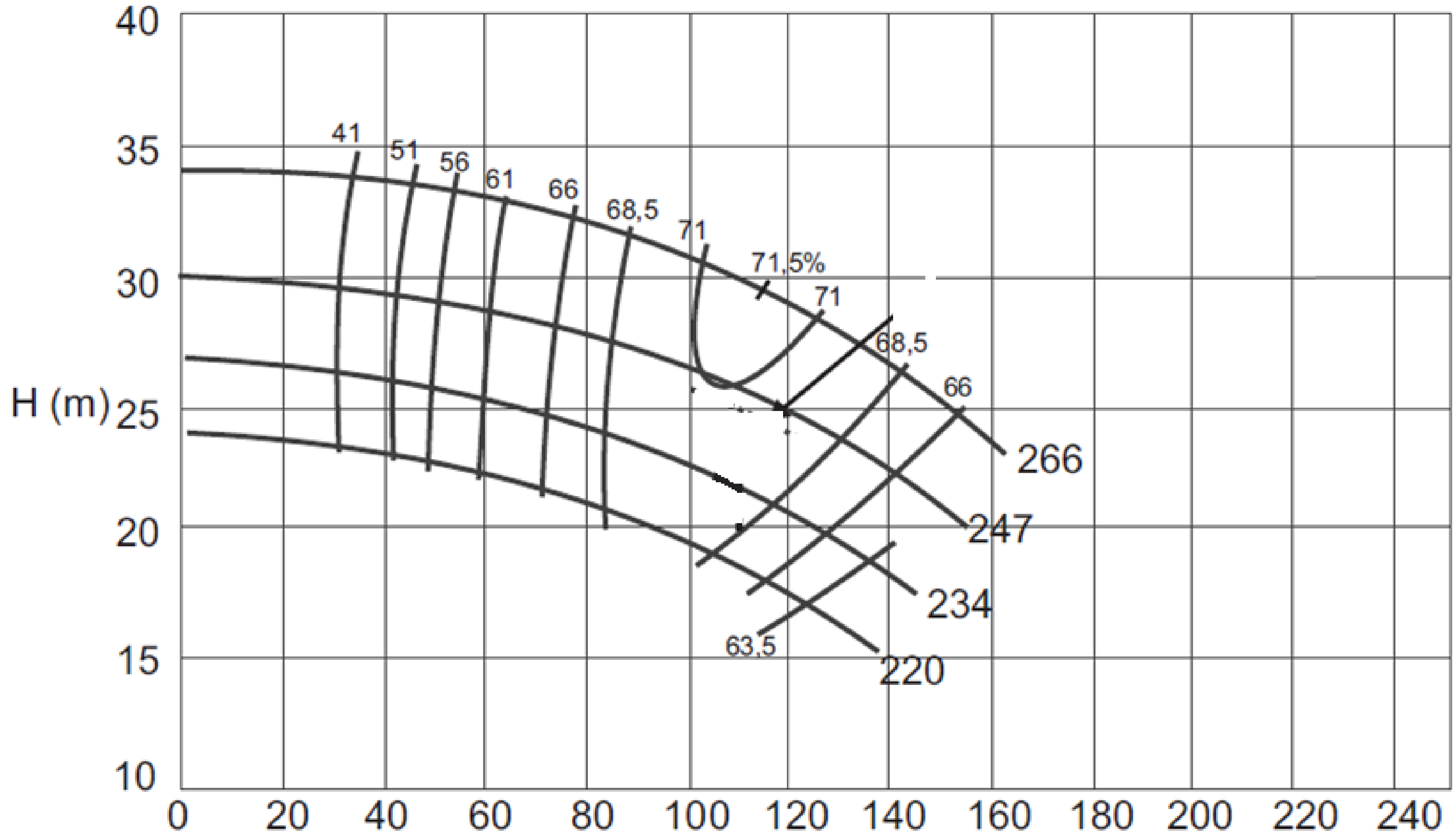
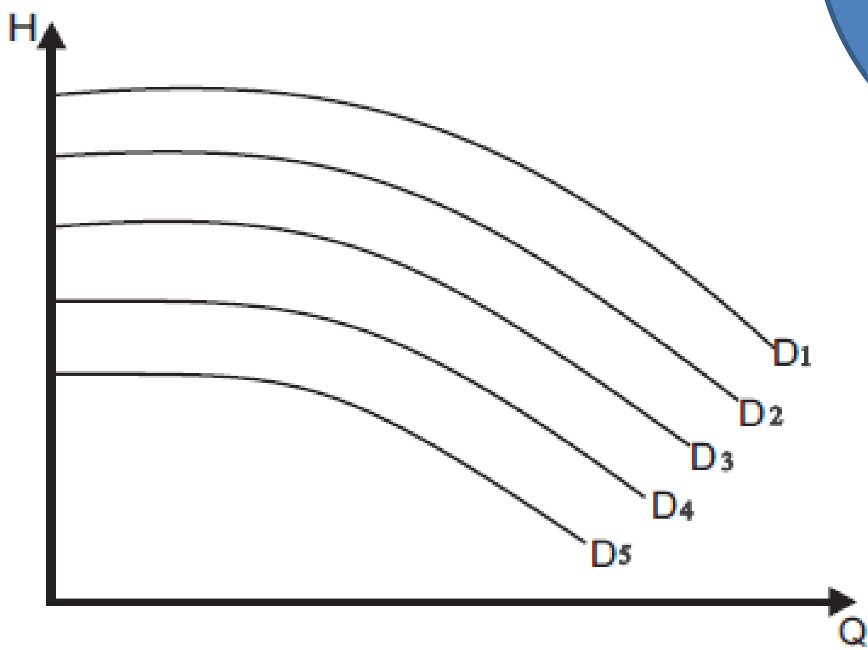
Aula 14 de teoria de ME5330

Redução do diâmetro do rotor, rotação específica e sua utilização em projetos de instalações de bombeamento.



Vamos considerar um exemplo extraído do manual da KSB

Antes vamos refletir sobre as curvas acima.


H
Q
D1
D2
D3
D4
D5

$D_1 > D_2 > D_3 > D_4 > D_5$


Será que os fabricantes ensaiam todos esses rotores?

NÃO!

Os fabricantes partem do diâmetro do rotor máximo e o cortam em função da necessidade. Nas curvas do exemplo, partiu-se de 266 mm e se reduziu para 247, 234 e 220 mm.

E a redução do diâmetro do rotor radial de uma bomba, mantendo a mesma rotação, a curva característica da bomba se altera aproximadamente de acordo com as seguintes equações:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{D_{R_m}}{D_{R_p}} ; \frac{H_{B_m}}{H_{B_p}} = \left(\frac{D_{R_m}}{D_{R_p}} \right)^2 ; \frac{N_{B_m}}{N_{B_p}} = \left(\frac{D_{R_m}}{D_{R_p}} \right)^3$$

$$\therefore \frac{D_{R_m}}{D_{R_p}} = \frac{Q_m}{Q_p} = \sqrt{\frac{H_{B_m}}{H_{B_p}}} = \sqrt[3]{\frac{N_{B_m}}{N_{B_p}}}$$

Importante salientar que existem autores que propõem que o expoente da relação de diâmetros na expressão de Q deva ser entre 0,9 e 1,1 e outros autores afirmam que este expoente deve ser 2.

