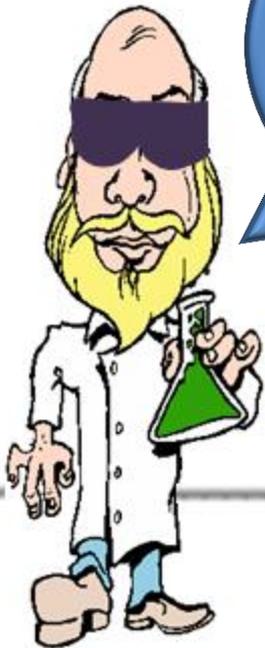
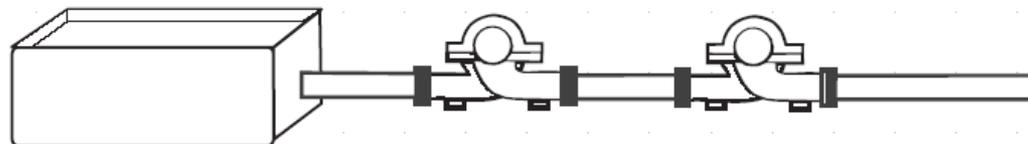


Aula 9: revendo
a associação
em série de
bombas.



Considerando o esquema a seguir é fácil observar que:

1. O líquido passará pela primeira bomba e receberá uma certa carga manométrica e ao entrar na segunda bomba, haverá um novo acréscimo de carga a fim de que o mesmo atinja as condições solicitadas.
2. A vazão que sai da primeira bomba é a mesma que entra na segunda, sendo portanto a vazão em uma associação de bombas em série constante.

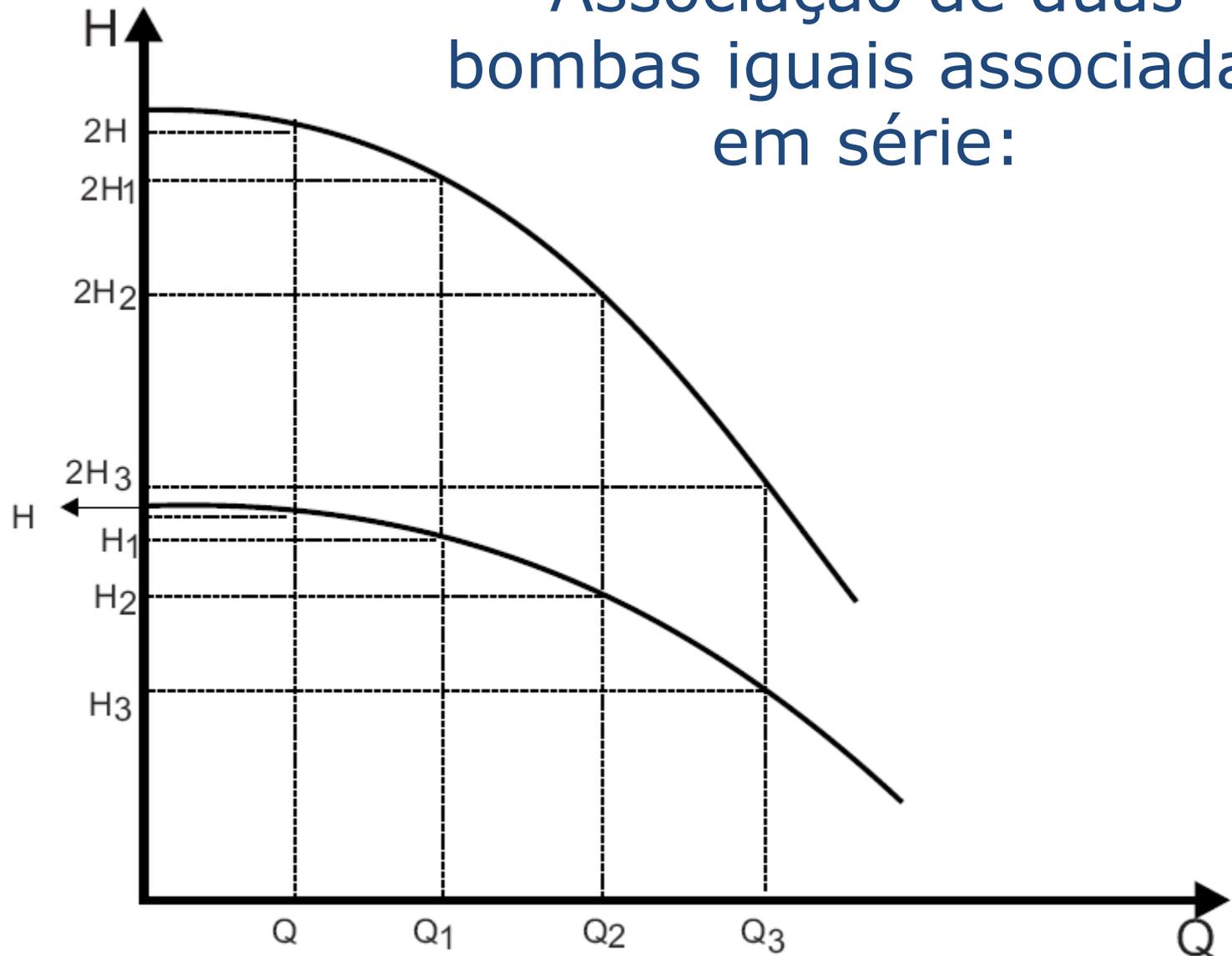


Conclusão:

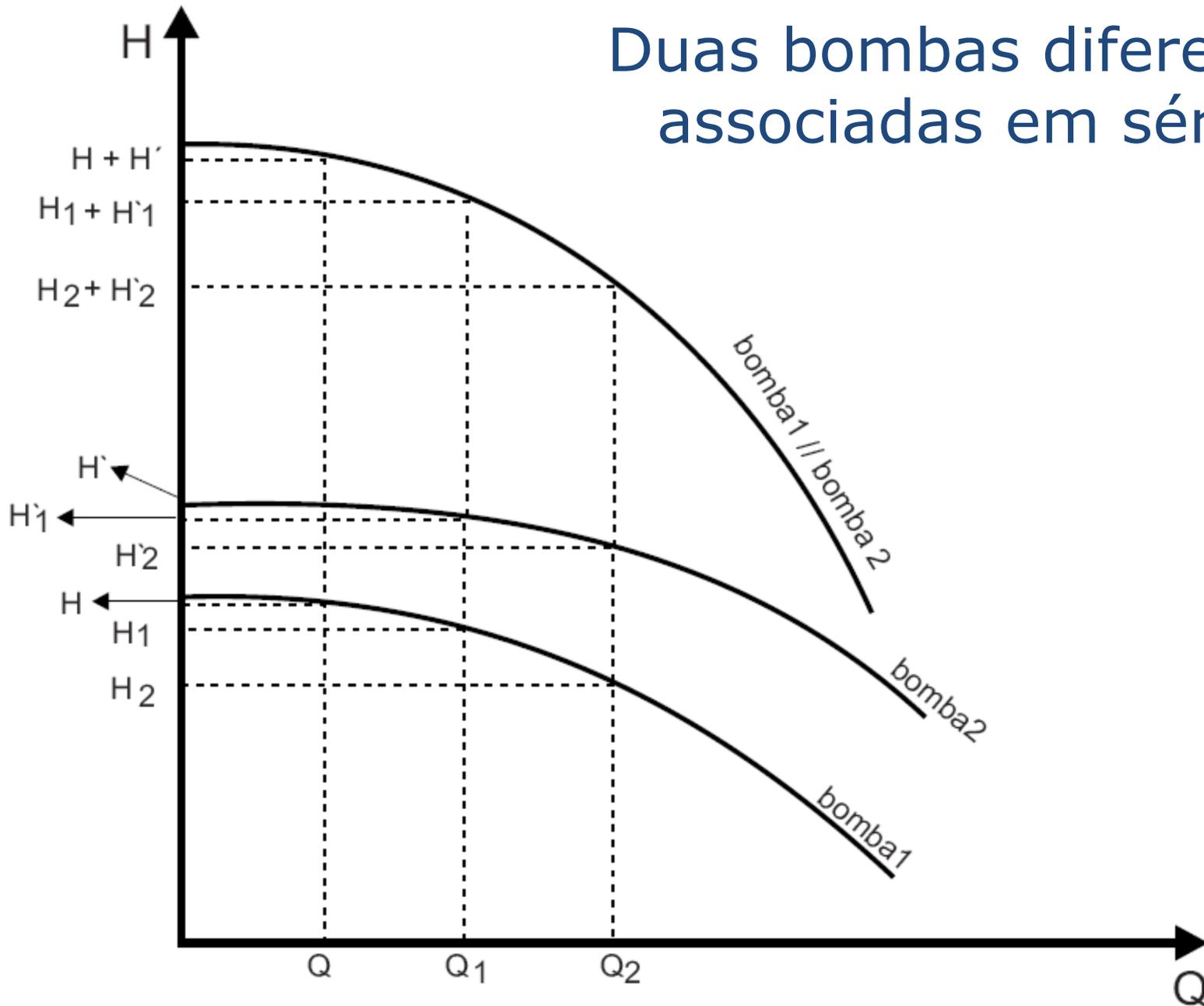
quando associamos duas ou mais bombas em série, para uma mesma vazão, a carga manométrica será a soma da carga manométrica fornecida por cada bomba.

