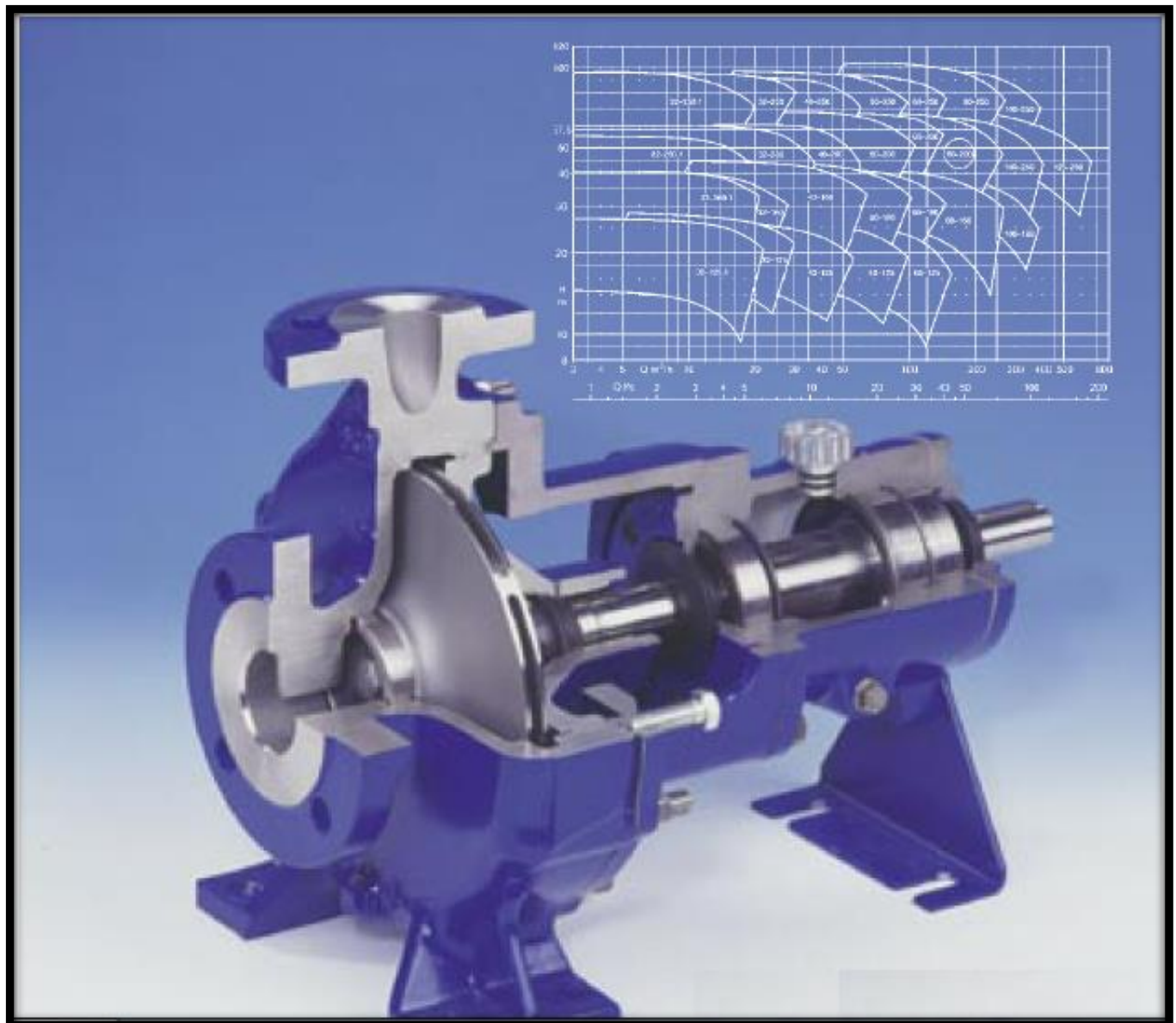




Com as curvas $H_B=f(Q)$; $H_S=f(Q)$ e $\eta_B=f(Q)$ podemos refletir sobre o ponto de trabalho obtido ($H_B=H_S$) e compará-lo com o que recomenda o fabricante da bomba.



E qual é o ponto de trabalho recomendado pelo fabricante?

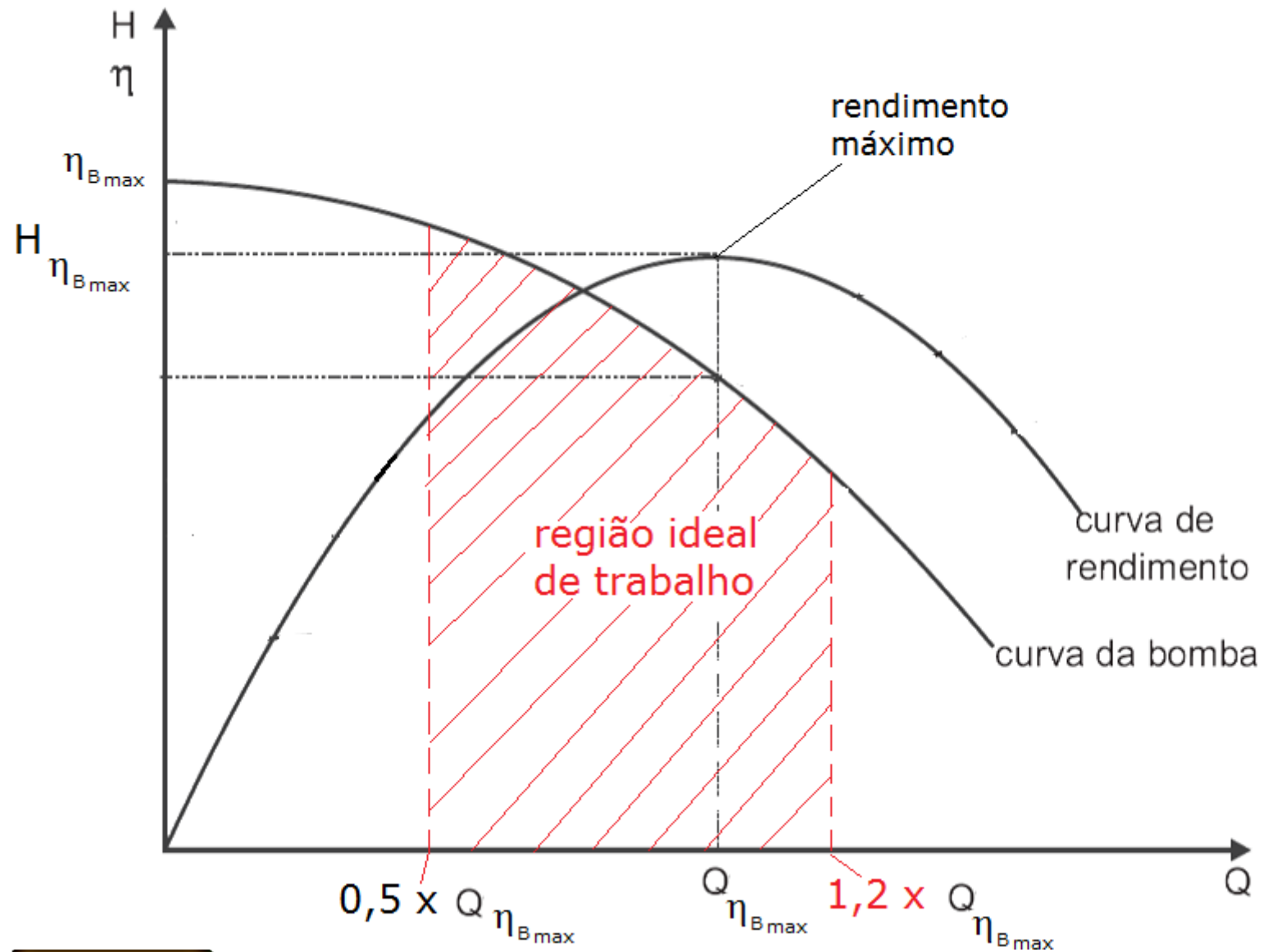


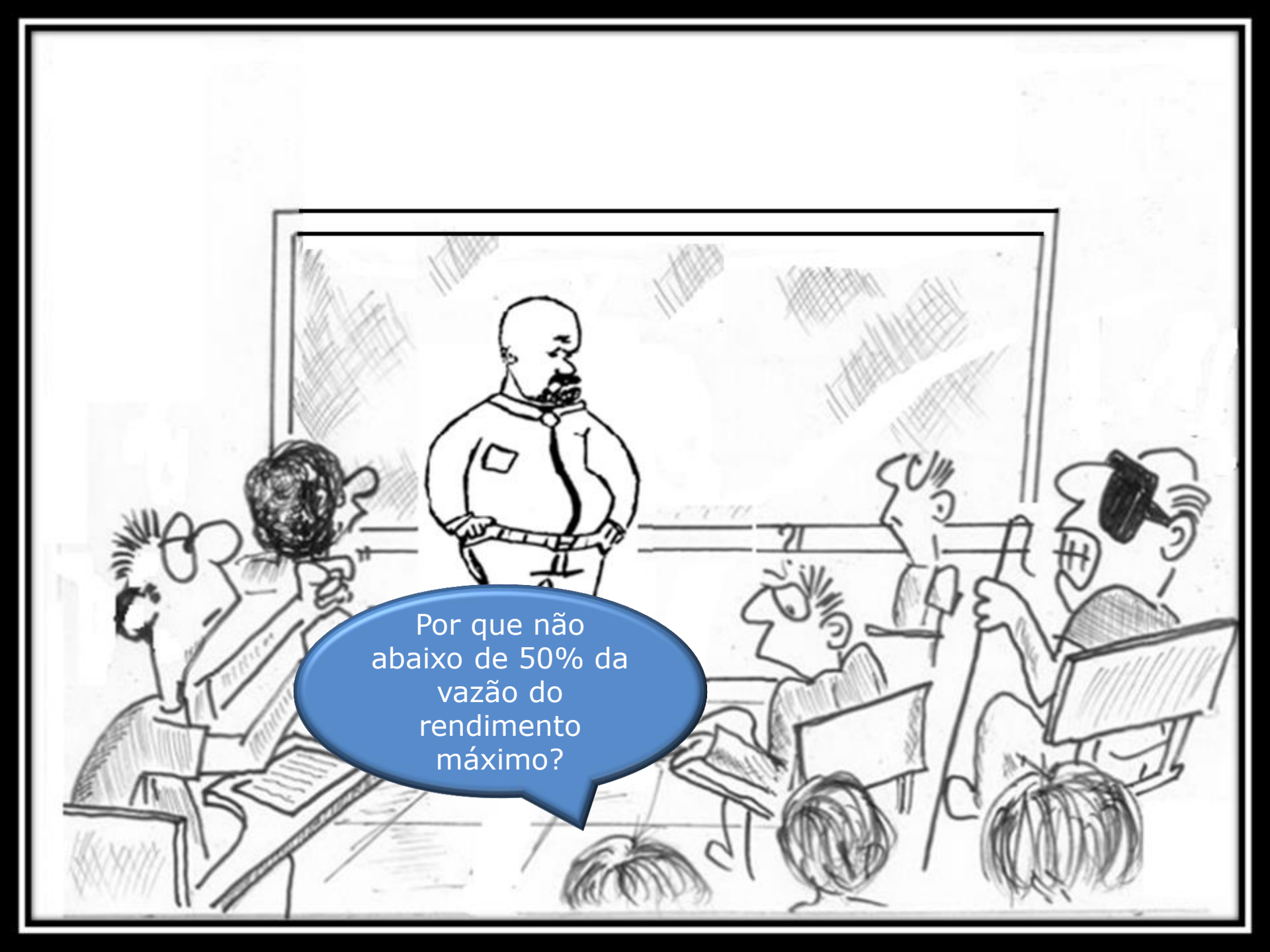
É o
correspondente
ao rendimento
máximo!



Com a vazão correspondente ao rendimento máximo da bomba, podemos estabelecer uma região ideal de trabalho para o fabricante e que está compreendida entre 50% e 120% da vazão do rendimento máximo.







Por que não
abaixo de 50% da
vazão do
rendimento
máximo?