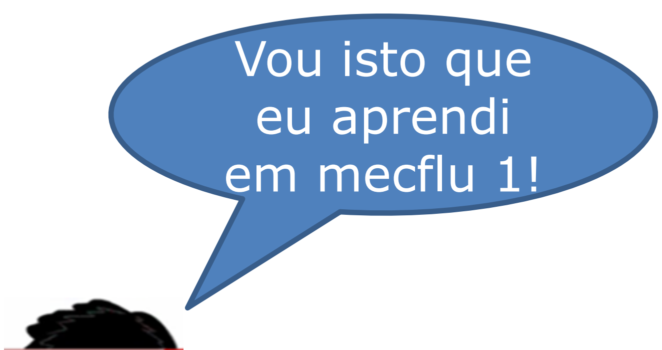
MUITOS DEVEM ESTAR PENSANDO: “MAS NÃO FOI ISSO QUE EU APRENDI EM MECFLU 1”

O PRÓXIMA SLIDE DEVE TIRAR ESSA DÚVIDA

Influência do Diâmetro do Rotor

Nesta análise é importante se distinguir duas situações diferentes. A primeira delas é quando se trata de bombas geometricamente semelhantes, isto é, bombas cujas dimensões físicas têm um fator de proporcionalidade constante. Neste caso, a análise dos parâmetros adimensionais fornece as relações:

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \left(\frac{D_{Rp}}{D_{Rm}} \right)^3; \qquad \frac{H_{Bp}}{H_{Bm}} = \left(\frac{D_{Rp}}{D_{Rm}} \right)^2 \quad \text{e} \quad \frac{N_{Bp}}{N_{Bm}} = \left(\frac{D_{Rp}}{D_{Rm}} \right)^5$$



A outra situação é aquela na qual existe uma redução no diâmetro externo do rotor, permanecendo as outras características físicas constantes. Esta alternativa é utilizada pelos fabricantes de bombas para ampliar a faixa de operação de suas máquinas. Desta forma, são montadas bombas com volutas idênticas, porém com rotores de diâmetro diferentes. Deve-se ter em mente que esta redução é limitada, pois a redução grande do diâmetro do rotor faz com que a eficiência da bomba seja bastante reduzida. Na prática esta redução está limitada a cerca de 20% do maior rotor. Neste caso, a análise não pode ser feita diretamente pelos parâmetros adimensionais. Pela recomendação de Karassik e Stepanoff, temos :

$$\frac{Q_2}{Q_1}=\left(\frac{D_{R2}}{D_{R1}}\right); \qquad \frac{H_{B2}}{H_{B1}}=\left(\frac{D_{R2}}{D_{R1}}\right)^2 \quad \text{e} \quad \frac{N_{B2}}{N_{B1}}=\left(\frac{D_{R2}}{D_{R1}}\right)^3$$

E aí existe outra possibilidade …

Sim, consideramos que as vazões variam com os quadrados dos diâmetros dos rotores:

$$\frac{Q_p}{Q_C} = \frac{D_{Rp}^2}{D_{Rm}^2}$$

Segundo Karassik consultor de Bombas Centrífugas em Centrifugal Pumps , com exceção das centrífugas lentas, ou seja, para as centrífugas normais com reduções até 20%, na prática a vazão varia diretamente com o diâmetro do rotor o que mostra uma diferença em relação ao coeficiente de vazão.

$$\phi = \frac{Q}{n \times D_r^3} \rightarrow \text{coeficiente de vazão}$$

Conhecemos a curva característica da bomba H_B=f(Q) para um diâmetro de rotor D_{Rm} e uma certa rotação n. Desejamos determinar, para os valores novos H_{Bp} e Q_p o diâmetro D_{Rp}.

Marcamos o ponto A por suas coordenadas H_{Bp} e Q_p e unimos este ponto a origem cartesiana.

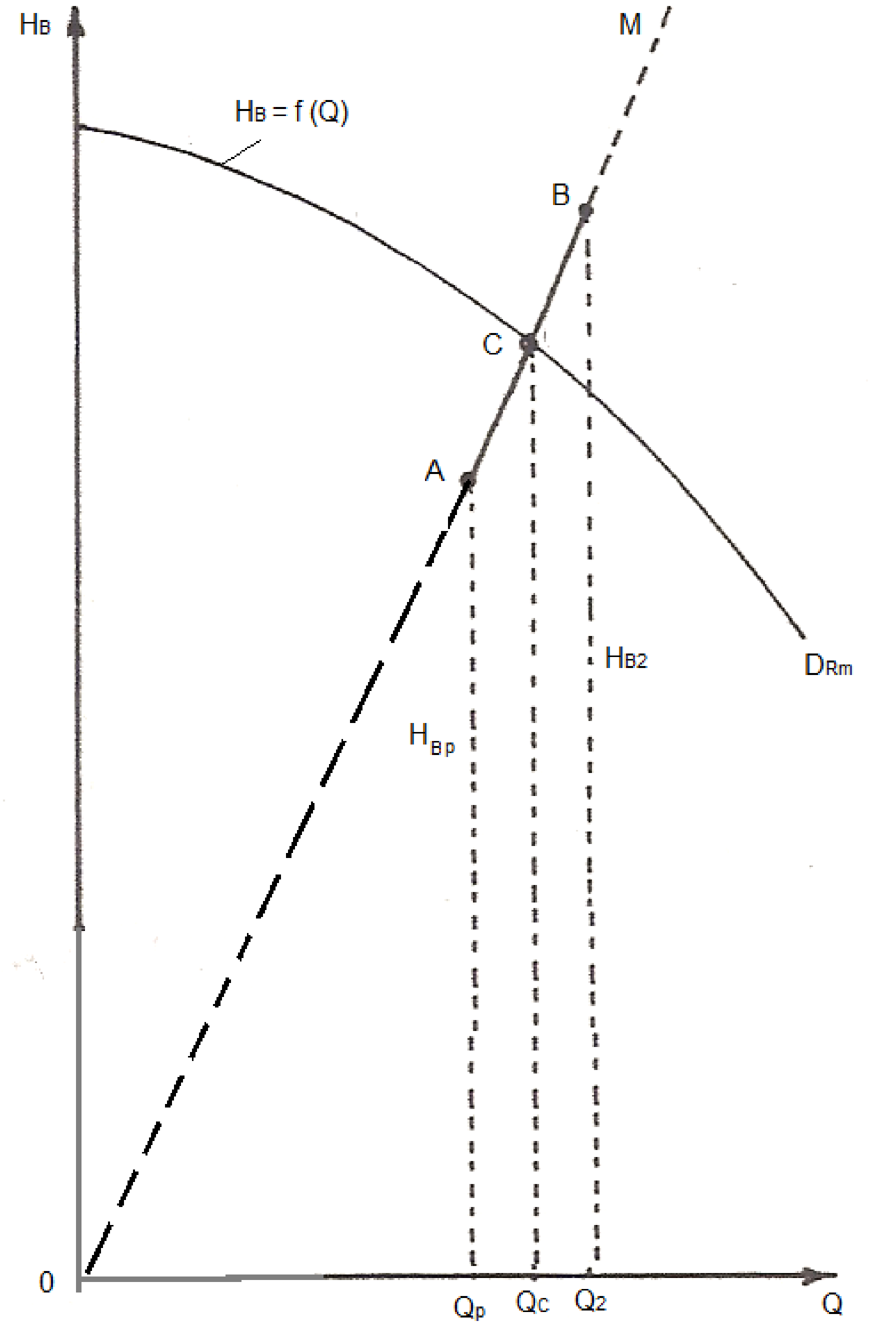
Adotamos uma vazão Q_2 pertencente a reta que passa pela origem e ponto A e que é maior que Q_p e Q_c para achar a carga correspondente a essa vazão, recorremos:

$$H_{B2} = H_{Bp} \times \left(\frac{Q_2}{Q_p}\right)^2$$

o que nos permite marcar o ponto B.