Portanto, para se obter a curva característica resultante de duas bombas em série, iguais ou diferentes, basta somar as alturas manométricas totais, correspondentes aos mesmos valores de vazão, em cada bomba.

Associação de duas bombas iguais associadas em série:



Duas bombas diferentes associadas em série:





Cuidado:

verificar a pressão
máxima suportada
no flange das
bombas
subsequentes.



Cálculo do rendimento da associação em série de bombas.

$$N_{B_{\text{assoc}}} = N_{B_{B1}} + N_{B_{B2}}$$

$$\frac{\gamma \times Q \times H_{B_{\text{as}}}}{\eta_{B_{\text{as}}}} = \frac{\gamma \times Q \times H_{B_{B1}}}{\eta_{B_{B1}}} + \frac{\gamma \times Q \times H_{B_{B2}}}{\eta_{B_{B2}}}$$

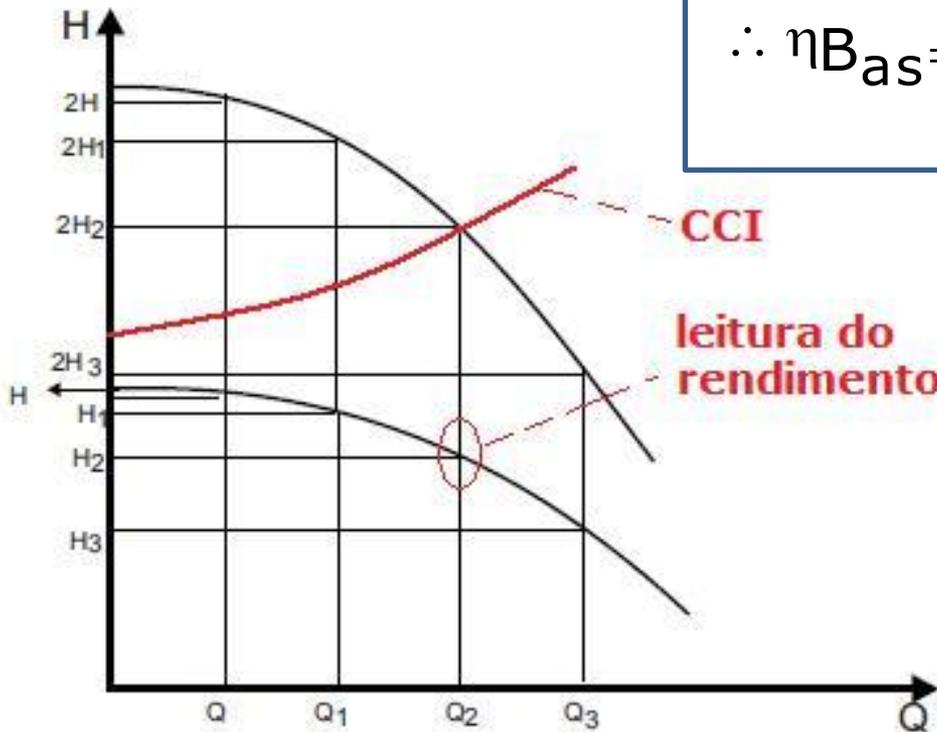
$$\frac{H_{B_{\text{as}}}}{\eta_{B_{\text{as}}}} = \frac{H_{B_{B1}}}{\eta_{B_{B1}}} + \frac{H_{B_{B2}}}{\eta_{B_{B2}}}$$

$$\eta_{B_{\text{as}}} = \frac{H_{B_{\text{as}}}}{\frac{H_{B_{B1}}}{\eta_{B_{B1}}} + \frac{H_{B_{B2}}}{\eta_{B_{B2}}}}$$

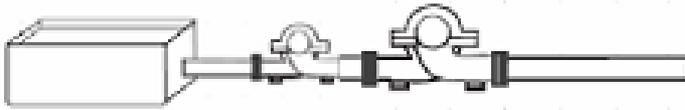
Operação de bombas iguais em série

$$H_{B_{B1}} = H_{B_{B2}} \text{ e } \eta_{B_{B1}} = \eta_{B_{B2}}$$

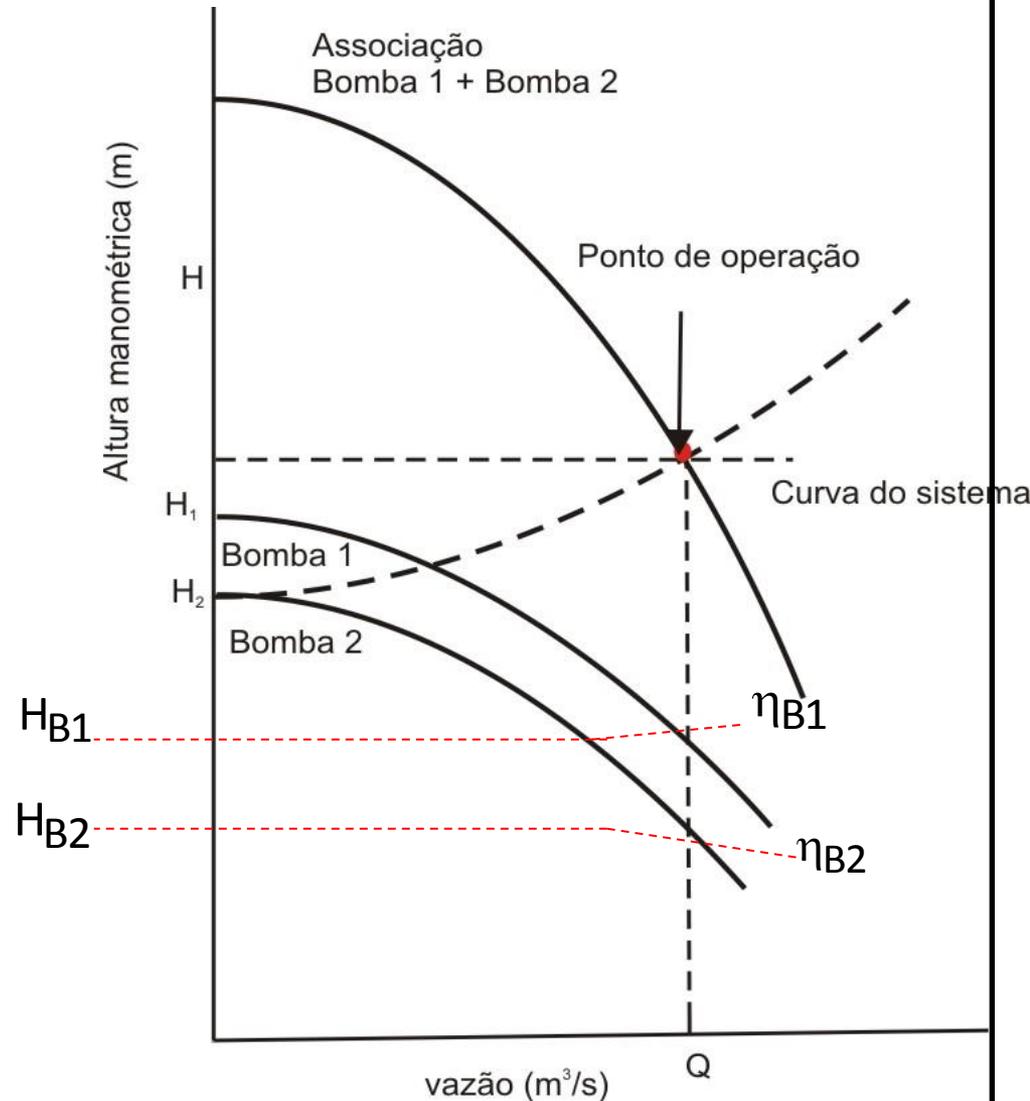
$$\therefore \eta_{B_{as}} = \eta_{B_{B1}} = \eta_{B_{B2}}$$