Na verdade, abaixo de 70% da vazão do rendimento máximo já ocorre o fenômeno de recirculação, porém é abaixo de 50% que este fenômeno passa a originar ruídos e danos significativos para a bomba.

E por que evitar vazões acima de 120% da vazão do rendimento máximo?

Com vazões acima de 120% da vazão do rendimento máximo a probabilidade de ocorrer o fenômeno de cavitação é maior!



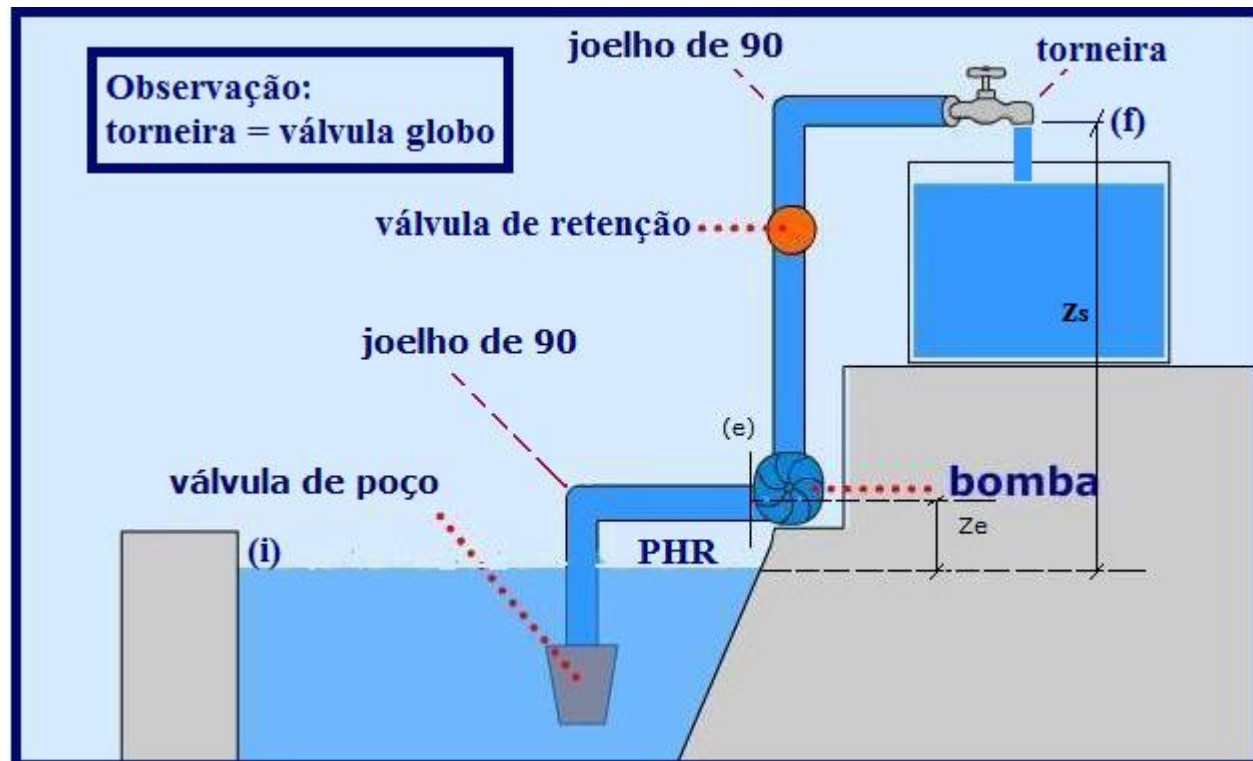
Cavitação,
que fenômeno
é este?



Em instalação hidráulica cavitação é o fenômeno de vaporização total, ou parcial do fluido na própria temperatura de escoamento devido estar submetido a uma pressão muito baixa e posteriormente voltar a ser líquido com o aumento da pressão, também em um processo isotérmico.

Inicialmente se imaginou que a seção de menor pressão era a seção de entrada da bomba e aí se estudou o fenômeno de cavitação, o qual foi denominado de supercavitação e este ocorre sempre que p_{eabs} for menor ou igual a pressão de vapor.

Considerando a tubulação de sucção da instalação esquematizada abaixo, determine a pressão de entrada da bomba (p_e)?



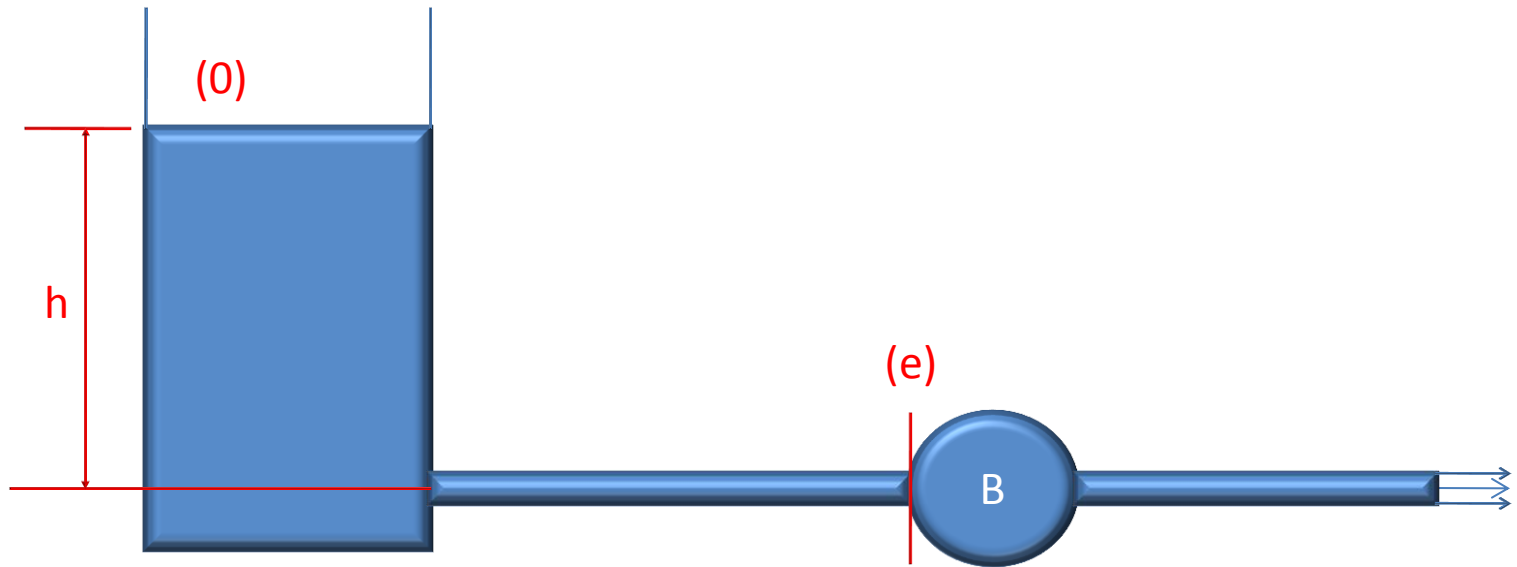
Adotando o PHR no nível de captação, temos:

$$P_e = -\gamma \times \left[z_e + \frac{v_e^2}{2g} + f \times \frac{(L_{aB} + \sum L_{eq_{aB}})}{D_H} \times \frac{v_e^2}{2g} \right]$$

Será que a equação anterior pode-se ser aplicada em todas as instalações?



Para responder a pergunta anterior, calcule a pressão na entrada da bomba para o esquema a seguir:



Adotando o PHR no nível de captação, temos:

$$P_e = -\gamma \times \left[-h + \frac{v_e^2}{2g} + f \times \frac{(L_{aB} + \sum L_{e_{q_{aB}}})}{D_H} \times \frac{v_e^2}{2g} \right]$$



Conclui-se que não, portanto a pressão de entrada deve ser determinada aplicando-se a equação da energia.

Visualizando a cavitação



Fenômeno de vaporização

Visualizando a cavitação



Fenômeno de vaporização

Pelo fato do fenômeno de cavitação poder comprometer todo o projeto de uma instalação de bombeamento alguns cuidados preliminares devem ser tomados para evitá-lo, cuidados estes onde objetiva-se trazer a p_e o mais perto possível da p_{atm} , ou até mesmo superior a ela.

Considerando a equação abaixo, quais seriam os cuidados que deveriam ser adotados?

$$P_e = -\gamma \times \left[z_e + \frac{v_e^2}{2g} + f \times \frac{(L_{aB} + \sum L_{e_{q_{aB}}})}{D_H} \times \frac{v_e^2}{2g} \right]$$

Os cuidados adotados para procurar-se evitar o fenômeno de cavitação são:

1º → a bomba deve ser instalada o mais perto possível do nível de captação com a finalidade de diminuir Z_e , ou, se possível, a bomba deve ser instalada abaixo do nível de captação (bomba "afogada") com isto $Z_e < 0$.

2º → a tubulação antes da bomba deve ser a menor possível com a finalidade de diminuir a H_{paB} .

3º → na tubulação antes da bomba devem ser usados os acessórios estritamente necessários com a finalidade de diminuir a H_{paB} .

4º → o diâmetro da tubulação antes da bomba deve ser um diâmetro superior ao diâmetro de recalque com a finalidade, tanto de diminuir a carga cinética de entrada da bomba, quanto diminuir H_{paB} .

5º → o ponto de trabalho da bomba deve estar o mais próximo do ponto de rendimento máximo.

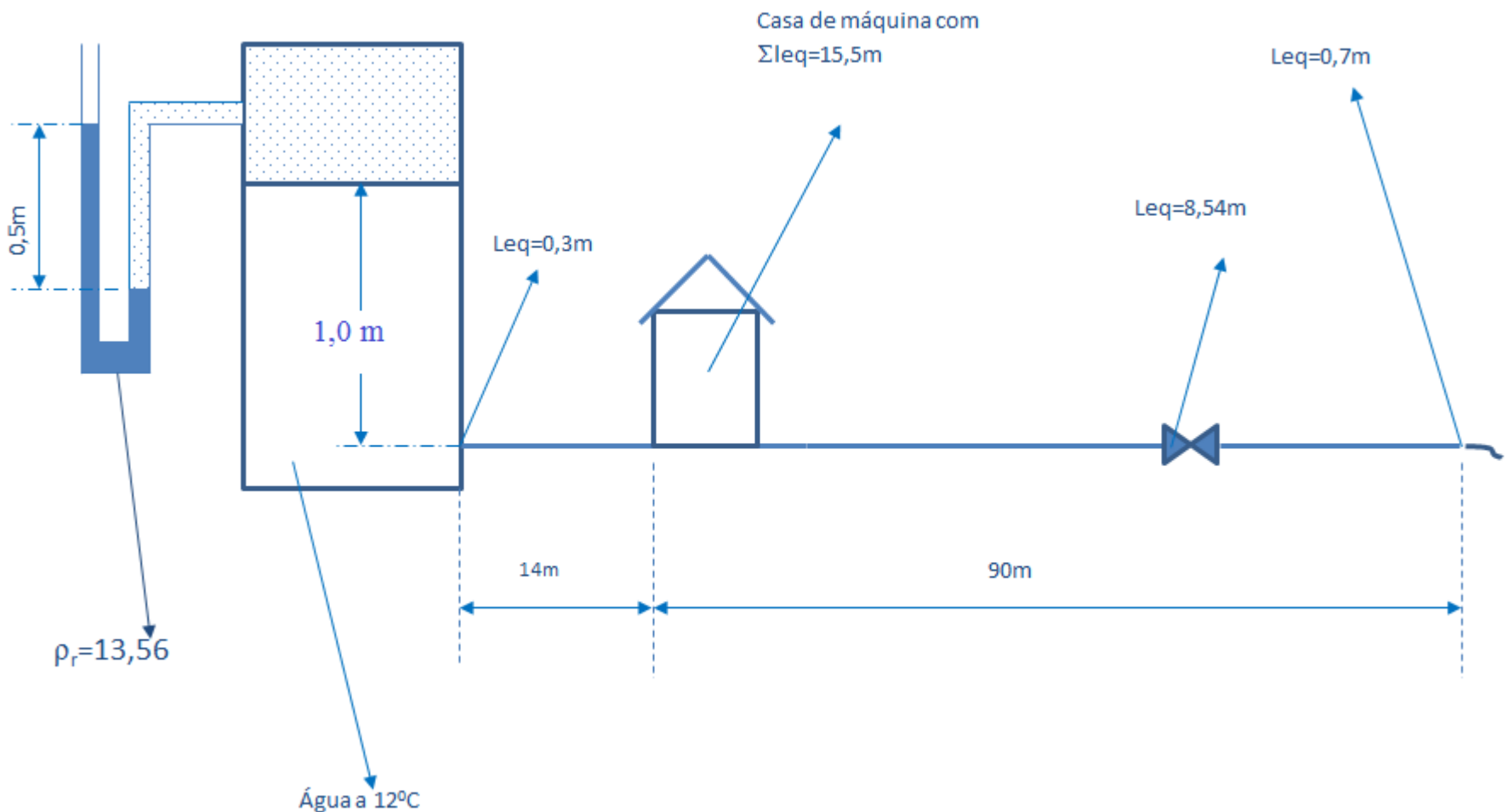
Nota: Por questão de economia, sempre que possível, não se considera o cuidado 4º mencionado acima, já que quanto maior o diâmetro maior o custo da tubulação e a decisão de não considerá-lo será tomada no final do projeto.