Ligamos B a A e a origem do eixo cartesiano e determinamos o ponto C sobre a curva da bomba e isso, além de possibilitar a obtenção da vazão Q_C nos permite determinar D_{Rp}:

$$\frac{Q_p}{Q_C} = \frac{D_{Rp}}{D_{Rm}}$$



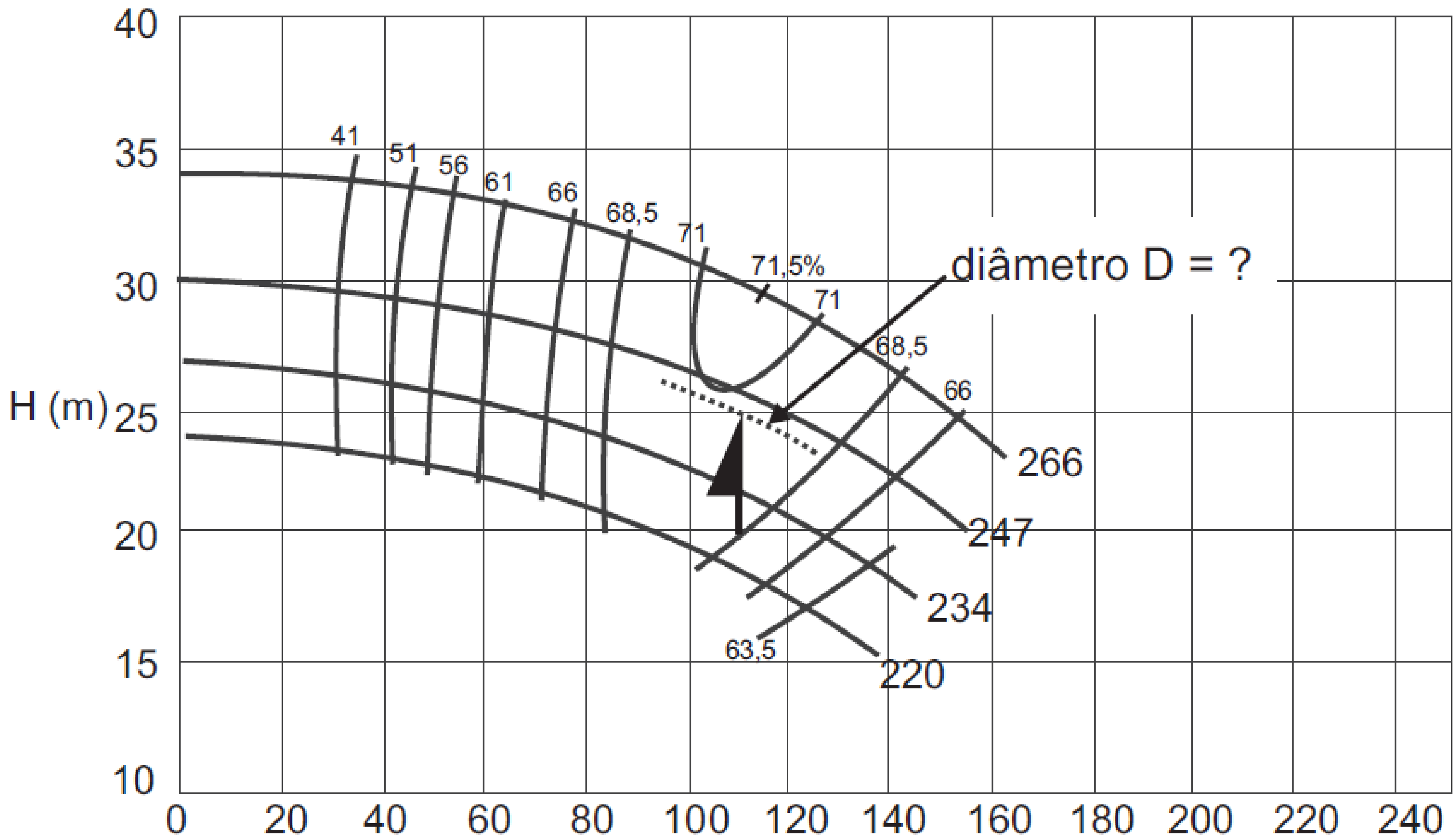

Outra referência seria o livro de Stepanoff

Stepanoff afirma que a relação dos diâmetro dos rotores é a mesma que a das vazões, mas introduz uma correção como mostra a tabela a seguir:

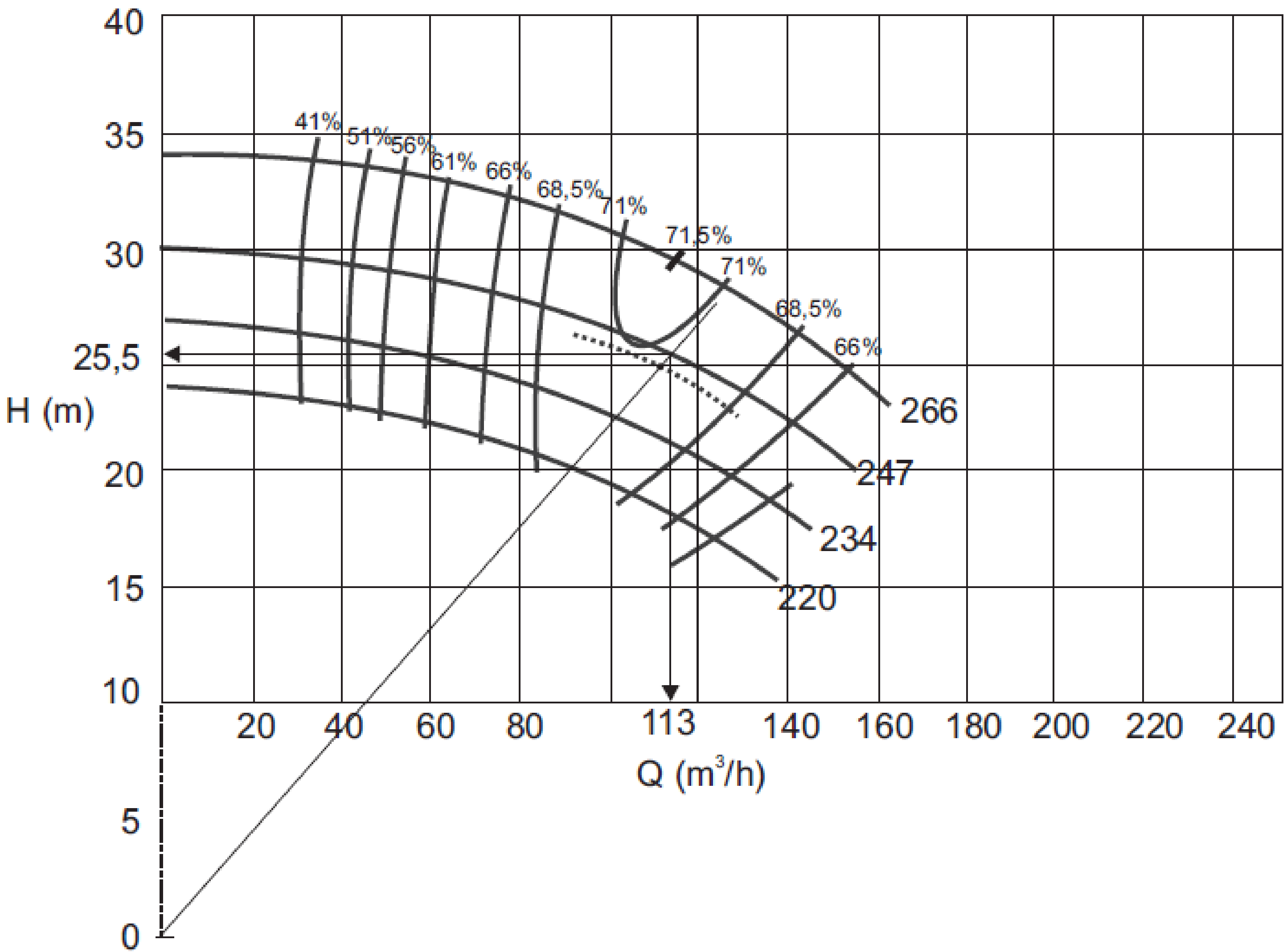
Diâmetro calculado em % do diâmetro original	65	70	75	80	85	90	95
Diâmetro necessário em % do diâmetro original	71	73	78	83	87	91,5	95,5


Vamos considerar um exemplo numérico.

Para uma vazão de 110 m³/h e uma altura manométrica de 25 m determine o diâmetro do rotor.



Como este plano cartesiano não apresenta a origem, encontramos a origem do plano utilizando a mesma escala; traçamos a reta desta origem encontrada passando pelo ponto de operação e atingindo o D_{rotor} imediatamente acima, conforme mostrado abaixo, e encontramos Q = 113m /h e H = 25,5 m para o D_{rotor} = 247 mm.