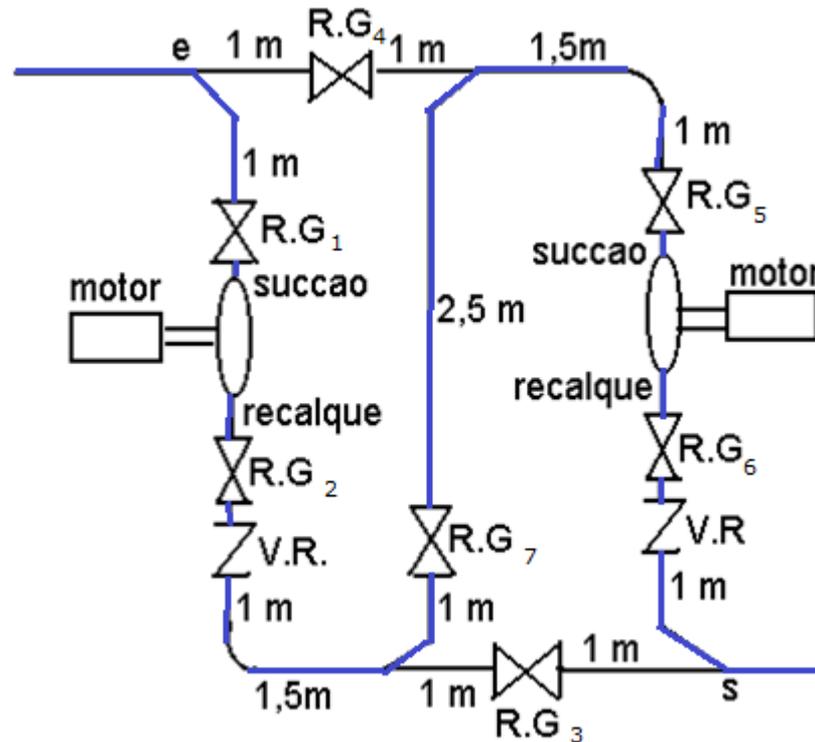
Operação de bombas diferentes em série



$$\eta_{B_{as}} = \frac{H_{B_{as}}}{\frac{H_{B_{B1}}}{\eta_{B_{B1}}} + \frac{H_{B_{B2}}}{\eta_{B_{B2}}}}$$



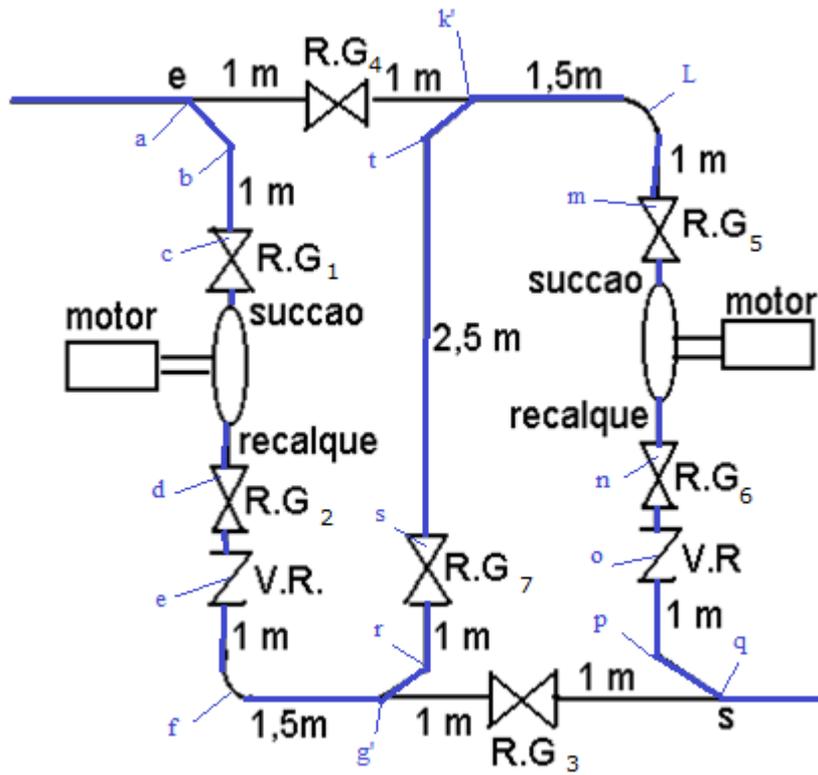
Esta é a possibilidade da associação em série.



Fechamos as válvulas 3 e 4 e abrimos as válvulas 1, 2, 5, 6 e 7 e aí é só obter o L, e a Σl_{eq} !