Vamos praticar os estudos realizados até aqui em um exemplo.



A instalação de bombeamento a seguir, foi projetada para transportar água a 12°C. Pede-se:

- a equação da curva característica da instalação (CCI);
- a possibilidade da mesma trabalhar em queda livre;
- a sua representação gráfica.



Obtendo dados:

$$\text{água} \rightarrow 12^{\circ}\text{C} \Rightarrow \rho_{\text{água}} = 999,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \mu_{\text{água}} = 1,24 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}}$$

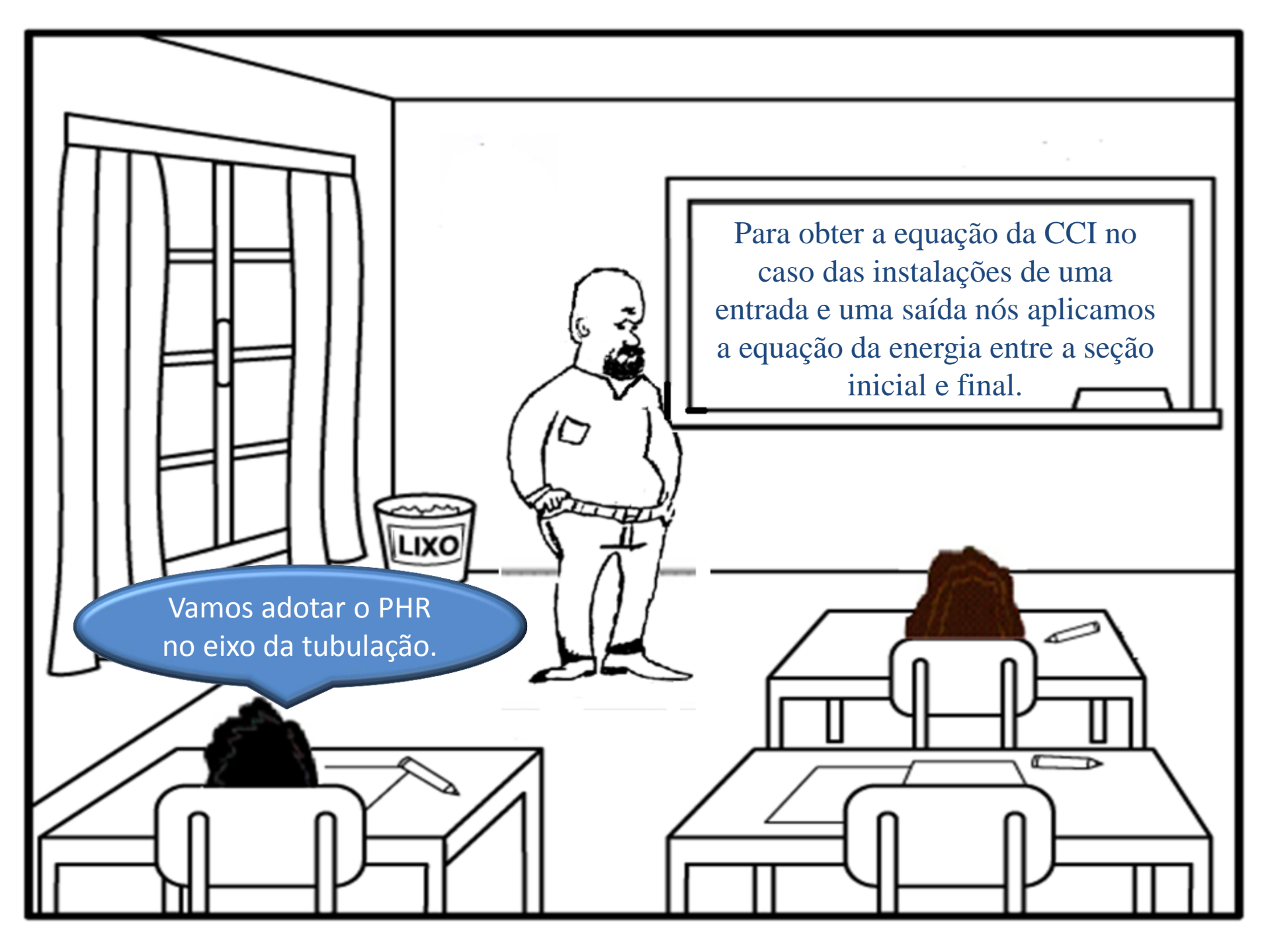
$$v_{\text{água}} = 1,236 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\text{aço} \Rightarrow D_N = 1'' \rightarrow \text{espessura } 40 \rightarrow D_{\text{int}} = 26,6\text{mm} \rightarrow A = 5,57\text{cm}^2$$

$$K = 4,6 \times 10^{-5} \text{m} \rightarrow \frac{D_H}{K} \cong 578$$

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_{\text{padrão}}} \therefore \rho_{\text{Hg}} = 13,56 \times 1000 = 13560 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$p_{\text{ar}} = 0,5 \times \gamma_{\text{Hg}} = 0,5 \times 13560 \times 9,8 = 66444 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ (ou Pa)}$$



Para obter a equação da CCI no caso das instalações de uma entrada e uma saída nós aplicamos a equação da energia entre a seção inicial e final.

Vamos adotar o PHR no eixo da tubulação.

$$H_{\text{inicial}} + H_{\text{sistema}} = H_{\text{final}} + H_{\text{p totais}}$$

$$z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{y_i \times \alpha_i \times Q^2}{2g \times A_i^2} + H_S = z_f + \frac{p_f}{\gamma} + \frac{y_f \times \alpha_f \times Q^2}{2g \times A_{f''}^2} + f \times \frac{(L + \sum Leq)}{D_H} \times \frac{Q^2}{2g \times A_{f''}^2}$$

$$1 + \frac{66444}{999,5 \times 9,8} + 0 + H_S = 0 + 0 + \frac{1 \times \alpha_f \times Q^2}{19,6 \times (5,57 \times 10^{-4})^2} +$$

$$f \times \frac{(104 + 0,3 + 15,5 + 8,54 + 0,7)}{0,0266} \times \frac{Q^2}{19,6 \times (5,57 \times 10^{-4})^2}$$

$$7,8 + H_S = 164449,9 \times \alpha_f \times Q^2 + 797767346,2 \times f \times Q^2$$

⇒ equação da CCI

$$H_S = -7,8 + 164449,9 \times \alpha_f \times Q^2 + 797767346,2 \times f \times Q^2$$

Opera em queda livre?



Queda livre não
existe bomba,
portanto para sua
vazão temos $H_s = 0$



$$0 = H_{\text{estática}} + \left(\frac{\alpha_f}{2g \times A^2} + f \times \frac{(L + \sum Leq)}{D_H} \times \frac{1}{2g \times A^2} \right) \times Q_{\text{queda_livre}}^2$$

**A CARGA ESTÁTICA TEM QUE SER NEGATIVA PARA
EXISTIR O ESCOAMENTO EM QUEDA LIVRE!**

$$Q_{qL} = \sqrt{\frac{-H_{\text{estática}}}{\left[\alpha_f + f \times \frac{(L + \sum Leq)}{D_H} \right] \times \frac{1}{2g \times A^2}}}$$



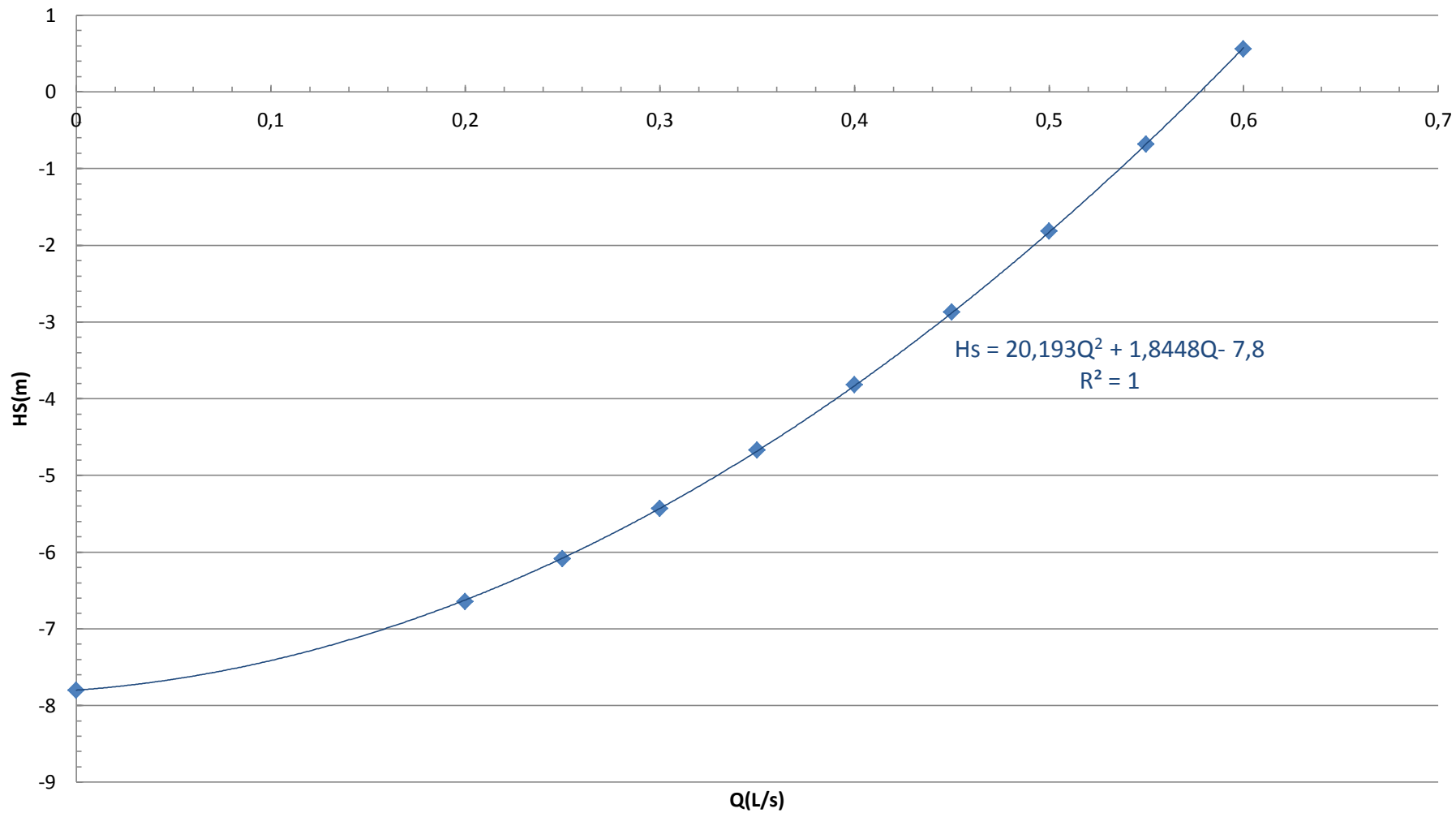
Como a carga
estática do exercício
é $-7,8$ m, podemos
afirmar que existe o
escoamento em
queda livre