Utilizando as fórmulas apresentadas, calcula-se o diâmetro do rotor:

$$D = D_1 \times \frac{Q}{Q_1} \Rightarrow D = 247 \times \frac{110}{113} \cong 240{,}4\text{mm}$$

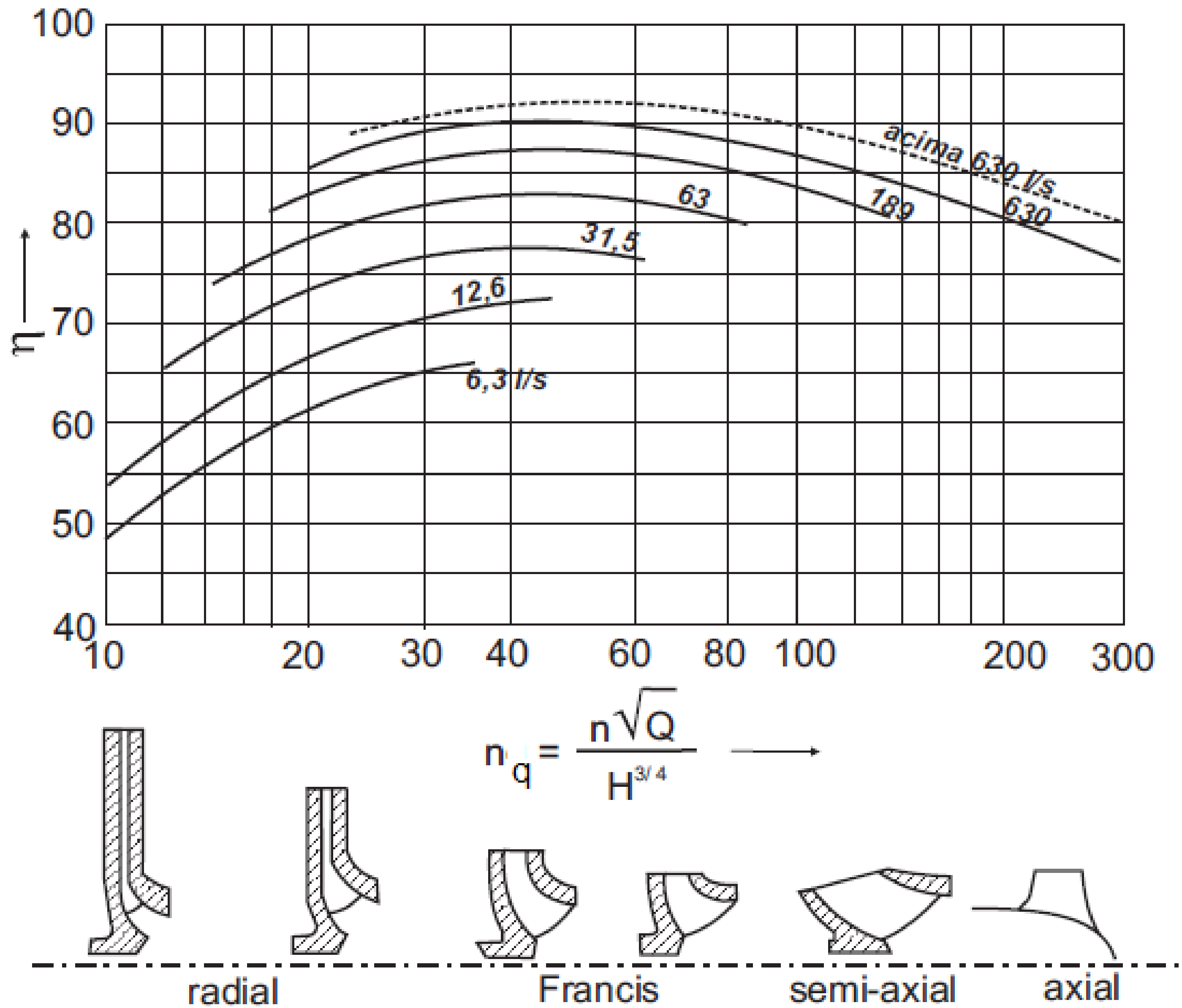
$$D = D_1 \times \sqrt{\frac{Q}{Q_1}} \Rightarrow D = 247 \times \sqrt{\frac{110}{113}} \therefore D \cong 243\text{mm}$$

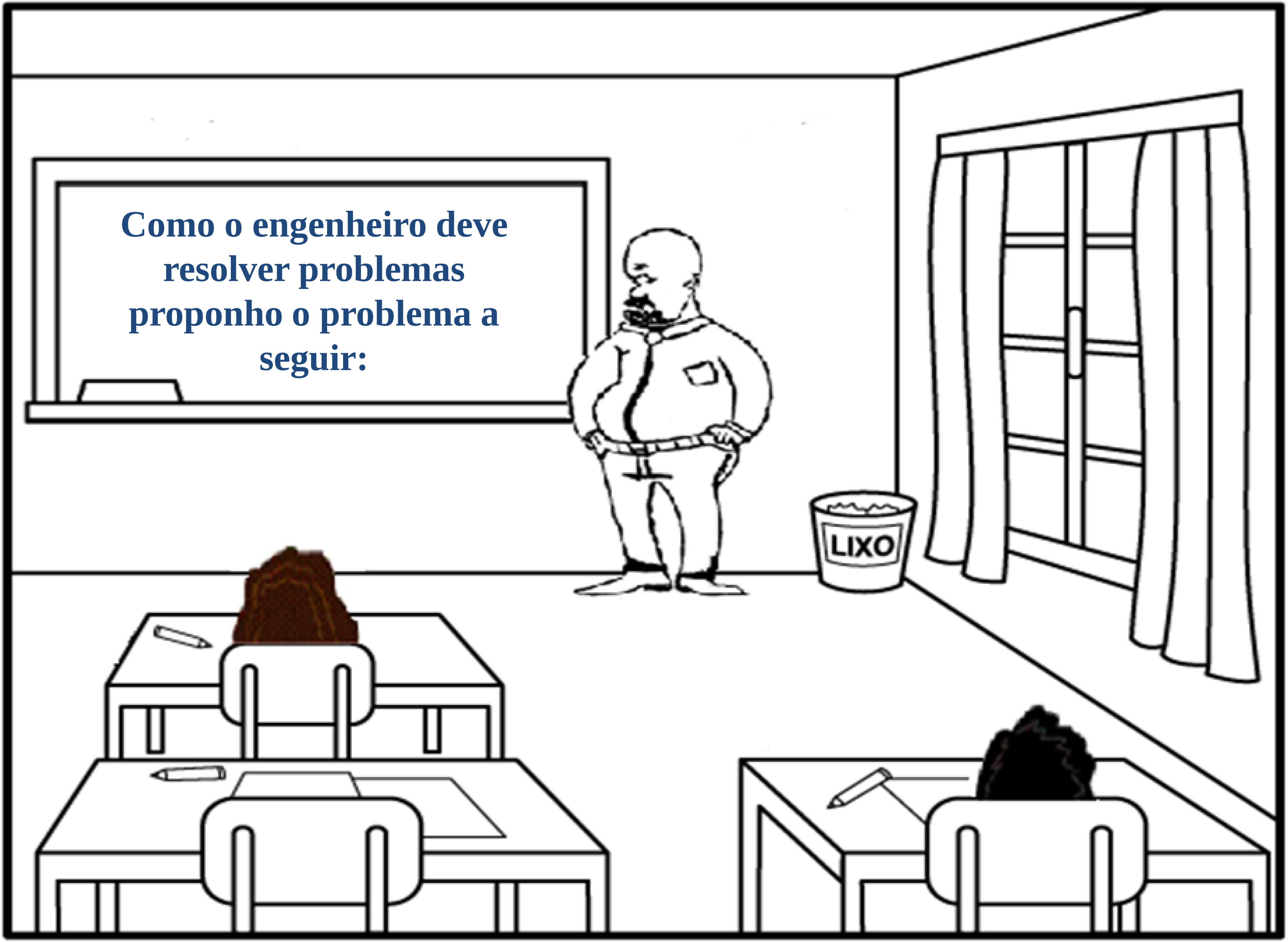
$$D = D_1 \times \sqrt{\frac{H}{H_1}} = D = 247 \times \sqrt{\frac{25}{25{,}5}} \therefore D \cong 244{,}5\text{mm}$$