LEGENDA

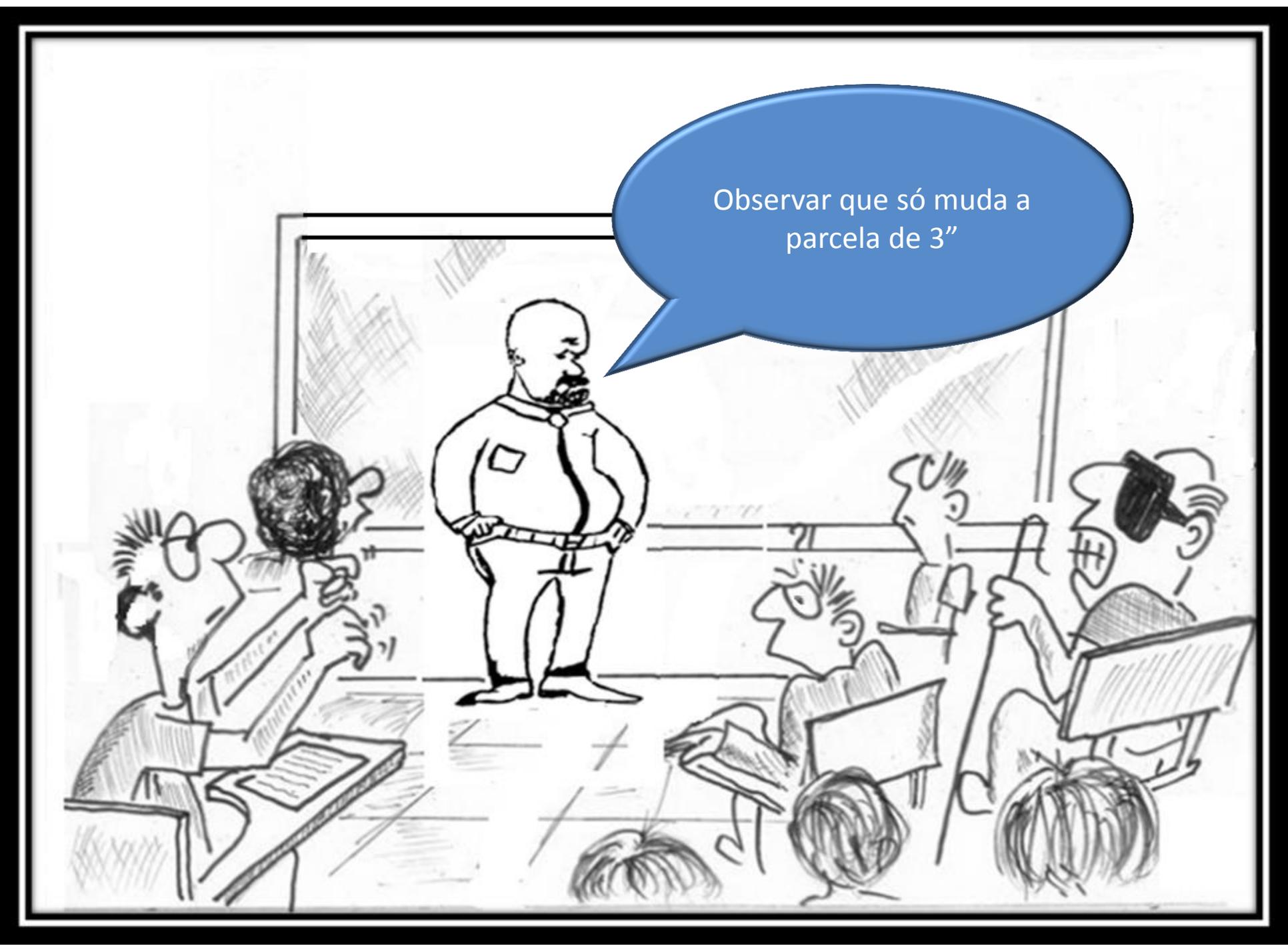


- a, g', k' e q = tê de saída de lado (Tupy)
 b, r, t e p = joelho (fêmea) de 90° (Tupy)
 c, d, s, m e n = registros ou válvulas gaveta (Mipel)
 e, o = válvula de retenção com portinhola (Mipel)
 f e L = curva (fêmea) de 90° (Tupy)

Singularidades	Diâmetro nominal	Leq (m)
a, g', k', q	3"	4,11
b, r, t, p	3"	2,82
c, d, s, m, n	3"	1,03
e, o	3"	3,95
f, L	3"	1,64

$$L_{CM} = 10,5 \text{ m e a}$$

$$\Sigma leq = 44,05 \text{ m}$$

A black and white cartoon illustration of a classroom. A teacher with a beard and a mustache stands at the front, looking at a group of students. The students are seated at desks, some holding papers or books. A large blue speech bubble is positioned above the teacher, containing the text 'Observar que só muda a parcela de 3"'. The drawing style is simple and sketchy.

Observar que só muda a
parcela de 3"

Primeira possibilidade:
tanque de captação
aberto

$$H_S = 27,1 + 10834,9 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2 + f_{3''} \times \frac{(52,5 + 71,69)}{0,0779} \times \frac{Q^2}{19,6 \times (47,7 \times 10^{-4})^2}$$

$$H_S = 27,1 + 10834,9 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2 + f_{3''} \times 3574837,8 \times Q^2$$

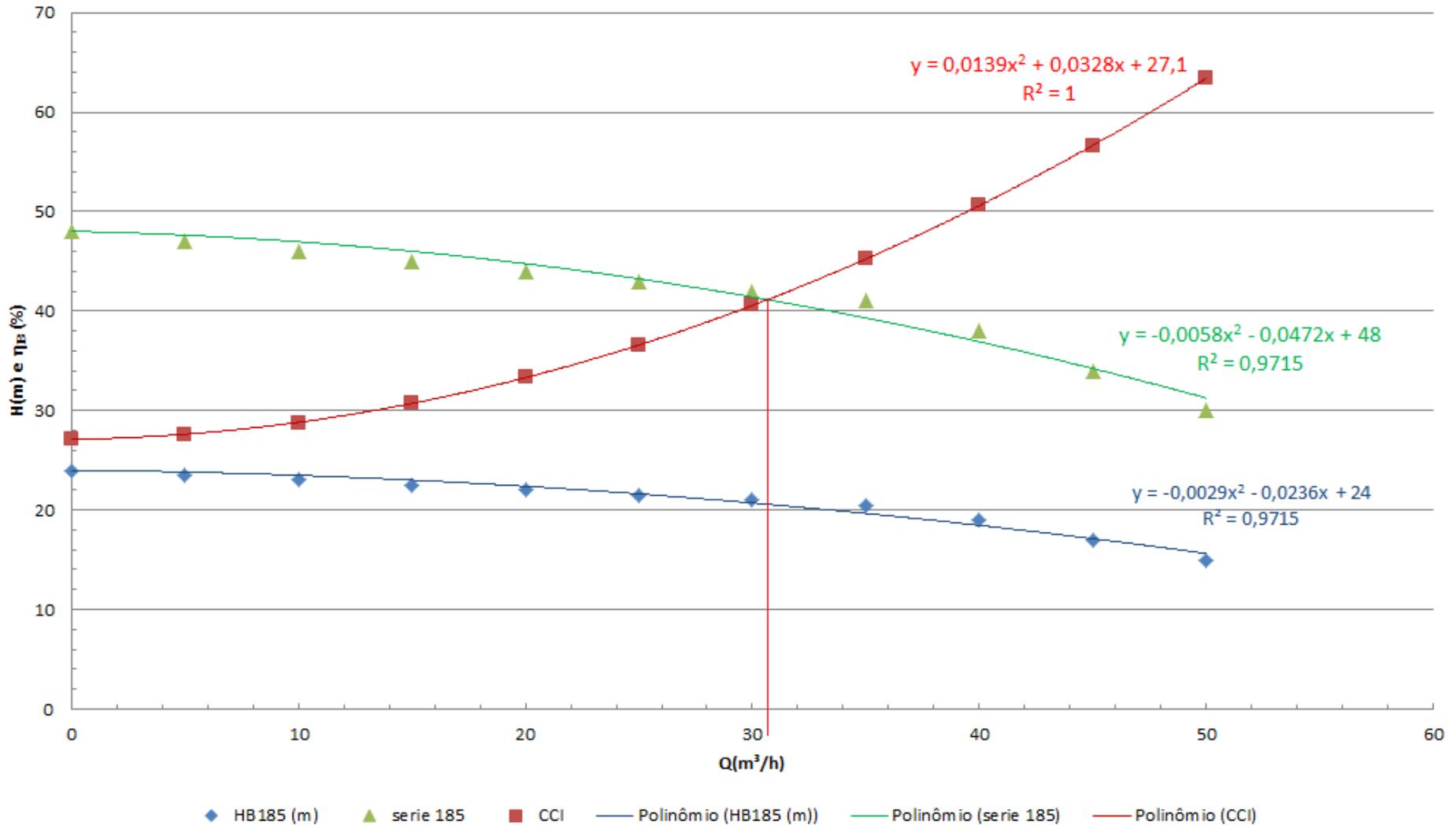
Agora é só
achar o ponto
de trabalho!



Vazão
insuficiente!



Ponto de trabalho associação serie



$$H_B = -0,0029Q^2 - 0,0236Q + 24$$
$$R^2 = 0,9715$$

CCB da bomba Dr = 185 mm

CCB da bomba Dr = 185 mm
associada em série

$$H_{Bas} = -0,0058Q^2 - 0,0472Q + 48$$
$$R^2 = 0,9715$$



O engenheiro
tem que ser um
bom
observador!



A black and white cartoon illustration of a classroom. A teacher with a beard and a mustache stands at the front, looking at a group of students. The students are sitting at desks, some holding papers or books. One student on the right is wearing sunglasses and holding a book. A large blue speech bubble is positioned above the teacher, and a smaller blue speech bubble is positioned below the students on the left. The background shows a chalkboard with some faint lines.

A equação da CCB
em série é igual a
equação da bomba
só multiplicada por 2

Então dá para
trabalhar sem o
Excel!