Para obter a representação
gráfica da CCI, vamos
recorrer ao Excel e adotamos
um intervalo de vazões, por
exemplo de 0 a 0,6 L/s

$$H_S = -7,8 + 164449,9 \times \alpha_f \times Q^2 + 797767346,2 \times f \times Q^2$$


Q (L/s)	f	Re	α	Hs(m)
0				-7,8
0,2	0,0359	7727	1	-6,6
0,25	0,0341	9659	1	-6,1
0,3	0,0328	11591	1	-5,4
0,35	0,0318	13523	1	-4,7
0,4	0,031	15455	1	-3,8
0,45	0,0303	17387	1	-2,9
0,5	0,0298	19319	1	-1,8
0,55	0,0293	21251	1	-0,679
0,6	0,0289	23182	1	0,559

CCI



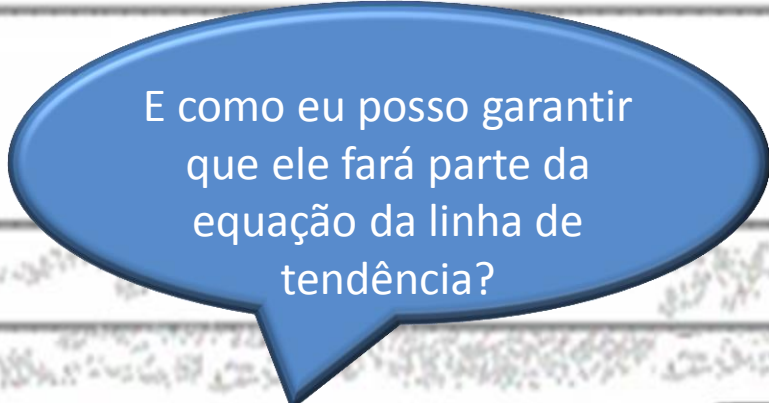
$$H_s = 20,193Q^2 + 1,8448Q - 7,8$$
$$R^2 = 1$$

◆ Hs(m) — Polinômio (Hs(m))




Observe que o termo independente da equação que representa a linha de tendência deve coincidir com o seu valor na tabela, ou seja, aquele que é obtido para $Q = 0$

$$H_S = 20,193Q^2 + 1,8448Q - 7,8$$



E como eu posso garantir que ele fará parte da equação da linha de tendência?



Para que o termo independente da equação da linha de tendência esteja correta nós devemos definir a sua interseção, vide quadro do Excel ao lado.



Formatar Linha de Tendência

Opções de Linha de Tendência

Cor da Linha

Estilo da Linha

Sombra

Bordas Suaves e Brilhantes

Opções de Linha de Tendência

Tipo de Tendência/Regressão



Exponencial



Linear



Logarítmica



Polinomial

Ordem:

2



Potência



Média Móvel

Período:

2

Nome da Linha de Tendência

Automático:

Polinômio (Hs(m))

Personalizado:

Previsão

Avançar:

0,0

períodos

Recuar:

0,0

períodos



Definir Interseção =

-7,8



Exibir Equação no gráfico



Exibir valor de R-quadrado no gráfico

Fechar

Tendo a equação da
linha de tendência,
podemos obter a
vazão de queda livre
para $H_s = 0$



$$0 = 20,193Q_{qL}^2 + 1,8448Q_{qL} - 7,8$$

$$Q_{qL} = \frac{-1,8448 + \sqrt{1,8448^2 + 4 \times 20,193 \times 7,8}}{2 \times 20,193}$$

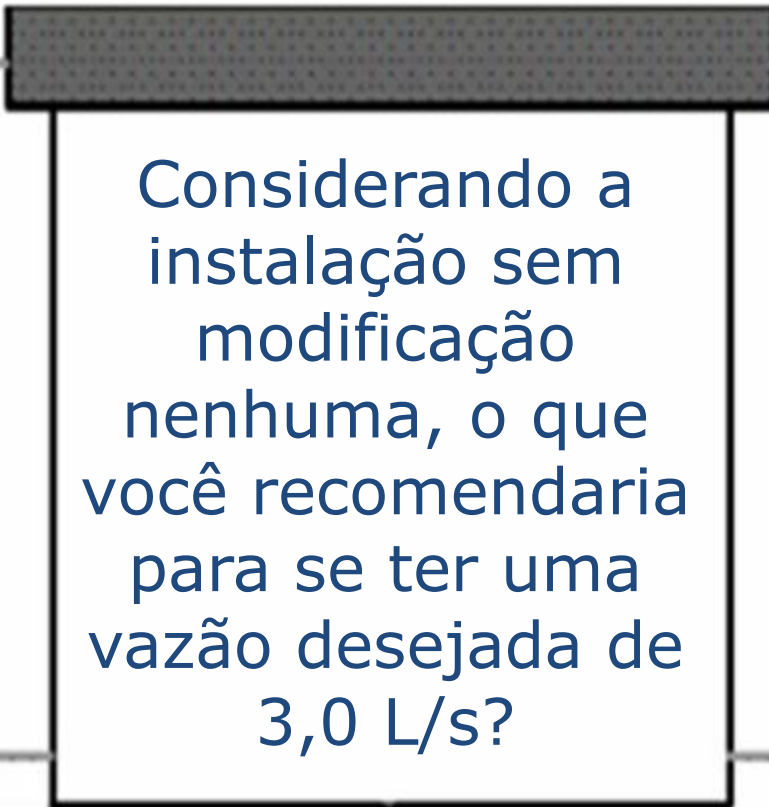
$$Q_{qL} \cong 0,578 \frac{L}{s}$$

Outra maneira para determinação da vazão de queda livre: método iterativo


Q (L/s)	f	Re	α	Hs(m)
0				-7,8
0,2	0,0359	7727	1	-6,6
0,4	0,0310	15455	1	-3,8
0,5	0,0298	19319	1	-1,8
0,57	0,0291	22023	1	-0,204
0,577604	0,0291	22317	1	0,000
0,5778	0,0291	22325	1	0,00531



Exercício
extra



Considerando a
instalação sem
modificação
nenhuma, o que
você recomendaria
para se ter uma
vazão desejada de
3,0 L/s?




Desejando a vazão de 3,0 L/s, isto só será possível com a instalação de uma bomba.

E para a sua escolha devemos definir o que denominamos de vazão de projeto.

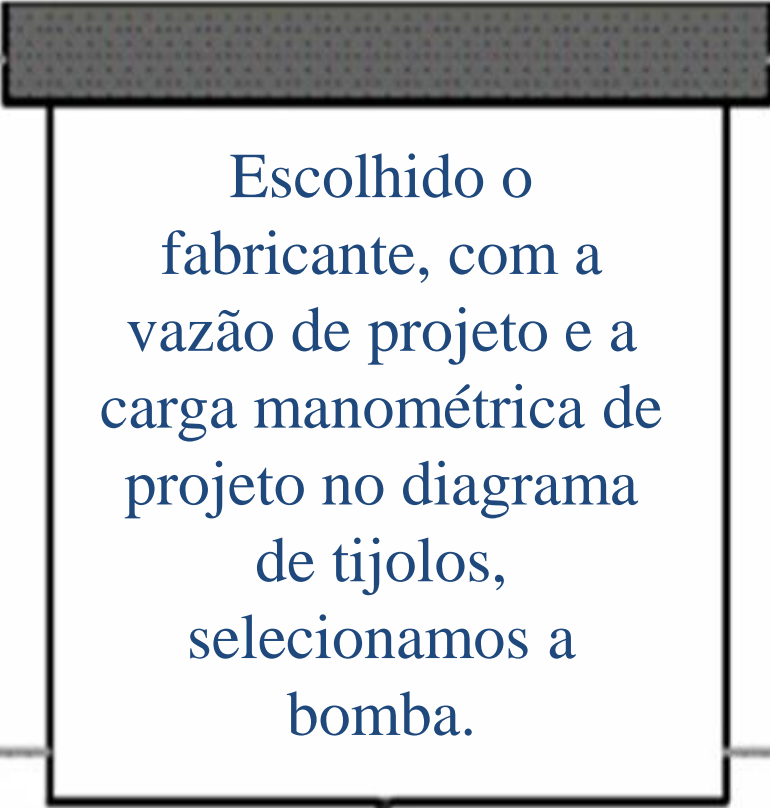
Com a vazão de projeto, determinamos o coeficiente de perda de carga distribuída e a carga manométrica de projeto.

$$Q_{\text{projeto}} = 1,1 \times 3 = 3,3 \frac{\text{L}}{\text{s}} \approx 12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Q (m ³ /h)	f	Re	α	Hs(m)
12	0,0242	127503	1	204,2

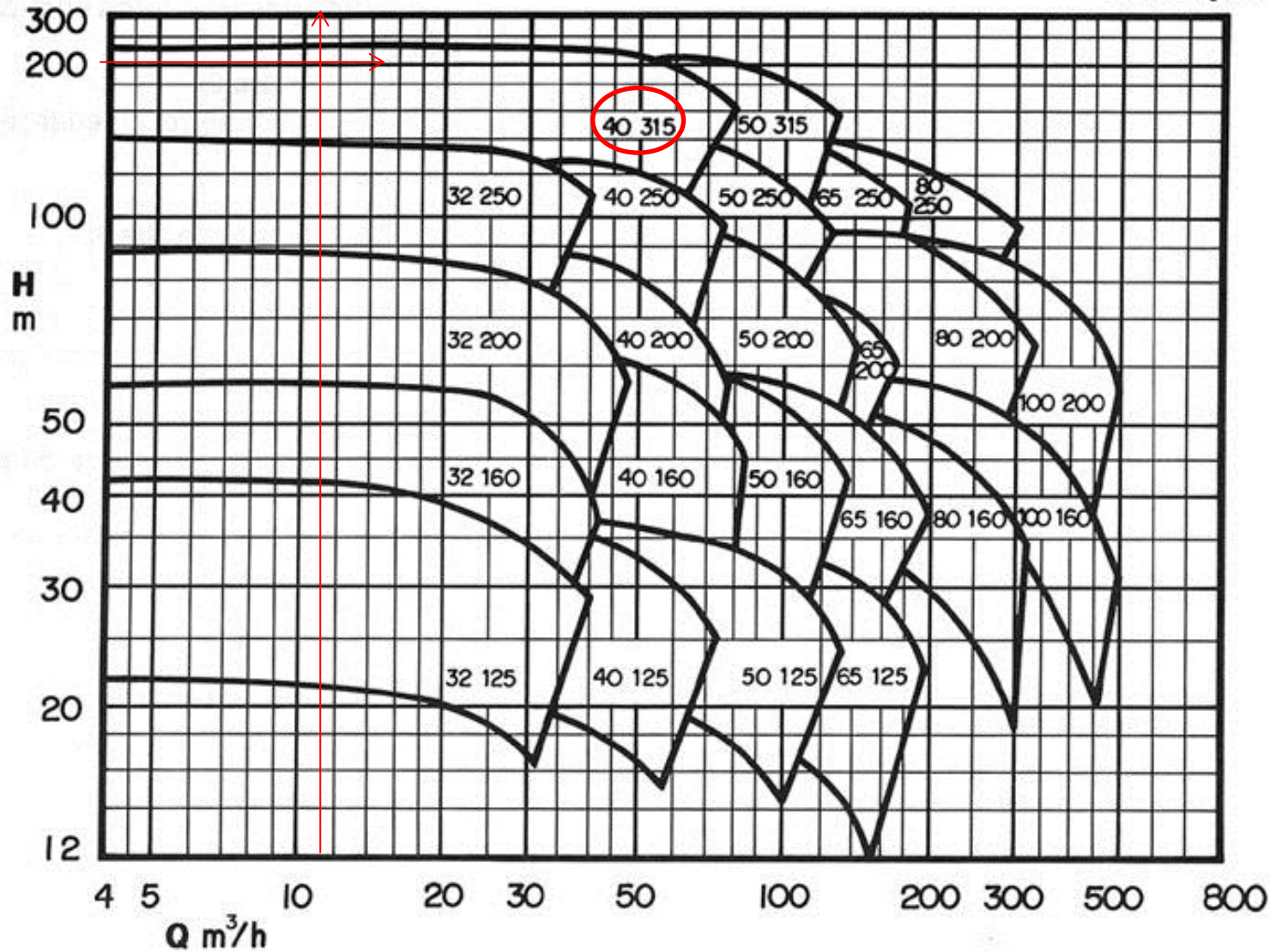


Escolhemos o fabricante de bomba, por exemplo a IMBIL



Escolhido o fabricante, com a vazão de projeto e a carga manométrica de projeto no diagrama de tijolos, selecionamos a bomba.