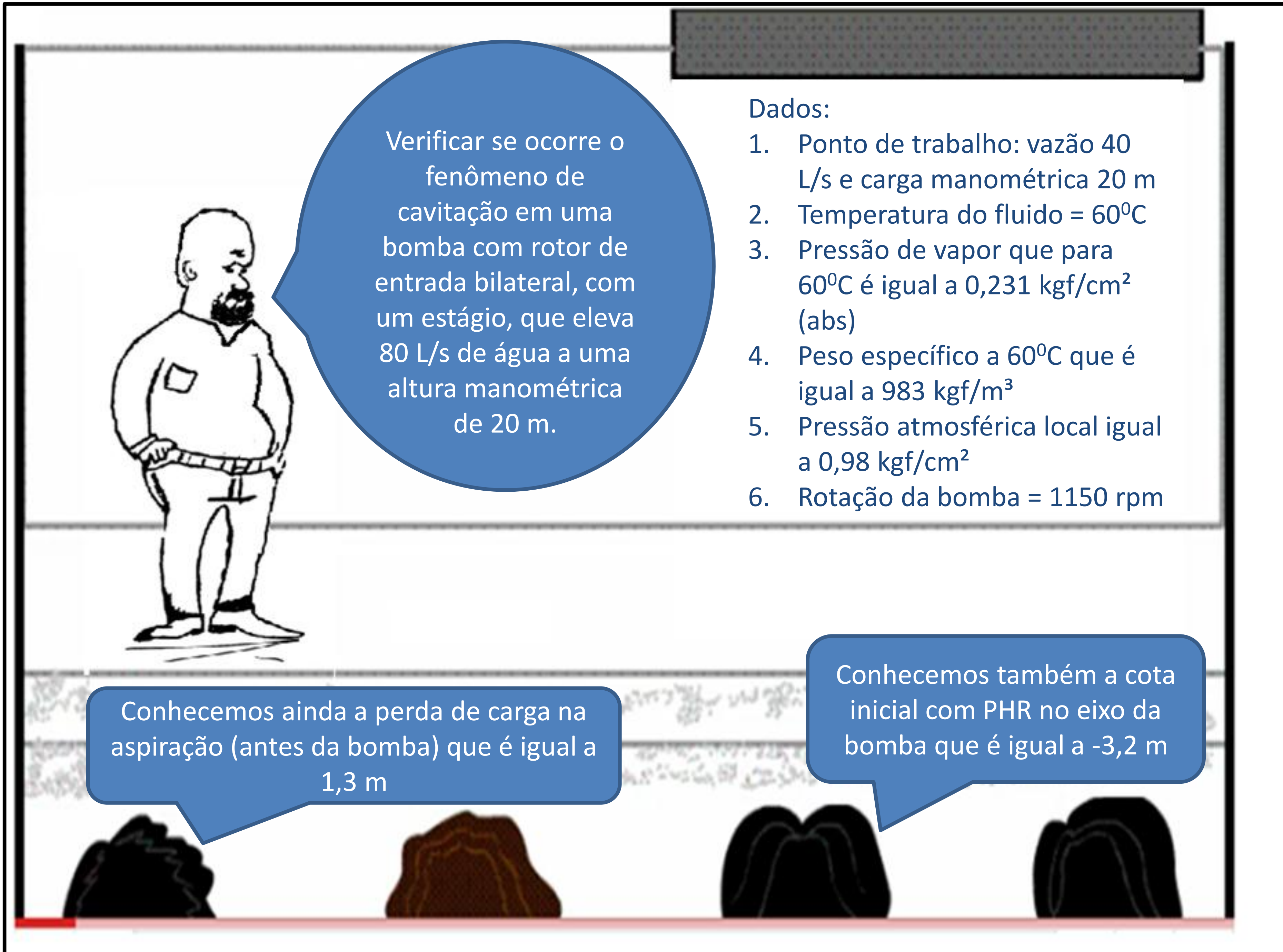
Por motivo de segurança, utilizamos o diâmetro maior, ou seja, D= 244,5 mm.

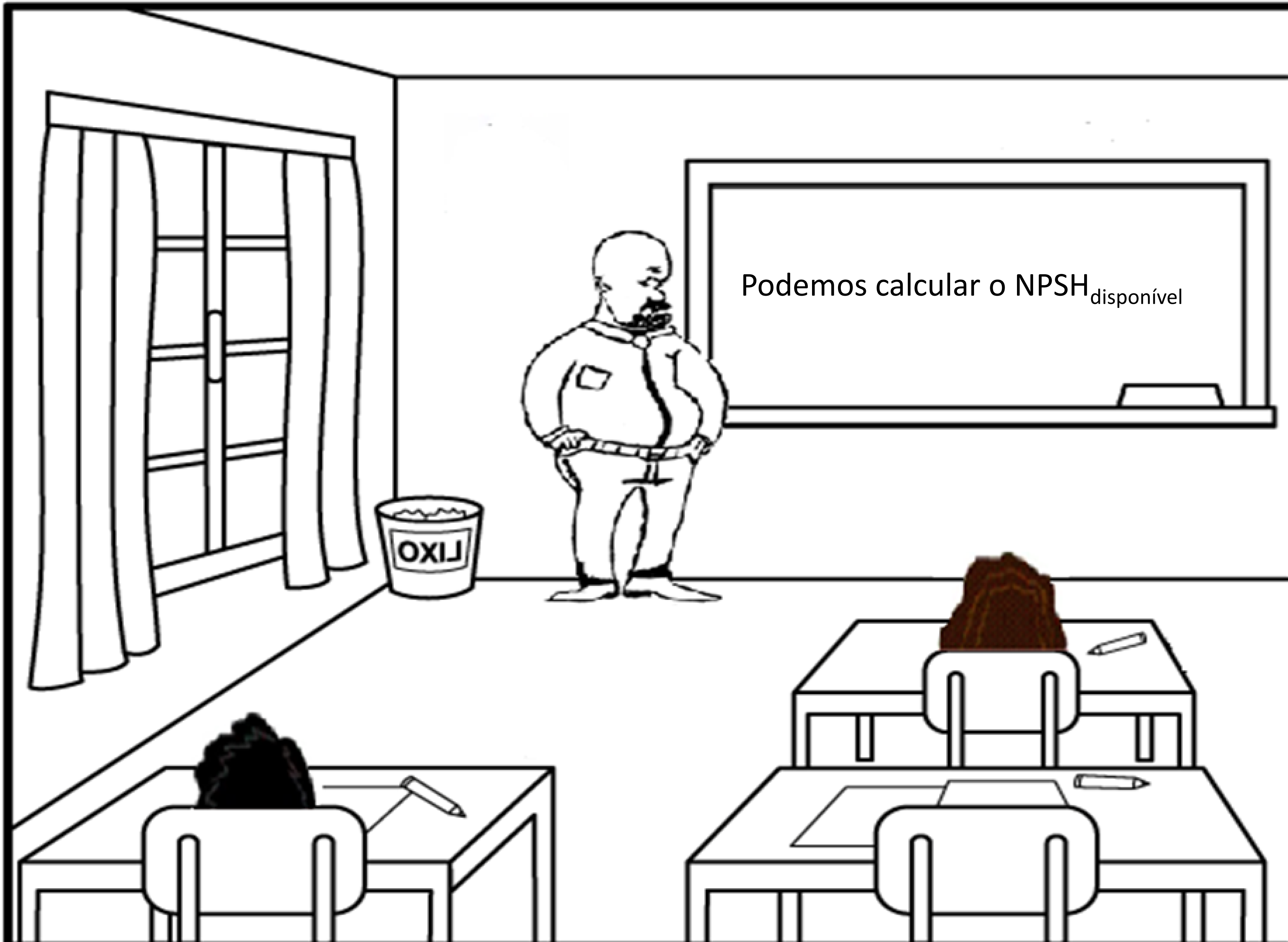
Vamos agora introduzir a rotação específica

Ela pode ser importante para estimar o rendimento.