Isso mesmo. Como a vazão ficou abaixo da vazão de projeto, vamos analisar agora a situação que pressurizamos o nível de captação com 143,9 kPa



Segunda possibilidade:
tanque de captação
pressurizado

$$H_S = 12,4 + 10834,9 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2 + f_{3''} \times \frac{(52,5 + 71,69)}{0,0779} \times \frac{Q^2}{19,6 \times (47,7 \times 10^{-4})^2}$$

$$H_S = 12,4 + 10834,9 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2 + f_{3''} \times 3574837,8 \times Q^2$$

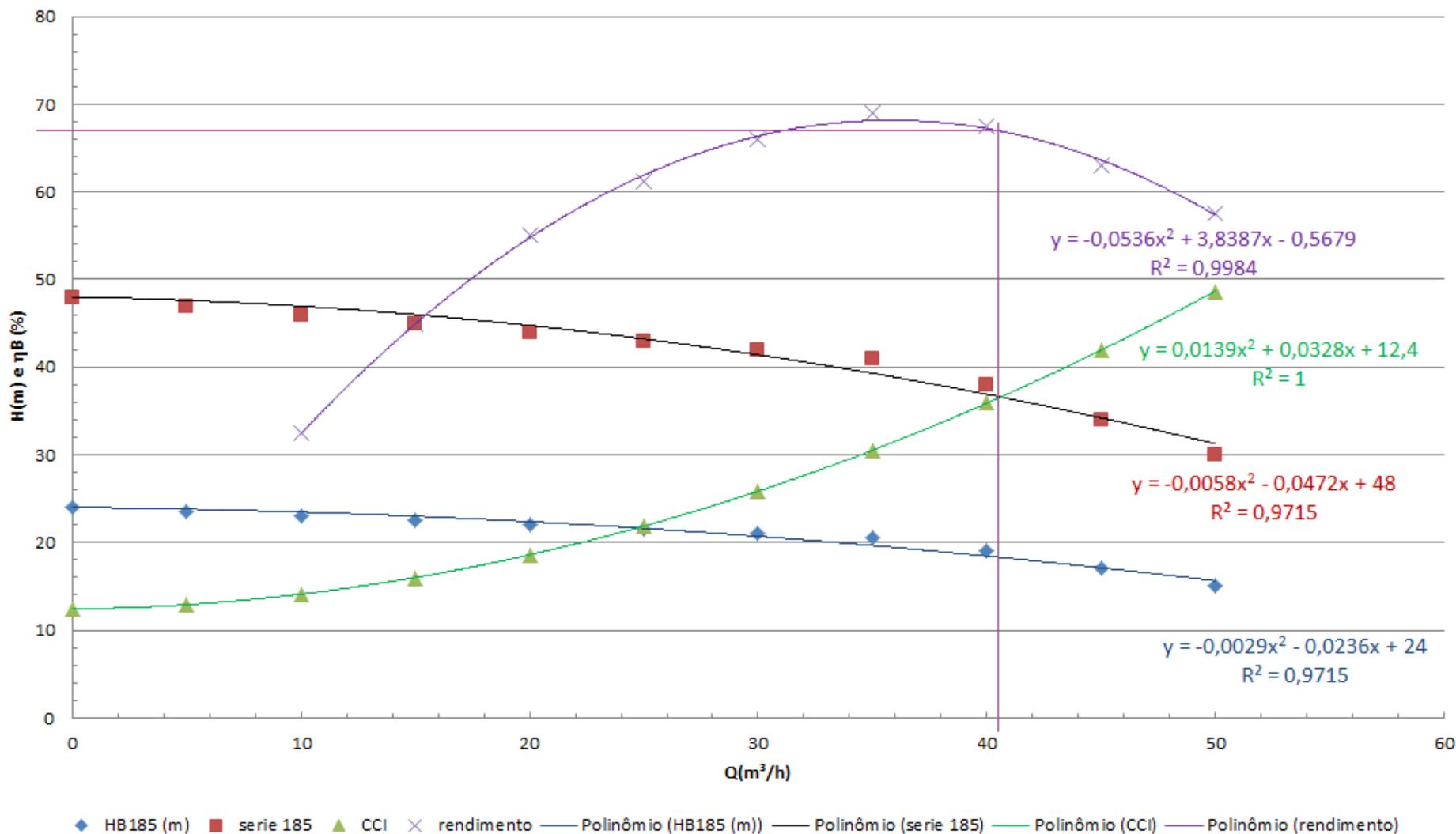
Agora, novamente,
é só achar o ponto
de trabalho!





Esta vazão é suficiente, portanto temos que completar o ponto de trabalho.

Ponto de trabalho assoc. série Dr = 185 mm com tanque pressurizado



Na CCI, com a Q_{projeto}
calculamos o $H_{B\text{projeto}}$ e
para que a bomba
(associação em série)
seja adequada
devemos ter:

$$Q_{\tau} \geq Q_{\text{projeto}}$$
$$H_{B\tau} \geq H_{B\text{projeto}}$$



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

propriedades do local

g =
 patm =

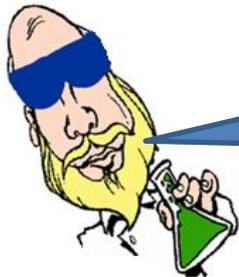
m/s²
 Pa

mat. tubo aço			
espessura	Dint (mm)	A (cm ²)	
	52,5	21.7	
K(m)	DH/k		
4,60E-05	1141		

Q
 m³/h
 35,2

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

Q(m ³ /h)	v(m/s)	Re	$f_{Haaland}$	$f_{Swamee e Jain}$	$f_{Churchill}$	$f_{planilha}$
35,2	4,51	247188	0,0201	0,0204	0,0204	0,0203



Portanto para a tubulação de 2" aço 40 o coeficiente de perda de carga distribuída será 0,0204

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 =
patm =

m/s²
Pa

mat. tubo aço	espessura	Dint (mm)	A (cm ²)
		77,9	47,7
	K(m)	DH/k	
	4,60E-05	1693	

Q (m ³ /h)	Q(m ³ /s)	Q(L/s)	Q(L/min)
35,2			

deve transformar para m³/h

Q(m ³ /h)	v(m/s)	Re	f _{Haaland}	f _{Swamee e Jain}	f _{Churchill}	f _{planilha}
35,2	2,05	166858	0,0194	0,0197	0,0197	0,0196



Portanto para a tubulação de 3" aço 40 o coeficiente de perda de carga distribuída será 0,0197

$$H_S = 12,4 + 10834,9 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2 + f_{3''} \times 3574837,8 \times Q^2$$

$$H_S = 12,4 + 10834,9 \times Q^2 + 0,0204 \times 5419508,3 \times Q^2 + 0,0197 \times 3574837,8 \times Q^2$$

$$H_S = H_{B_{projeto}} = 30,8m$$

Igualando as equações da CCI com a CCB, obtemos o ponto de trabalho.



$$-0,0058 \times Q^2 - 0,0472 \times Q + 48 = 0,0139 \times Q^2 + 0,0328 \times Q + 12,4$$

$$0,0197 \times Q^2 + 0,08 \times Q - 35,6 = 0$$

$$Q_\tau = \frac{-0,08 + \sqrt{0,08^2 + 4 \times 0,0197 \times 35,6}}{2 \times 0,0197}$$