3500 rpm





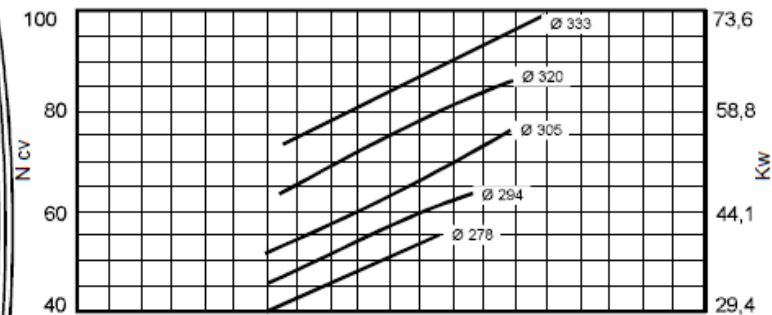
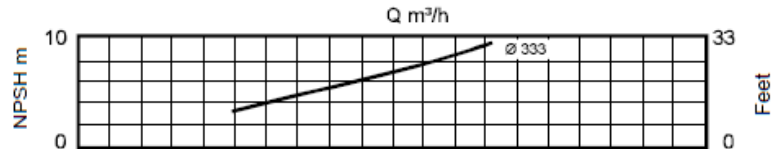
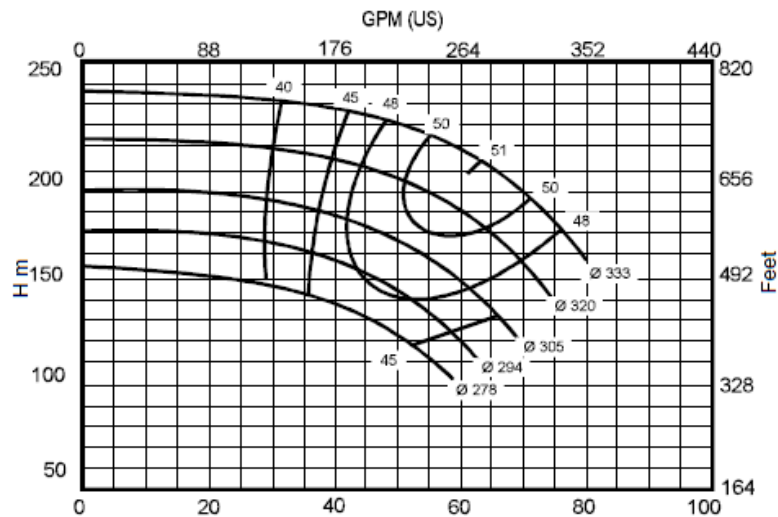
No catálogo do fabricante selecionamos as curvas da bomba (CCB)

Com a CCB e a CCI, podemos definir o ponto de trabalho da bomba (cruzamento da CCI com a CCB) e aí definir o diâmetro de rotor da mesma.



INI 40-315

3500 rpm



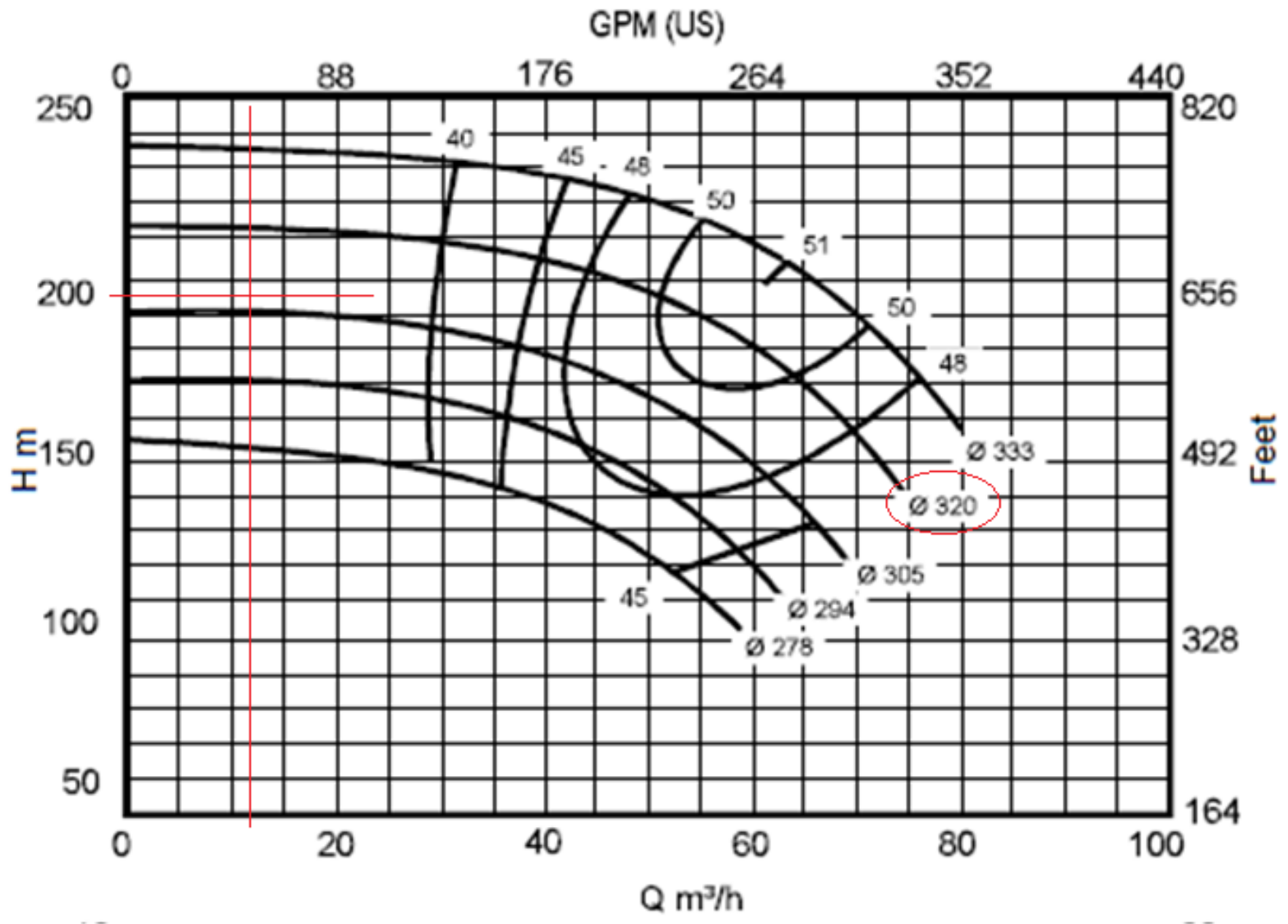
Rotor Ø Máximo 333 mm
 Rotor Ø Mínimo 278 mm
 Largura do Rotor 9 mm
 Viscosidade $\mu = 1\text{cP}$

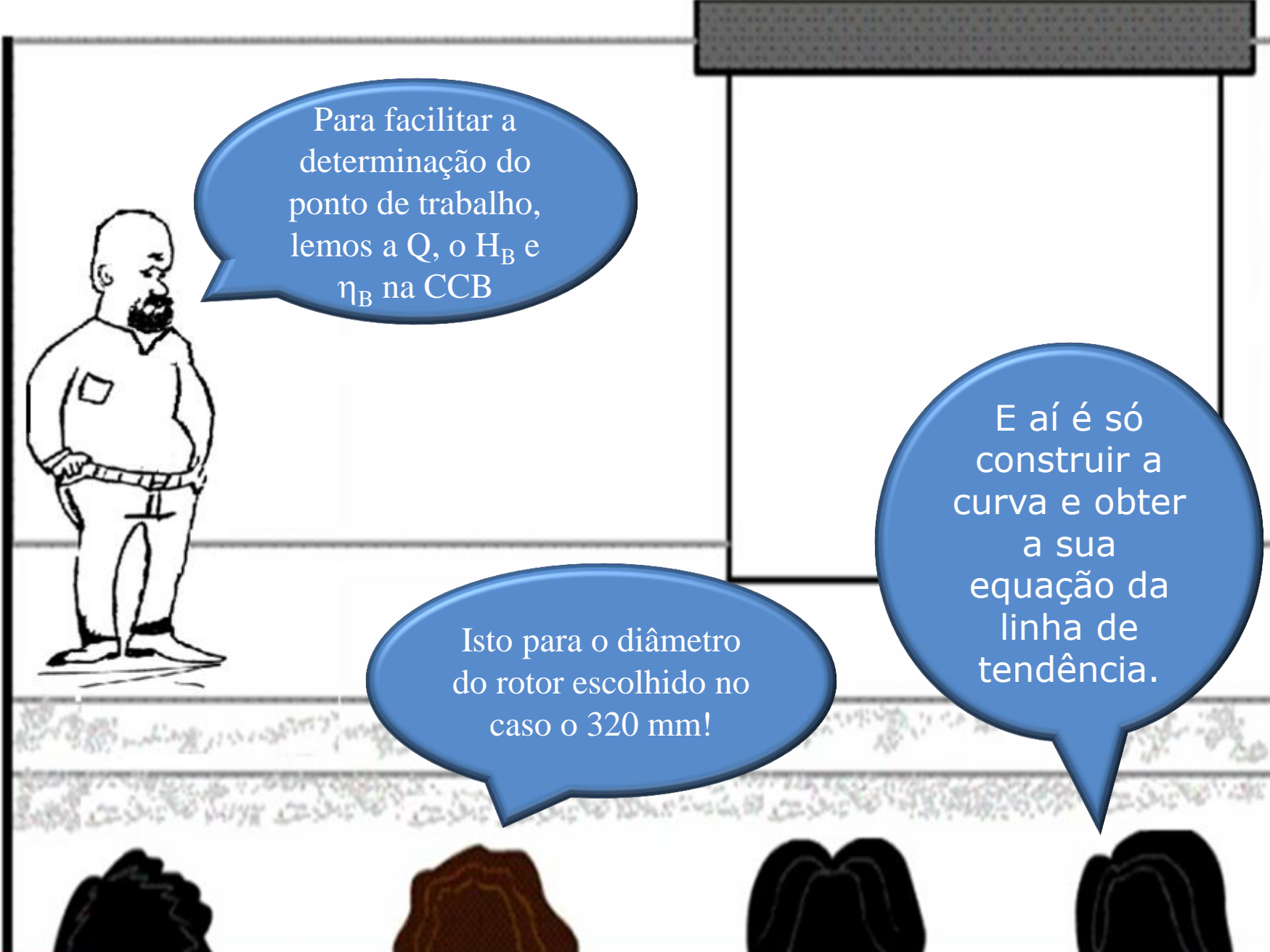
Flange de Sucção 65 mm
 Flange de Pressão 40 mm
 Peso Específico $\gamma = 1\text{kgf/dm}^3$



INI 40-315

3500 rpm



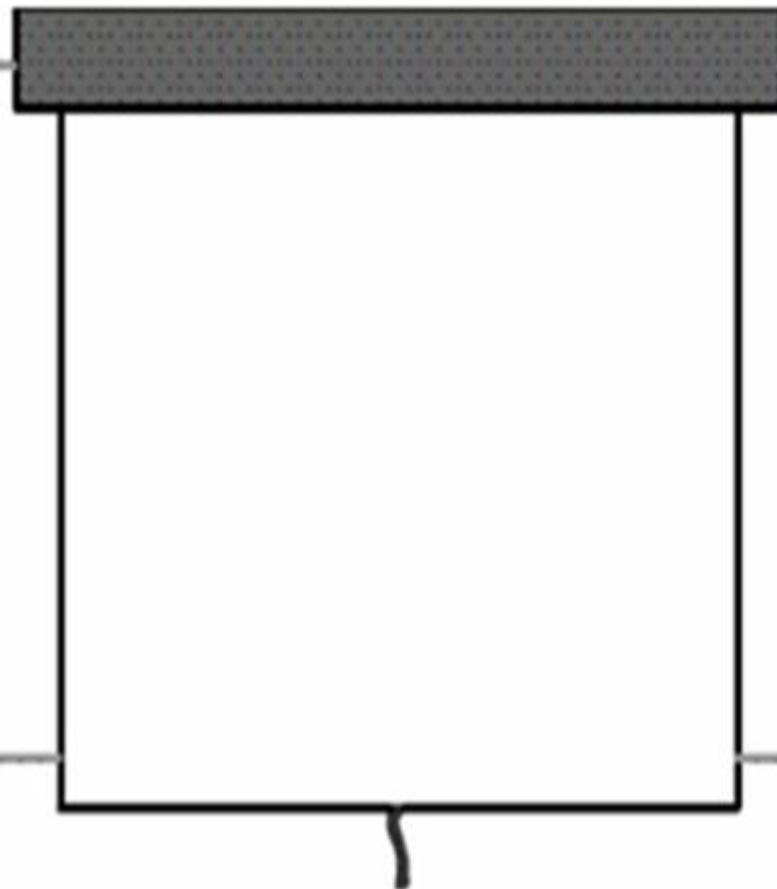


Para facilitar a
determinação do
ponto de trabalho,
lemos a Q , o H_B e
 η_B na CCB

Isto para o diâmetro
do rotor escolhido no
caso o 320 mm!