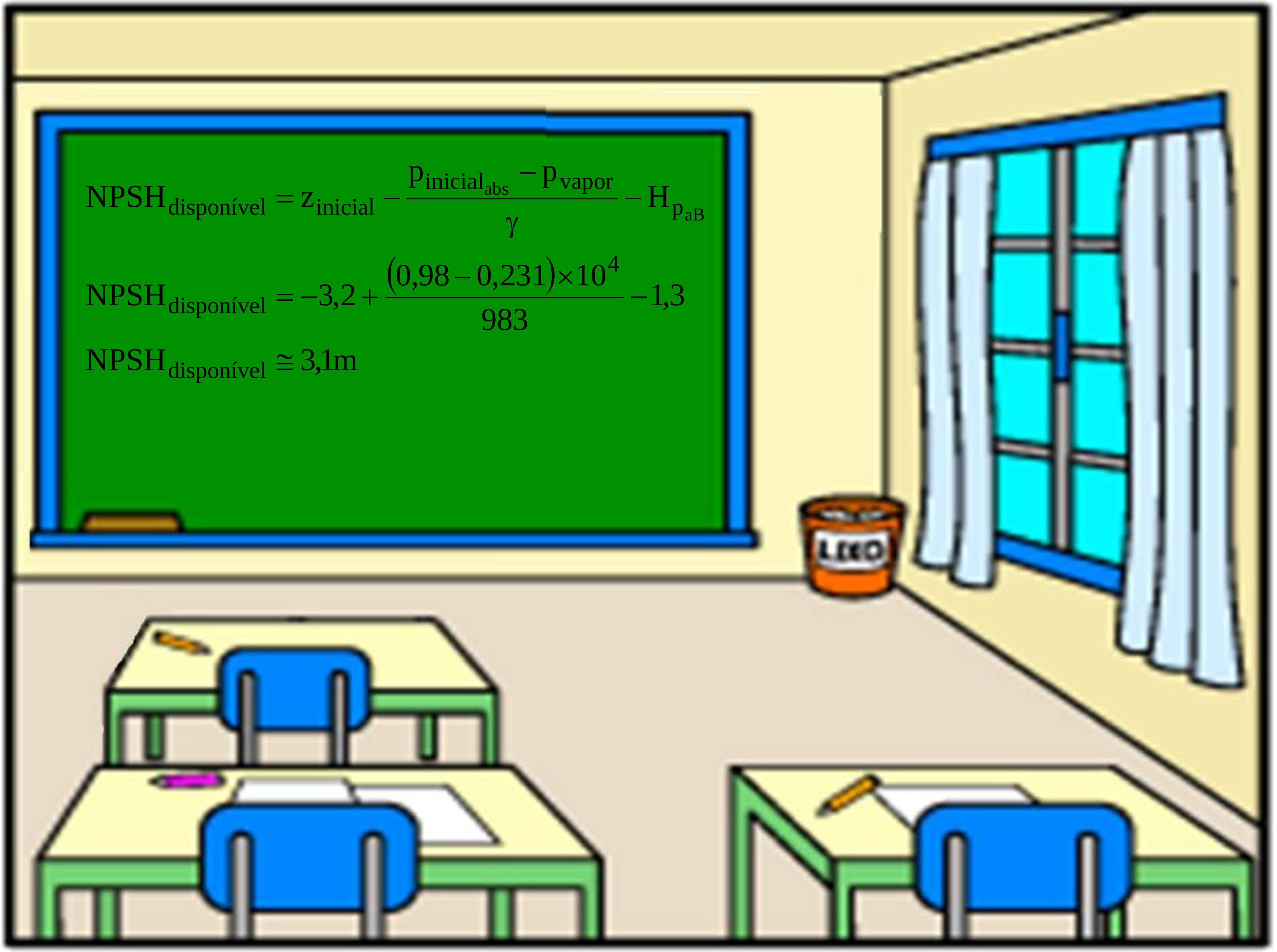

100
90
80
70
60
50
40
η
10
20
30
40
60
80
100
200
300
acima 630 l/s
630
189
63
31,5
12,6
6,3 l/s
$n_q = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$
radial
Francis
semi-axial
axial