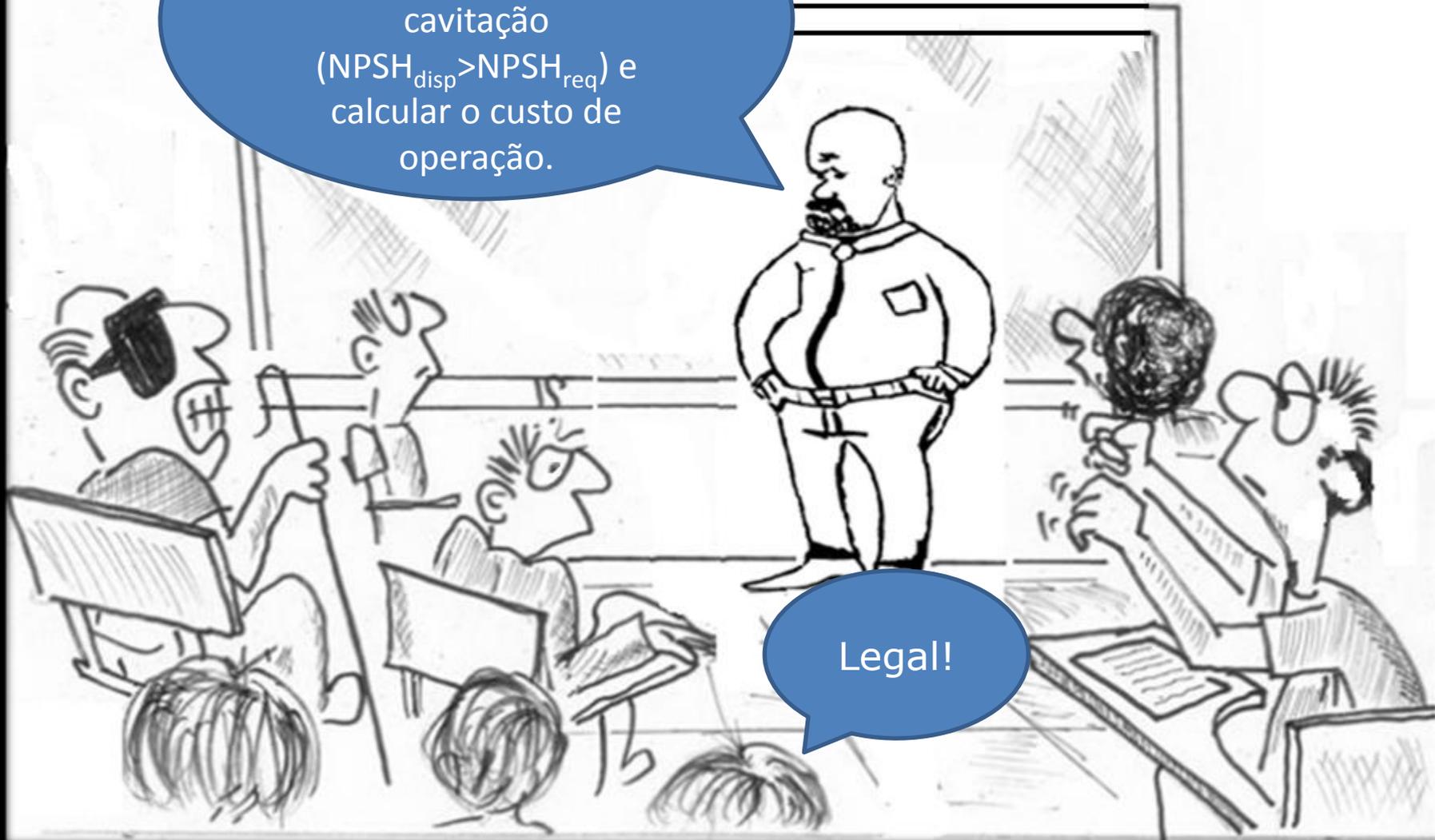
$$Q_\tau \cong 40,5 \frac{m^3}{h} > Q_{projeto} \therefore ok$$

$$H_{B_\tau} = 0,0139 \times 40,5^2 + 0,0328 \times 40,5 + 12,4$$

$$H_{B_\tau} \cong 36,5m > H_{B_{projeto}} \therefore ok$$

Agora é só calcular a
potência da bomba (N_B),
verificar o fenômeno de
cavitação
($NPSH_{disp} > NPSH_{req}$) e
calcular o custo de
operação.

Legal!



Potência da bomba

$$\eta_B = -0,0536 \times 40,5^2 + 3,8387 \times 40,5 - 0,5679$$

$$\eta_B \cong 67\%$$

$$\therefore N_B = \frac{\gamma \times Q \times H_B}{\eta_B} = \frac{997,8 \times 9,8 \times \left(\frac{40,5}{3600} \right) \times 36,5}{0,67}$$

$$N_{B\tau} \cong 5993W$$

Esta potência será utilizada para escolha do motor e para o cálculo do custo de operação!



Verificação do fenômeno de cavitação

Considere que a instalação encontra-se em um local com a pressão atmosférica igual a 700 mmHg com massa específica do Hg igual a 13541 kg/m^3 e a pressão de vapor igual a 0,02642 bar



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 lateral	4,11	Tupy	3"	77,9	47,7
13	Válvula gaveta	1,03	Mipel	3"	77,9	47,7
14	Joelho fêmea de 90 ⁰	2,82	Tupy	3"	77,9	47,7
a	Tê de passagem lateral	4,11	Tupy	3"	77,9	47,7
b	Joelho fêmea de 90 ⁰	2,82	Tupy	3"	77,9	47,7
c	Válvula gaveta	1,03	Mipel	3"	77,9	47,7



As singularidade "a", "b" e "c" encontram-se na casa de máquina e deve-se também acrescentar 1m de tubo dentro da casa de máquina.

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = z_i + \frac{P_{i\text{abs}} - P_{\text{vapor}}}{\gamma} - H_{\text{paB1}}$$

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = 15 + \frac{(143900 + 0,7 \times 13541 \times 9,8 - 0,02642 \times 10^5)}{997,8 \times 9,8}$$

$$- 0,0195 \times \frac{(32 + 23,69)}{0,0779} \times \frac{\left(\frac{40,5}{3600}\right)^2}{19,6 \times (47,7 \times 10^{-4})^2}$$

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} \cong 34,9\text{m}$$



Com este valor jamais irá ocorrer a cavitação

Prova!



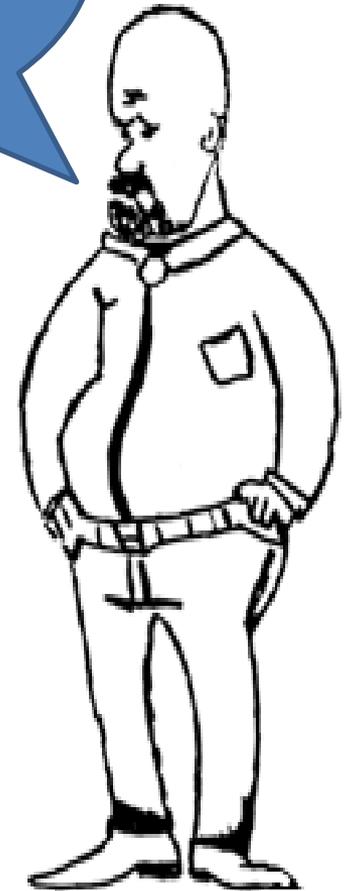
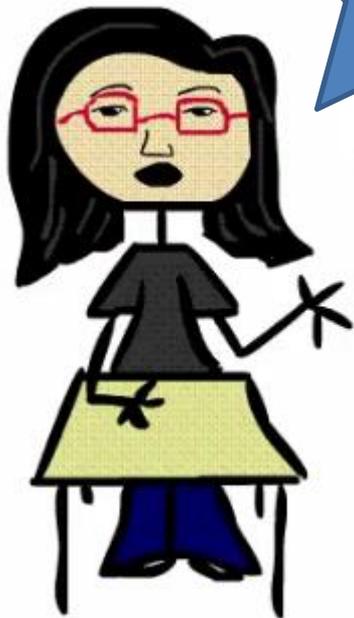
Verificando o fenômeno
de cavitação!

O que fazer
quando não é
dado o
 $NPSH_{requerido}$ pelo
fabricante?

?

Devemos recorrer
ao fator de Thoma,
o qual depende da
rotação específica.

O que vem
a ser
rotação
específica?