E aí é só
construir a
curva e obter
a sua
equação da
linha de
tendência.

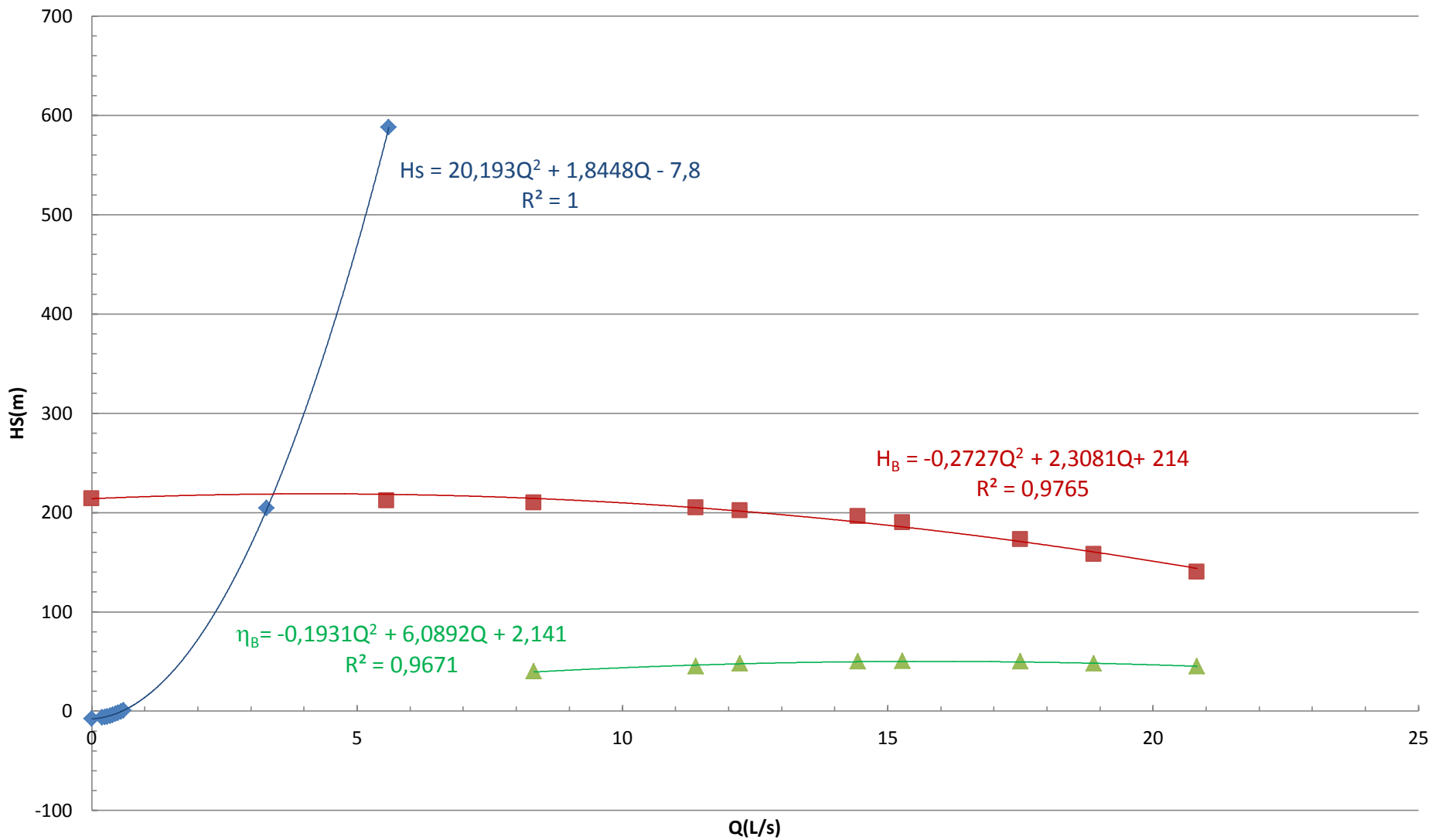
Isto mesmo!



CCB			
Q(m ³ /h)	Q(L/s)	H _B (m)	η _B (%)
0	0	214	
20	5,6	212	
30	8,3	210	40
41	11,4	205	45
44	12,2	202	48
52	14,4	196	50
55	15,3	190	50,5
63	17,5	173	50
68	18,9	158	48
75	20,8	140	45

CCI

Q (L/s)	f	Re	α	Hs(m)
0				-7,8
0,2	0,0359	7727	1	-6,6
0,25	0,0341	9659	1	-6,1
0,3	0,0328	11591	1	-5,4
0,35	0,0318	13523	1	-4,7
0,4	0,031	15455	1	-3,8
0,45	0,0303	17387	1	-2,9
0,5	0,0298	19319	1	-1,8
0,55	0,0293	21251	1	-0,679
0,6	0,0289	23182	1	0,559
3,3	0,0242	127503	`1	204,2
5,6	0,0236	216369	`1	587,8



◆ Hs(m)
 ■ CCB
 ▲ rendimento
 — Polinômio (Hs(m))
 — Polinômio (CCB)
 — Polinômio (rendimento)

Determinando o ponto de trabalho

$$H_B = -0,2727Q^2 + 2,3081Q + 214$$

$$\eta_B = -0,1931Q^2 + 6,0892Q + 2,141$$

$$H_S = 20,193Q^2 + 1,8448Q - 7,8$$

$$H_B = H_S$$

$$-0,2727Q^2 + 2,3081Q + 214 = 20,193Q^2 + 1,8448Q - 7,8$$

$$20,4657Q^2 - 0,4633Q - 221,8 = 0$$

$$Q_\tau = \frac{0,4633 + \sqrt{0,4633^2 + 4 \times 20,4657 \times 221,8}}{2 \times 20,4657} \cong 3,30 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$H_S = 20,193 \times (3,30)^2 + 1,8448 \times (3,30) - 7,8 \cong 218,2\text{m}$$

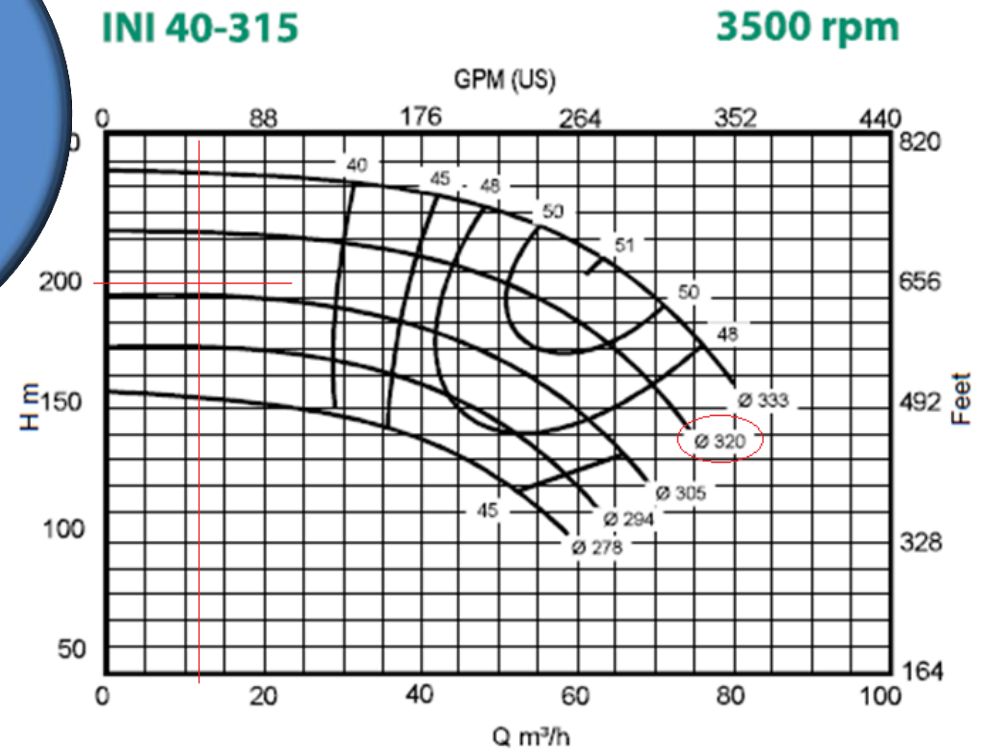
$$\eta_B = -0,1931 \times (3,3)^2 + 6,0892 \times (3,3) + 2,141 \cong 20,1\%$$

$$N_{B_\tau} = \frac{\gamma \times Q_\tau \times H_{B_\tau}}{\eta_{B_\tau}} = \frac{999,5 \times 9,8 \times (3,3/1000) \times 218,2}{0,201}$$

$$N_{B_\tau} = 35089,9\text{W} \cong 35,1\text{kW}$$

Refletindo sobre a CCB

Consideramos
a vazão do
ponto de
rendimento
máximo.



CCB			
Q(m ³ /h)	Q(L/s)	H _B (m)	η _B (%)
0	0	214	
20	5,6	212	
30	8,3	210	40
41	11,4	205	45
44	12,2	202	48
52	14,4	196	50
55	15,3	190	50,5
63	17,5	173	50
68	18,9	158	48
75	20,8	140	45

Portanto para o rendimento máximo de 50,5%, teríamos uma vazão de 15,3 L/s.