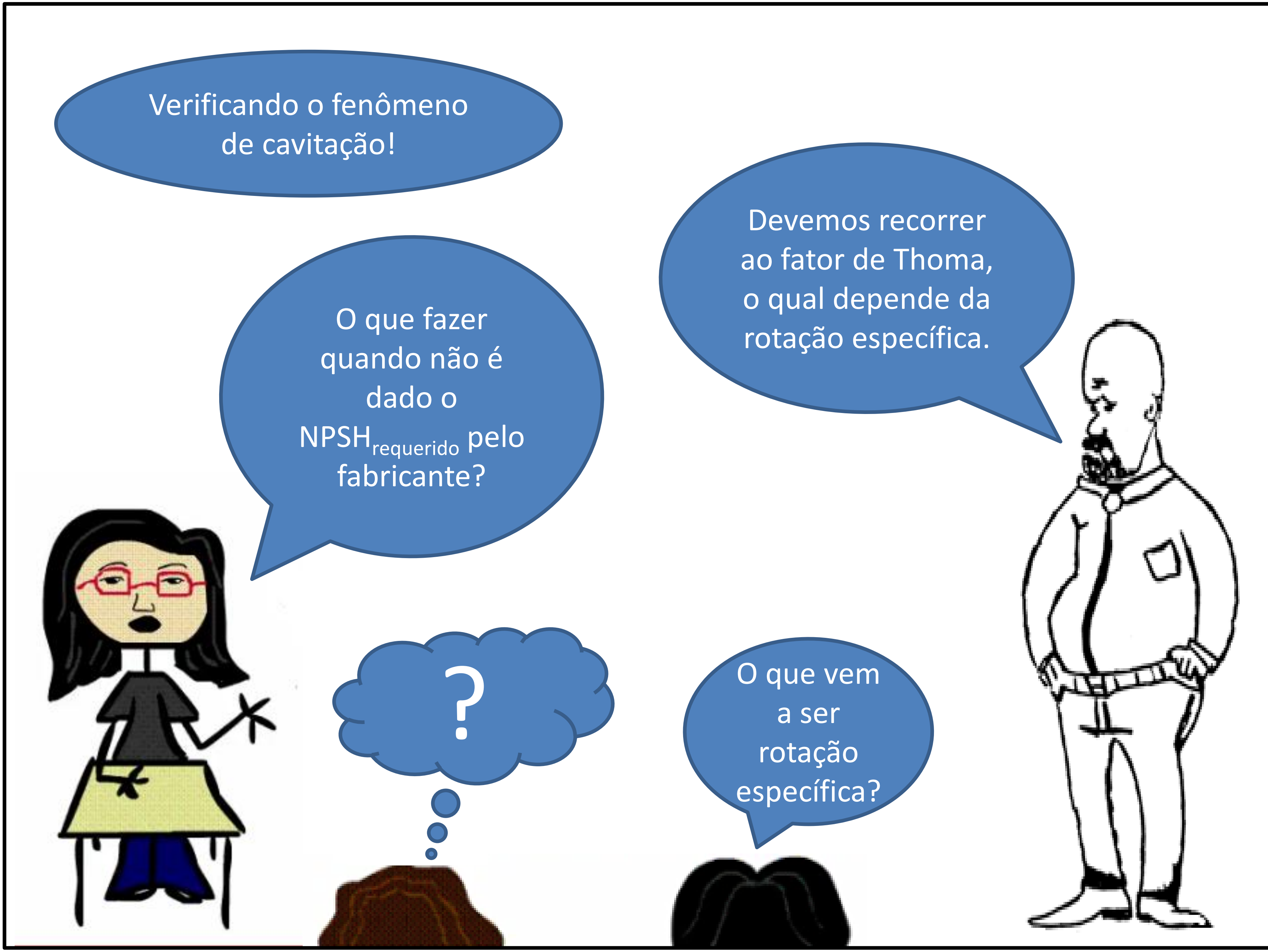

Como o engenheiro deve resolver problemas proponho o problema a seguir:
LIXO

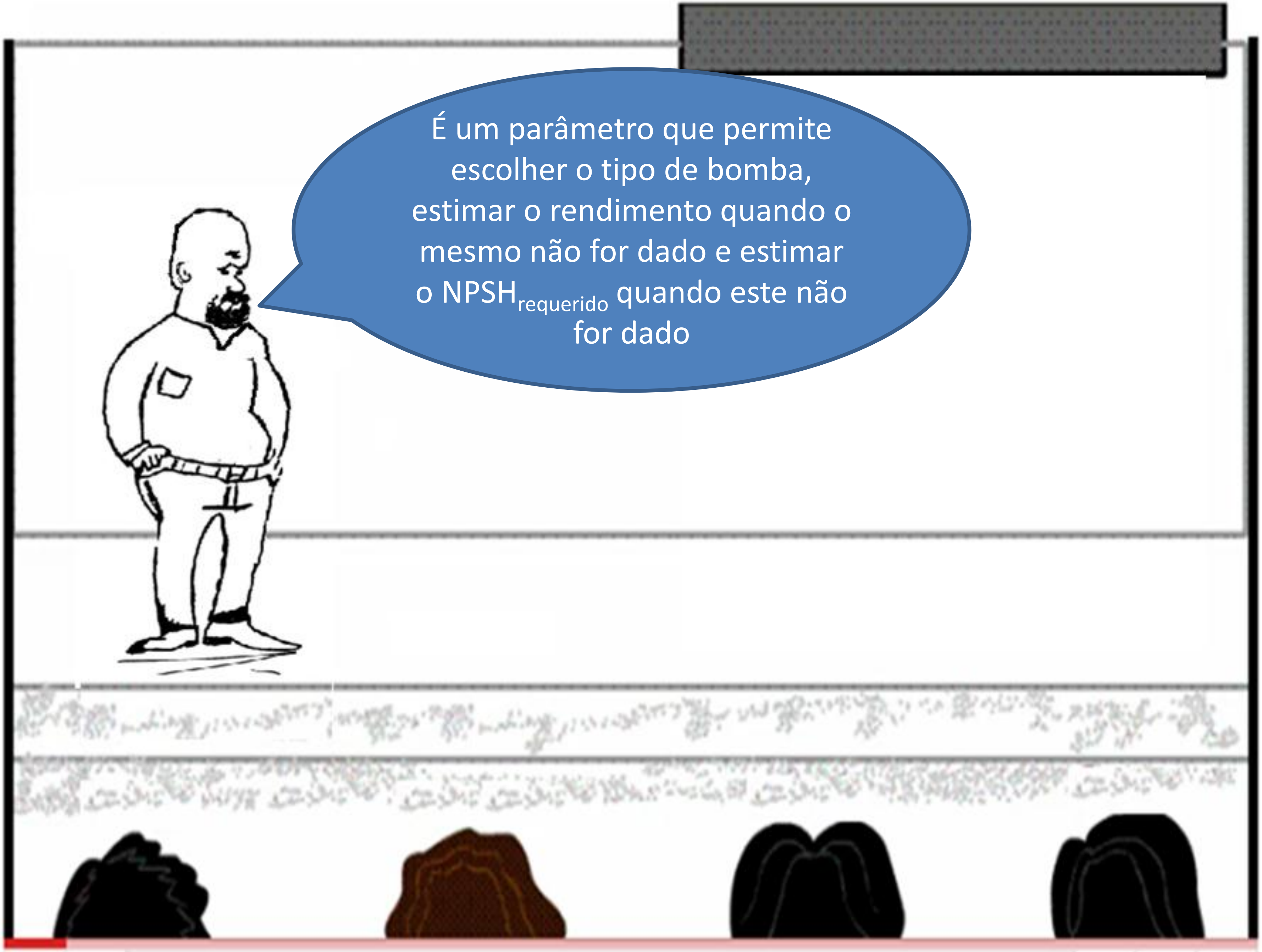

Verificar se ocorre o fenômeno de cavitação em uma bomba com rotor de entrada bilateral, com um estágio, que eleva 80 L/s de água a uma altura manométrica de 20 m.
Dados:
1. Ponto de trabalho: vazão 40 L/s e carga manométrica 20 m
2. Temperatura do fluido = 60^{0}C
3. Pressão de vapor que para 60^{0}C é igual a 0,231 kgf/cm^2 (abs)
4. Peso específico a 60^{0}C que é igual a 983 kgf/m^3
5. Pressão atmosférica local igual a 0,98 kgf/cm^2
6. Rotação da bomba = 1150 rpm
Conhecemos ainda a perda de carga na aspiração (antes da bomba) que é igual a 1,3 m
Conhecemos também a cota inicial com PHR no eixo da bomba que é igual a -3,2 m