O cálculo da rotação específica é feito pela expressão ao lado

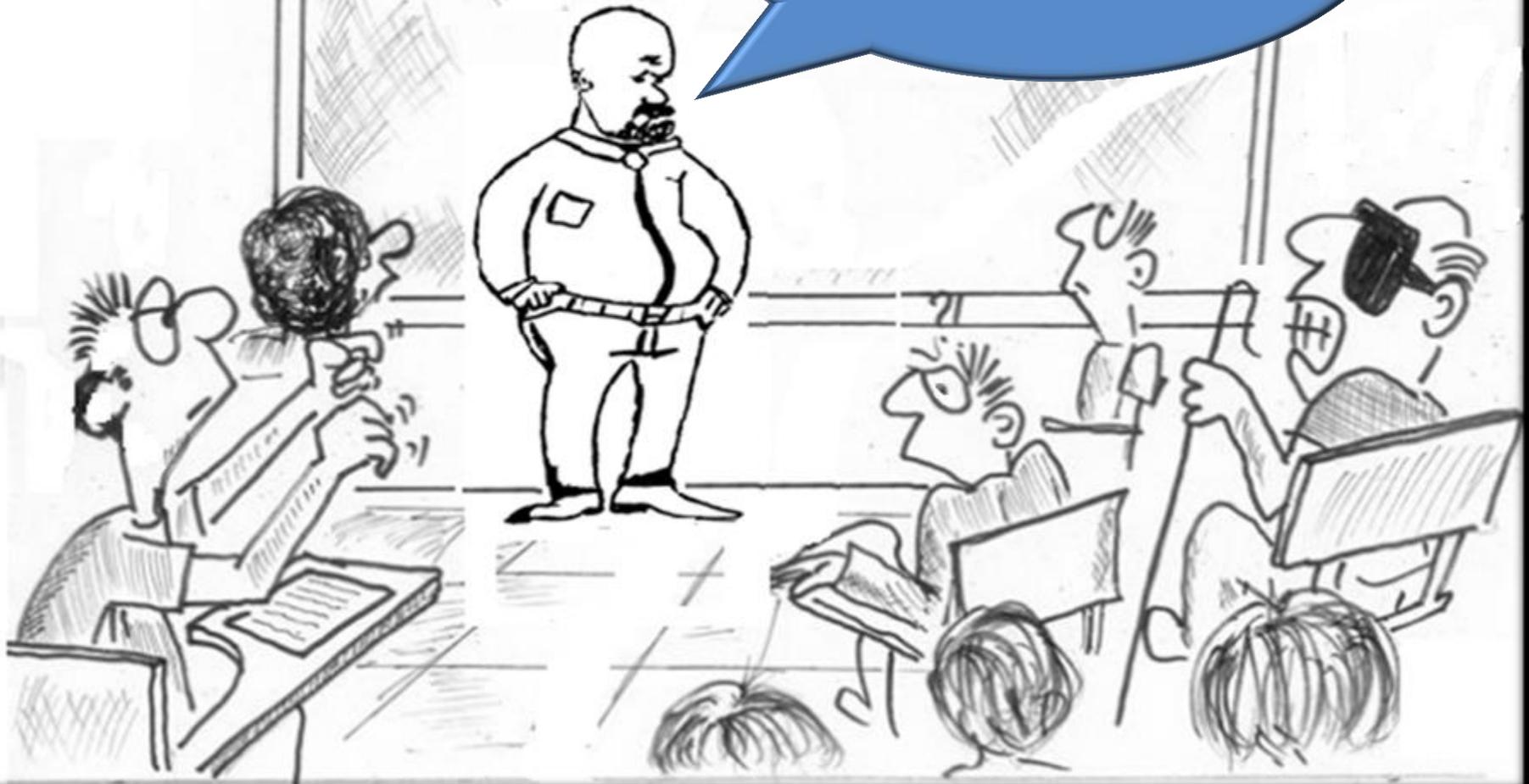
$$n_s = 3,65 \times \frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}}$$

Denomina-se número específico de rotações por minuto ou velocidade específica real da bomba.

Se na equação acima a Q for dada em L/s ao invés de m³/s, o fator 3,65 se converte em 0,1155.

A bomba Hero 50-C tem 3450 rpm

A rotação específica (n_s)
possibilita obter uma
classificação básica da
bomba centrífuga





Baseados nos resultados obtidos com as bombas ensaiadas e no seu custo, o qual depende das dimensões da bomba, os fabricantes elaboraram tabelas, gráficos e ábacos, delimitando o campo de emprego de cada tipo conforme a rotação específica, de modo a proceder a uma escolha que atenda as exigências de bom rendimento e baixo custo.

CLASSIFICAÇÃO BÁSICA

1. LENTAS – $30 < n_s < 90$ rpm = bombas centrífugas puras, com pás cilíndricas, radiais, para pequenas e médias vazões.
2. NORMAIS – $90 < n_s < 130$ rpm = bombas semelhantes as anteriores.
3. RÁPIDAS - $130 < n_s < 220$ rpm – possuem pás de dupla curvatura, vazões médias
4. EXTRA-RÁPIDA ou HÉLICO-CENTRÍFUGA – $220 < n_s < 440$ rpm = pás de dupla curvatura – vazões médias e grandes.
5. HELICOIDAIS – $440 < n_s < 500$ rpm – para vazões grandes.
6. AXIAIS – $n_s > 500$ rpm – assemelham-se a hélices de propulsão e destinam-se a grandes vazões e pequenos H_B



Para o nosso caso,
temos:

$$n_s = 3,65 \times \frac{3450 \times \sqrt{\frac{40,5}{3600}}}{\sqrt[4]{\left(\frac{36,5}{2}\right)^3}} \cong 151,3\text{rpm}$$



Portanto, trata-se de
uma bomba
centrífuga lenta.



Tendo a rotação específica (n_s), vamos calcular a rotação nominal (n_q) que é utilizada para se estimar o $NPSH_{\text{requerido}}$.



Importante

$$n_q = \frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}}$$

$$\therefore n_S = 3,65 \times n_q$$

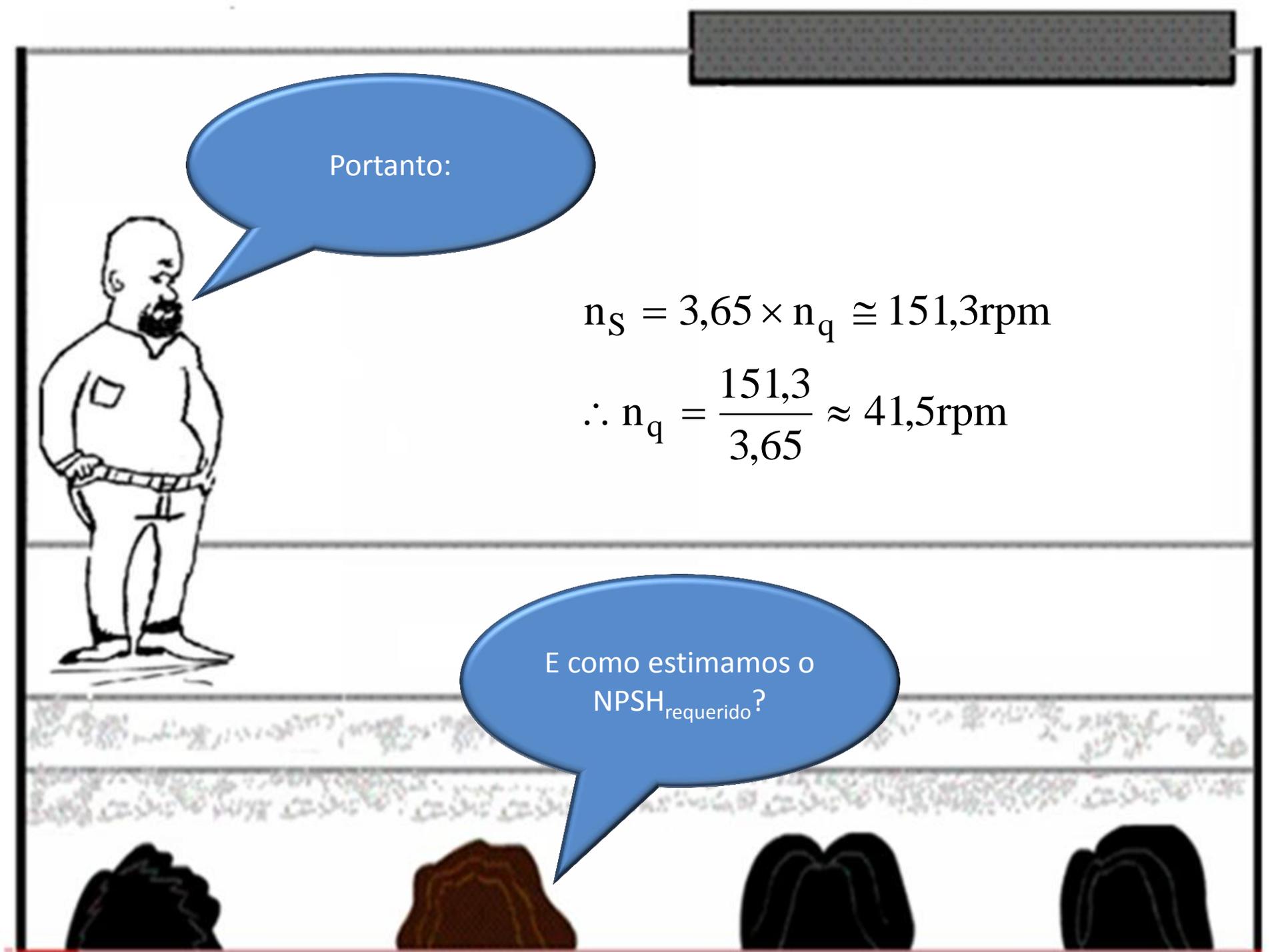
Os norte-americanos usam U.S galão por minuto como unidade de vazão e pés para a carga manométrica, de modo que teremos que converter as unidade:

$$n_{S_{\text{métrico}}} = \frac{n_{S_{\text{USA}}}}{14,15}$$

$$\therefore n_{S_{\text{USA}}} = 3,65 \times 14,15 \times n_{q_{\text{métrico}}}$$

$$n_{S_{\text{USA}}} \cong 52 \times n_{q_{\text{métrico}}}$$





Portanto:

$$n_s = 3,65 \times n_q \cong 151,3\text{rpm}$$

$$\therefore n_q = \frac{151,3}{3,65} \approx 41,5\text{rpm}$$

E como estimamos o
 $NPSH_{\text{requerido}}$?



Conhecida a rotação específica nominal (n_q), podemos calcular o fator de Thoma (σ ou θ)

$$\sigma = \varphi \times n_q^{4/3} = \varphi \times \left(\frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}} \right)^{4/3}$$

e

$$\text{NPSH}_{\text{requerido}} = \sigma \times H_B$$

φ ?

$\phi = 0,0011 \rightarrow$ para bombas centrífugas radiais, lentas e normais ;
 $\phi = 0,0013 \rightarrow$ para bombas helicoidais e hélico-axiais
 $\phi = 0,00145 \rightarrow$ para bombas axiais

ϕ é um fator que depende da própria rotação específica



Para o nosso caso
 $\phi = 0,0011$



Calculamos
então o fator de
Thoma

$$\sigma = \varphi \times n_q^{4/3} = 0,0011 \times (41,5)^{4/3}$$
$$\sigma \cong 0,158$$

Com o fator de
Thoma podemos
estimar o $NPSH_{req}$





Tendo o fator de Thoma, pode-se calcular o NPSHR, isto porque:

$$\text{NPSH}_R = \sigma \times H_B$$

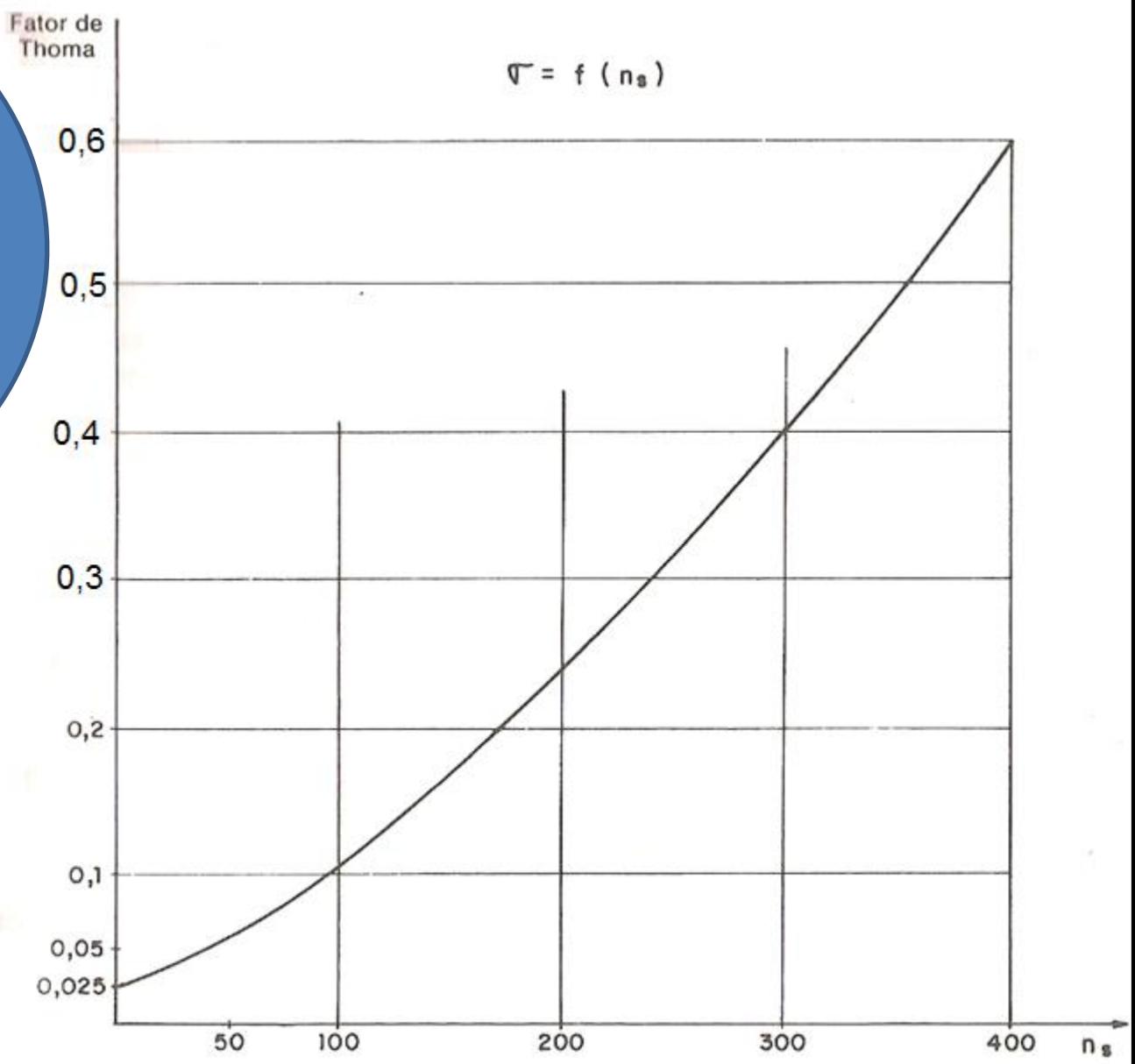
$$\therefore \text{NPSH}_R = 0,158 \times \frac{36,5}{2}$$

$$\text{NPSH}_R \cong 2,9\text{m}$$

O Fator de Thoma pode também ser obtido graficamente.

Sim pelo gráfico dado por Stepanoff.

Gráfico extraído da página 215 do livro: Bombas e Instalações de Bombeamento, escrito por Archibald Joseph Macintyre e editado pela LTC em 2008



Fator de cavitação de Thoma em função da velocidade específica.



Aí verificamos
o fenômeno de
cavitação.

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} - \text{NPSH}_{\text{req}} = 34,9 - 2,9 = 32\text{m}$$

∴ não cavita