Poderíamos considerar a faixa de trabalho:

$$0,5 * Q_{\eta B_{\text{máx}}} \leq Q \leq 1,2 * Q_{\eta B_{\text{máx}}}$$

No caso de vazões inferiores a $0,5 * Q_{\eta B_{\text{máx}}}$ existem os problemas causados pela **recirculação** (na verdade a recirculação inicia com 70% da vazão do rendimento máximo) e acima de $1,2 * Q_{\eta B_{\text{máx}}}$ **maior probabilidade de ocorrer o fenômeno de cavitação.**





NO CASO DO
EXERCÍCIO:

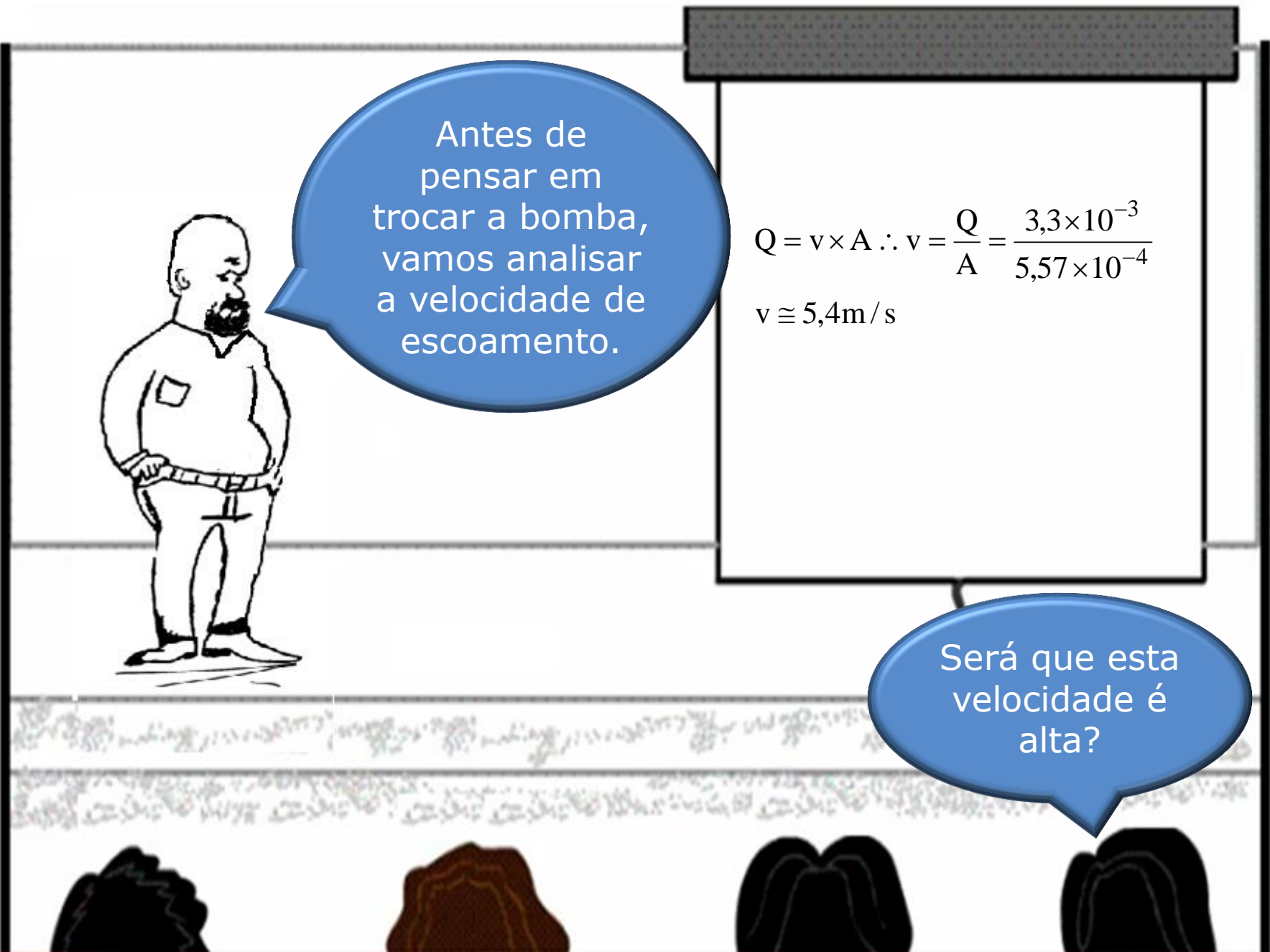
$$0,5 \times 15,3 \leq Q \leq 1,2 \times 15,3$$

$$\therefore 7,65 \leq Q \leq 18,36 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

No exercício
estamos
tendo a
recirculação!

O que
fazer?!

Trocar a
bomba?



Antes de pensar em trocar a bomba, vamos analisar a velocidade de escoamento.

$$Q = v \times A \therefore v = \frac{Q}{A} = \frac{3,3 \times 10^{-3}}{5,57 \times 10^{-4}}$$
$$v \cong 5,4 \text{ m/s}$$

Será que esta velocidade é alta?



Para responder se a
velocidade é alta ou
não, vamos recordar
alguns valores para a
velocidade média.

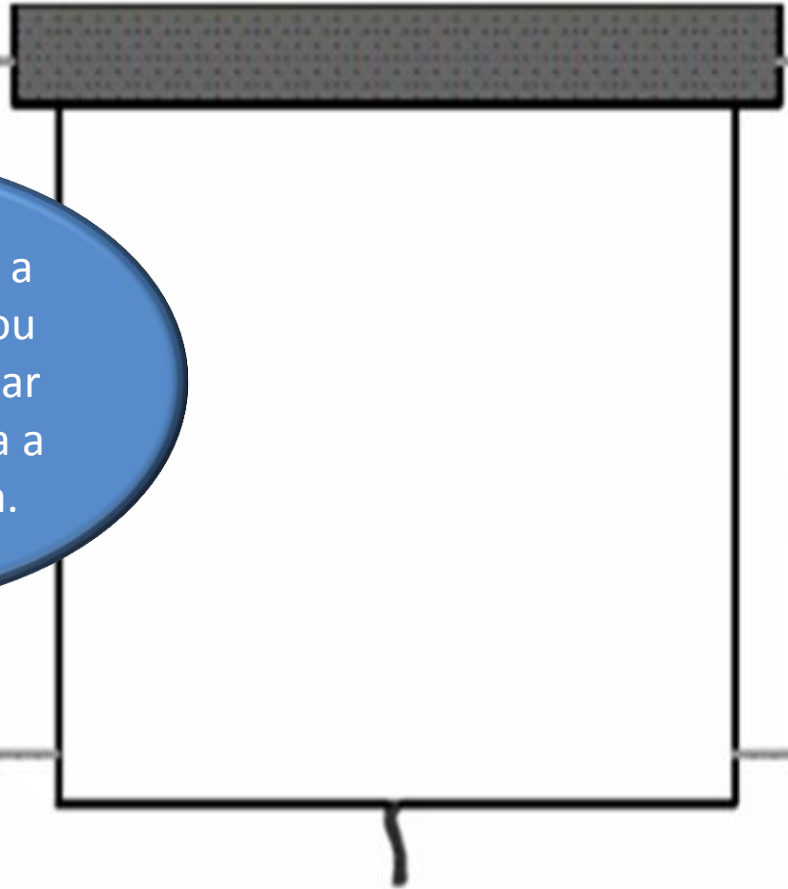
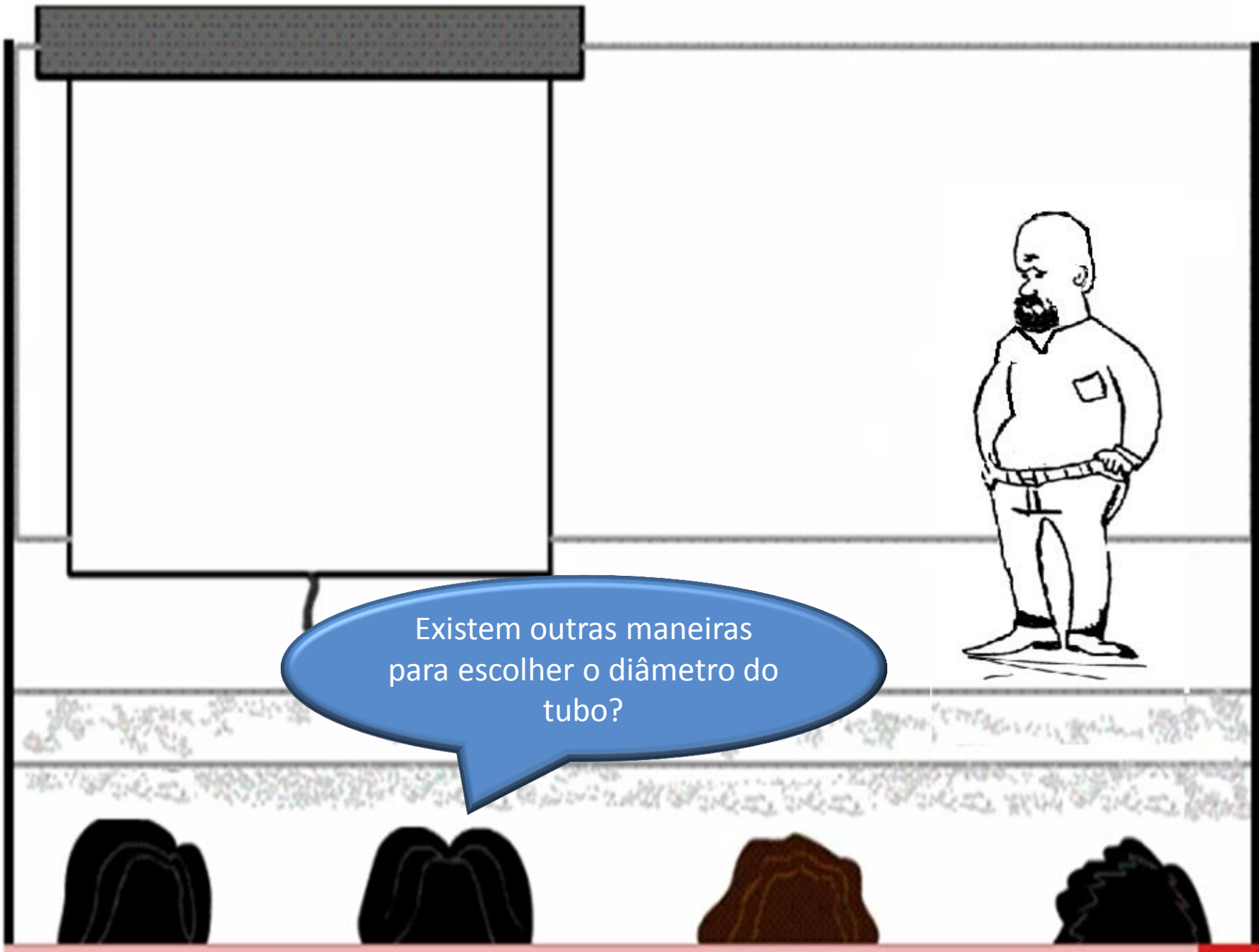


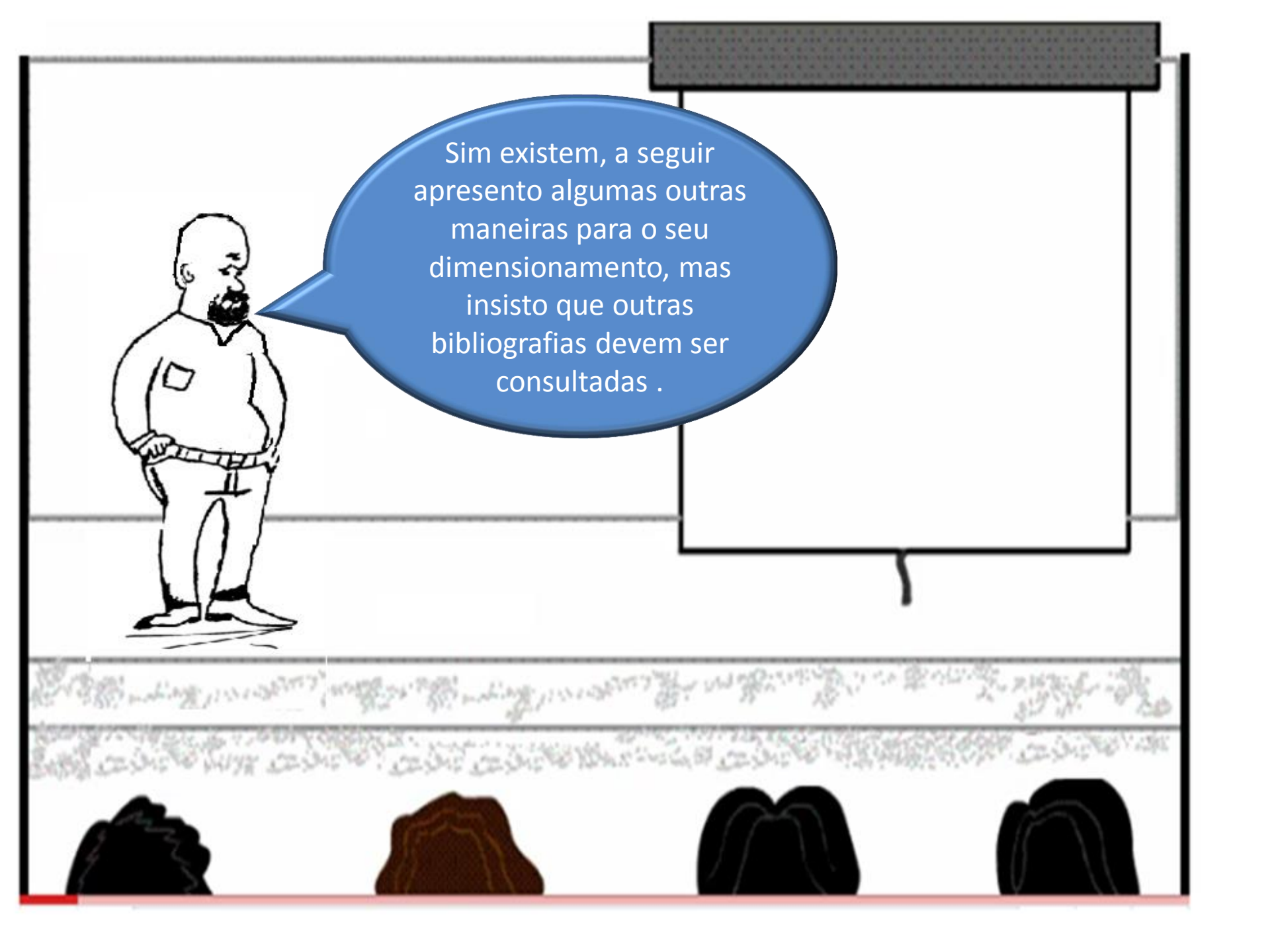
Tabela de velocidades recomenda das pela Alvenius Equipament os Tubulares S/A



