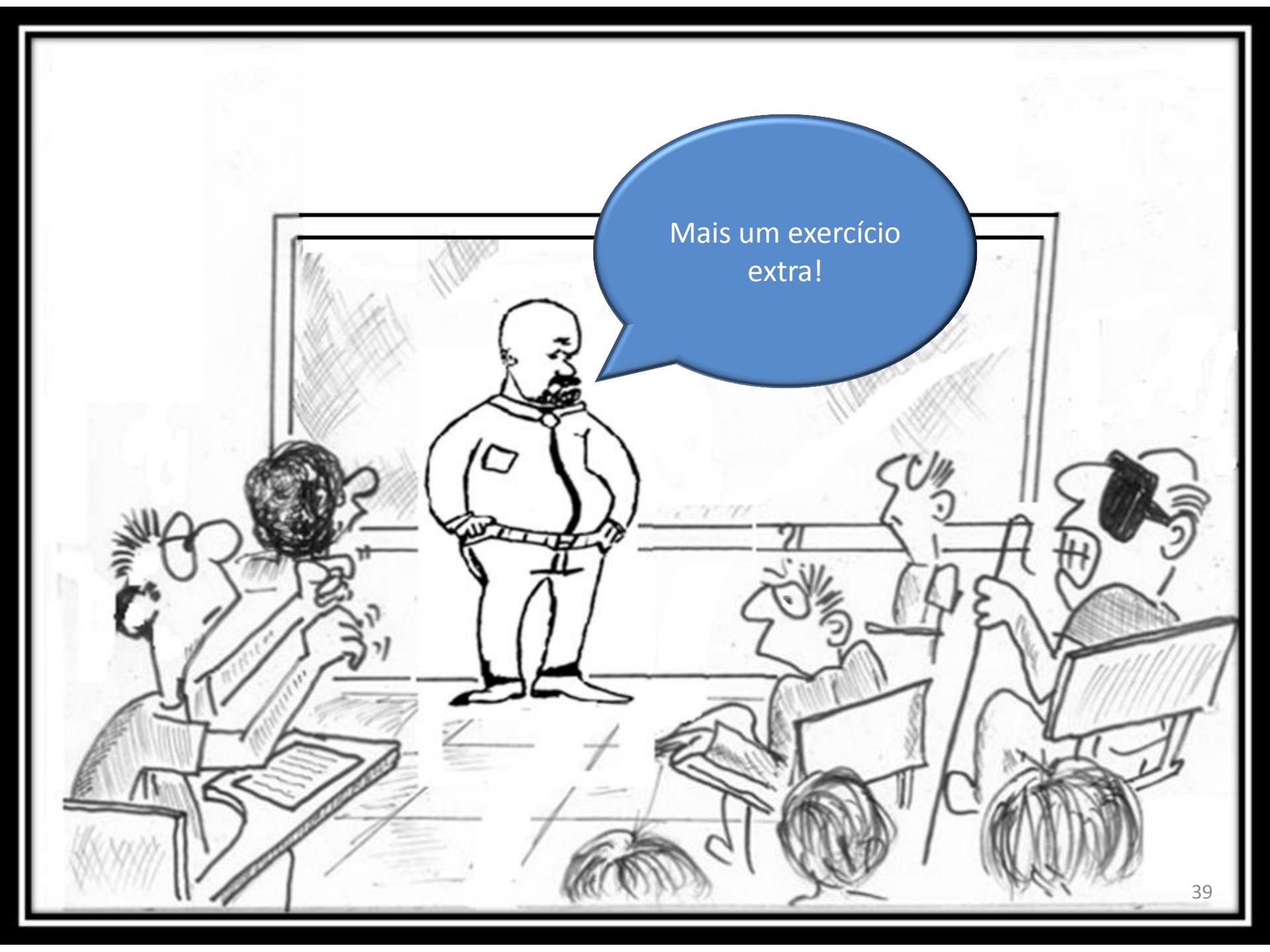
Exatamente



$$H_{\text{estática}} = (7 - 15) + \left(\frac{1,5 \times 10^4 \times 9,8 - 143858,5}{997,8 \times 9,8} \right)$$

$$H_{\text{estática}} \cong -7,7\text{m}$$

E com a carga
estática negativa,
temos a vazão de
queda livre

A black and white cartoon illustration of a classroom. A teacher with a beard and a mustache stands at the front, looking towards the students. A blue speech bubble is positioned above him, containing the text 'Mais um exercício extra!'. Several students are seated at desks, some looking towards the teacher. One student on the right is wearing sunglasses and holding a pencil. The drawing style is simple and expressive, with heavy black lines and some cross-hatching for shading.

Mais um exercício extra!

78A⁰ - Para a situação da pressão inicial ser igual a 143,9 kPa, obtivemos a carga estática igual a - 7,7 m, portanto a CCI seria escrita da seguinte forma:

$$H_S = -7,7 + 10834,9 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2 + f_{3''} \times 1653711,5 \times Q^2$$

Determine a vazão de queda livre.

Este ficará por nossa conta!