Fluido	Velocidade (m/s)
Água - redes em cidades	1 a 3
- redes industriais	2 a 4
- alimentação de caldeiras	4 a 8
- sucção de bombas	0,75 a 1,8
Água salgada	1,5 a 2,5
Ar comprimido	15 a 20
Vapor - até 2 kgf/cm ² saturado	20 a 40
- de 2 a 10 kgf/cm ²	40 a 80
- mais de 10 kgf/cm ²	80 a 200
Hidrocarbonetos líquidos em instalações industriais	
- linhas de sucção	1 a 2
- linhas de recalque	1,5 a 2,5
Hidrocarbonetos gasosos em instalações industriais	25 a 30
Acetileno	20 a 25
Amônia - líquida	2
- gás	25 a 35
Hidrogênio	20 a 35
Cloro - líquido	1,5 a 2,0
- gás	15 a 30
Soda cáustica - 0 a 30%	2
- 30 a 50%	1,5
- 50 a 75%	1,2
Cloreto de sódio	1,5 a 2,0
Cloreto de Cálcio	1,5
Tetra-Cloreto de carbono	2,0
Ácido sulfúrico	1,0 a 1,2

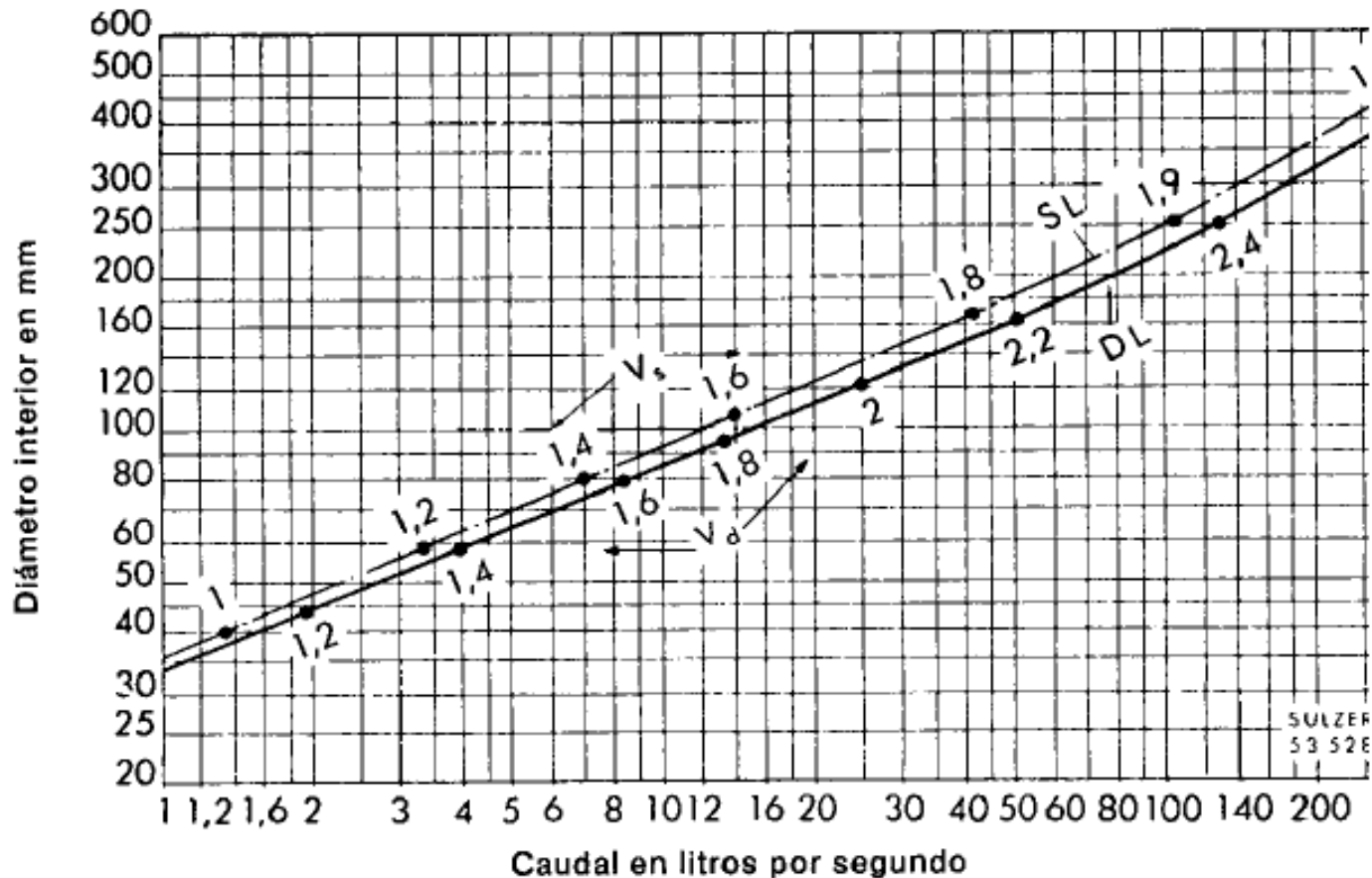


Existem outras maneiras
para escolher o diâmetro do
tubo?



Sim existem, a seguir apresento algumas outras maneiras para o seu dimensionamento, mas insisto que outras bibliografias devem ser consultadas .

Companhia Sulzer



4. Diámetros interiores de tuberías de aspiración y de presión

(las cifras que aparecen a lo largo de las curvas indican las velocidades)

v_s = velocidad en m/s en el conducto de aspiración SL

v_d = velocidad en m/s en la tubería de impulsión DL

No caso da tubulação de PVC pode-se ainda especificar o diâmetro através da vazão

Vazão	Diâmetro do tubo de PVC
Até 2.500 litros/hora	25 mm
Entre 2.500 e 5.000 litros/hora	32 mm
Entre 5.000 e 10.000 litros/hora	40 mm
Entre 10.000 e 20.000 litros/hora	50 mm



Qualquer que seja a tabela considerada fica fácil observar que devemos redimensionar a tubulação. No caso, eu vou supor um único diâmetro e optar por um de 2" e espessura 40.

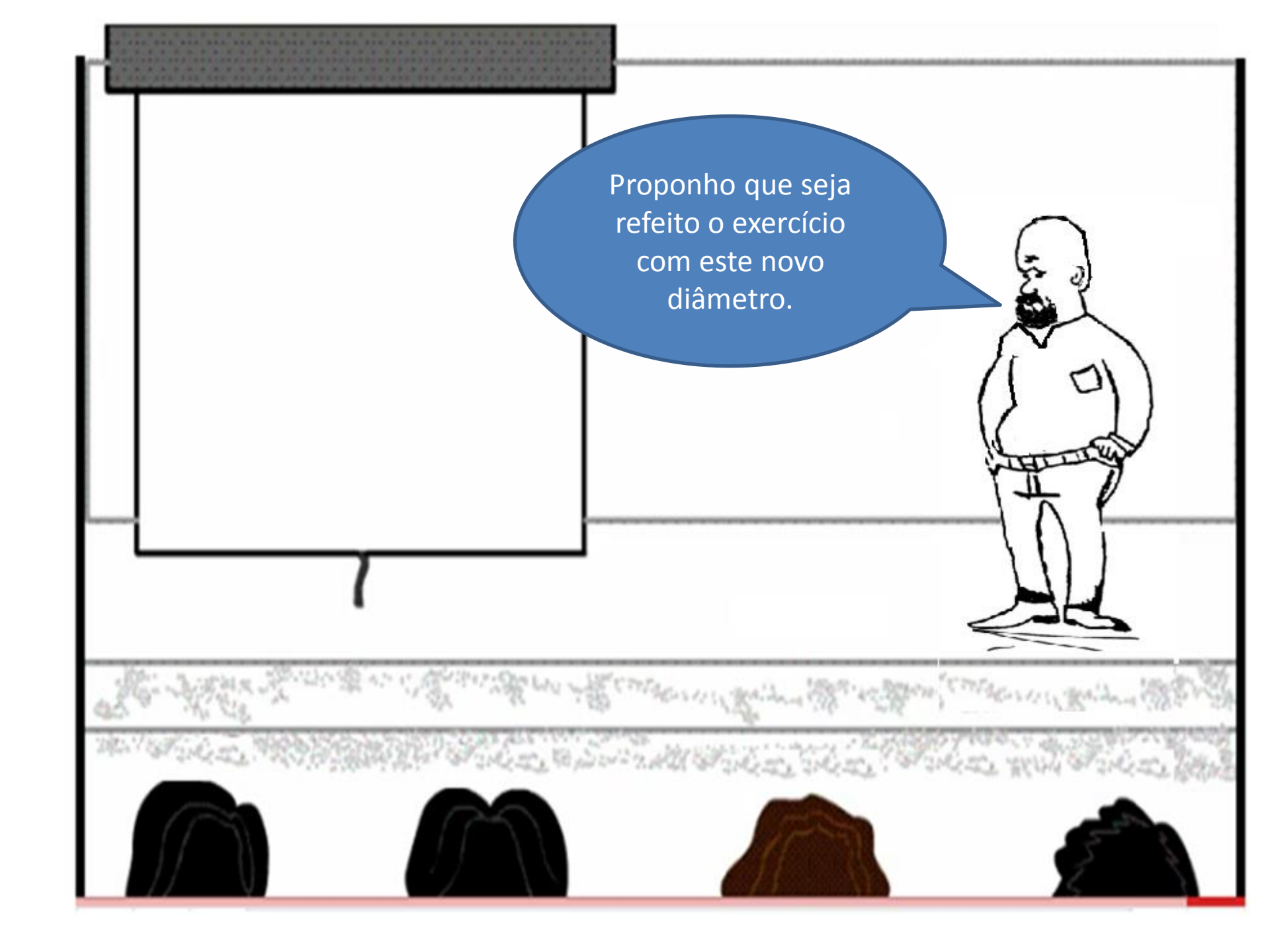
$$Q = v \times A \therefore v = \frac{Q}{A}$$

Considerando tubo de $D_N = 2''$ e espessura 40:

$$v = \frac{3,3 \times 10^3}{21,7 \times 10^{-4}}$$

$$v \cong 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Esta velocidade está adequada!



Proponho que seja
refeito o exercício
com este novo
diâmetro.



Para a instalação hidráulica abaixo, que tem um único diâmetro, que é de aço 40 com $D_N = 2''$, pede-se escrever a equação da CCI, obter sua representação gráfica e, se existir, obter a vazão de queda livre. E considerando a bomba anteriormente escolhida, especifique seu novo ponto de trabalho.

Importante: Com a instalação operando em queda livre o fluido não passa pela casa de máquina e aí a somatória dos comprimentos equivalentes é considerada igual a 9,94 m e existe um aumento do comprimento da tubulação de 2 m.