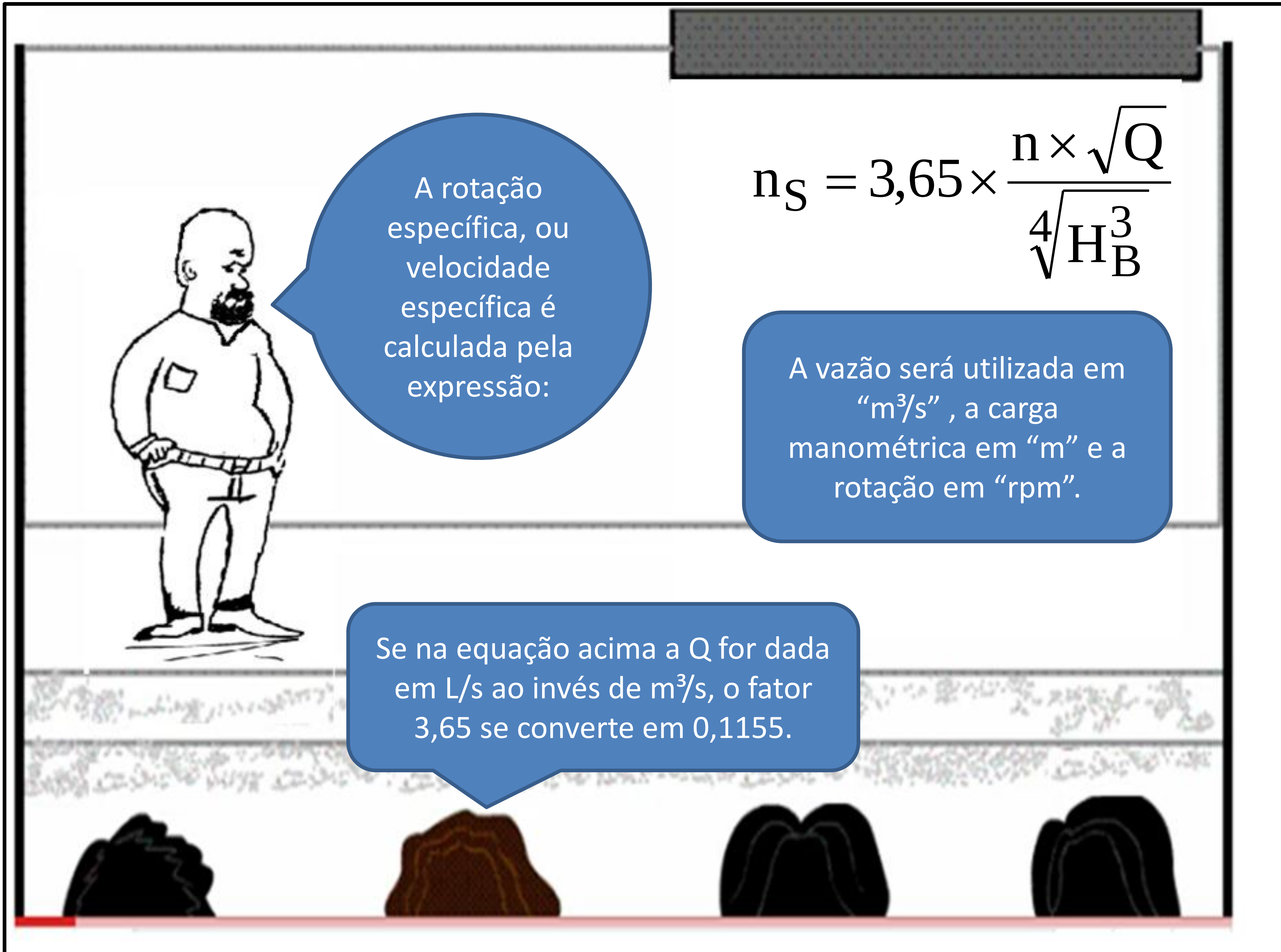


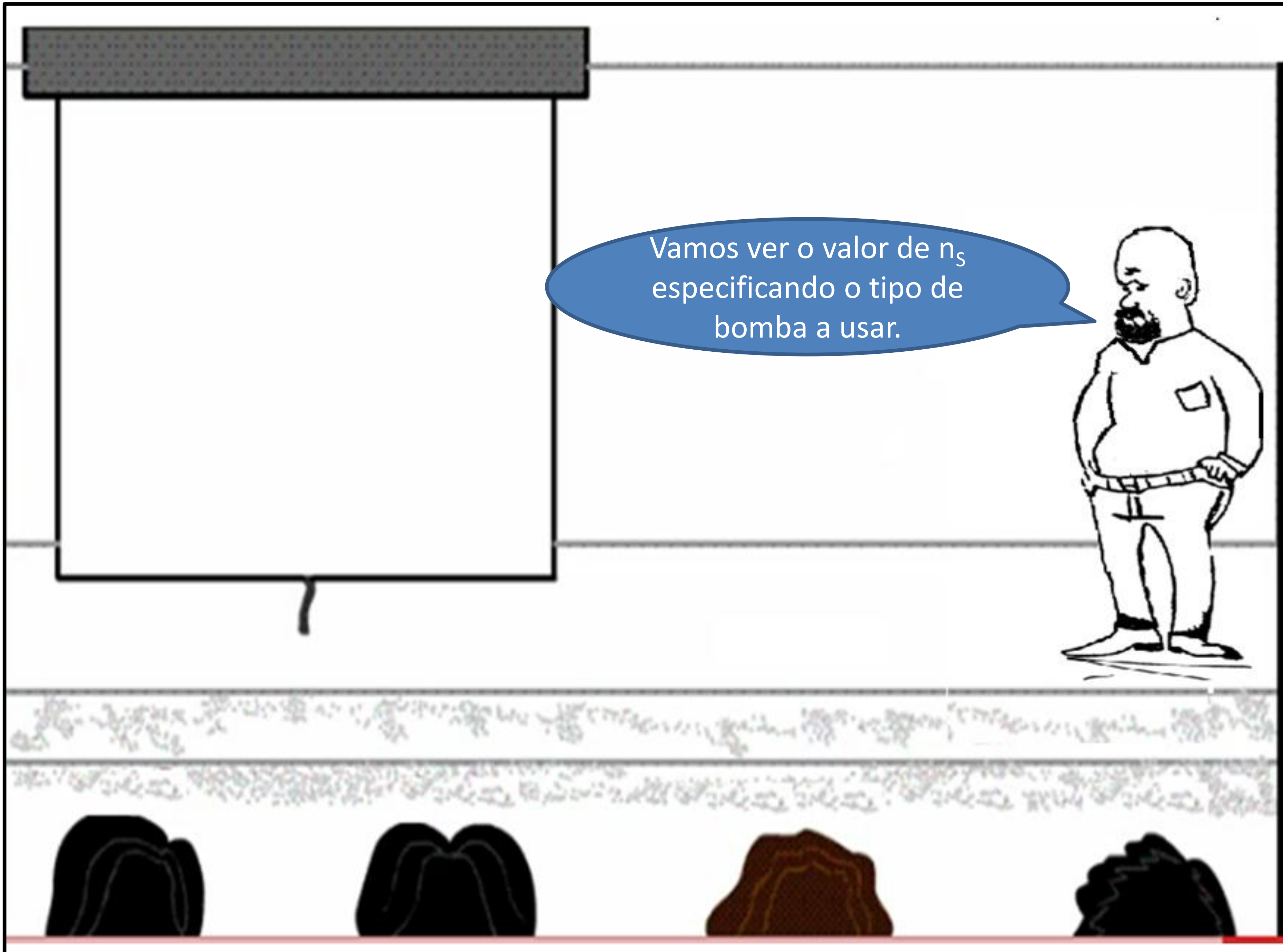
Podemos calcular o $NPSH_{disponível}$
LIXO

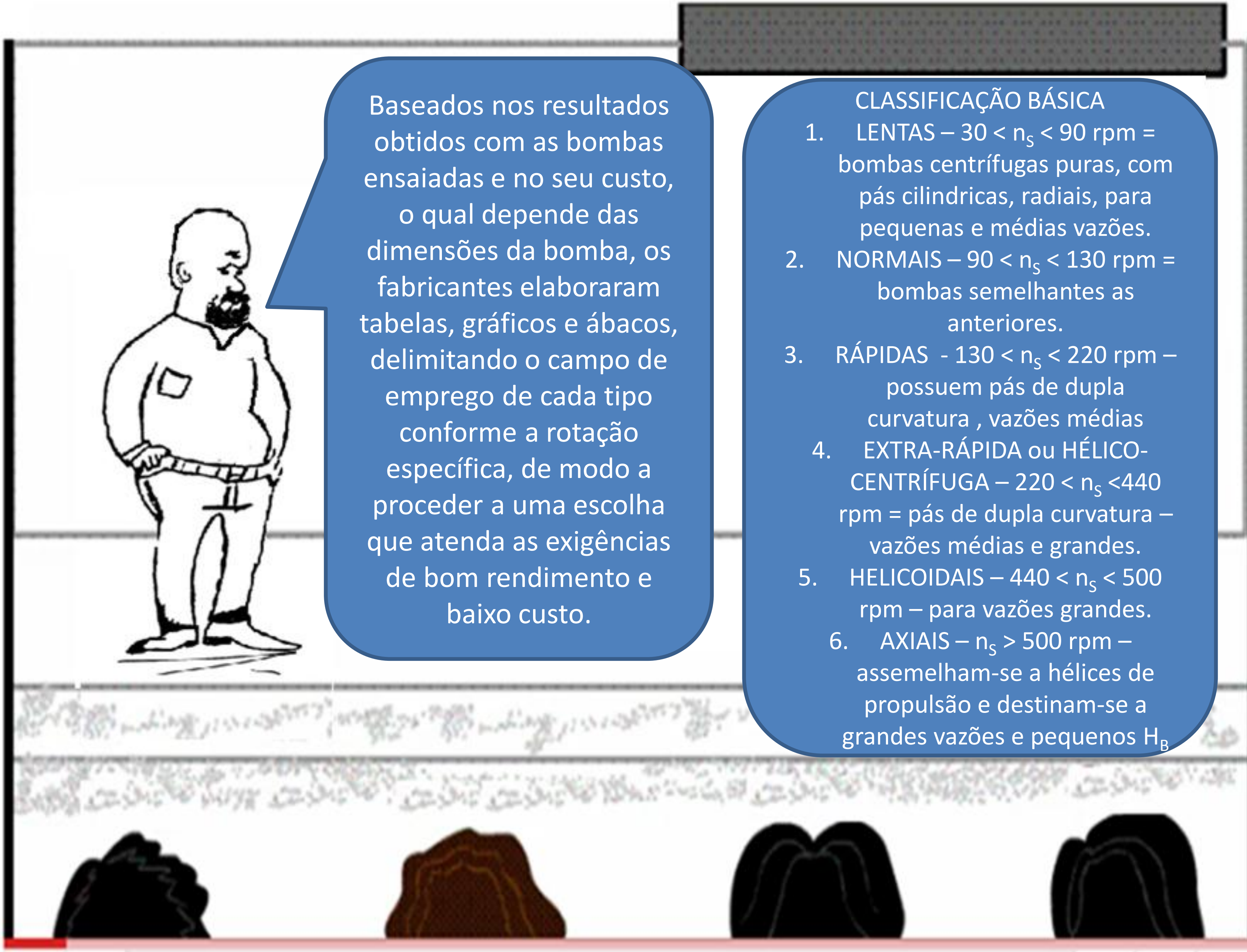

$NPSH_{disponível} = z_{inicial} - \frac{p_{inicial_{abs}} - p_{vapor}}{\gamma} - H_{p_{aB}}$
$NPSH_{disponível} = -3{,}2 + \frac{(0{,}98 - 0{,}231) \times 10^4}{983} - 1{,}3$
$NPSH_{disponível} \cong 3{,}1m$

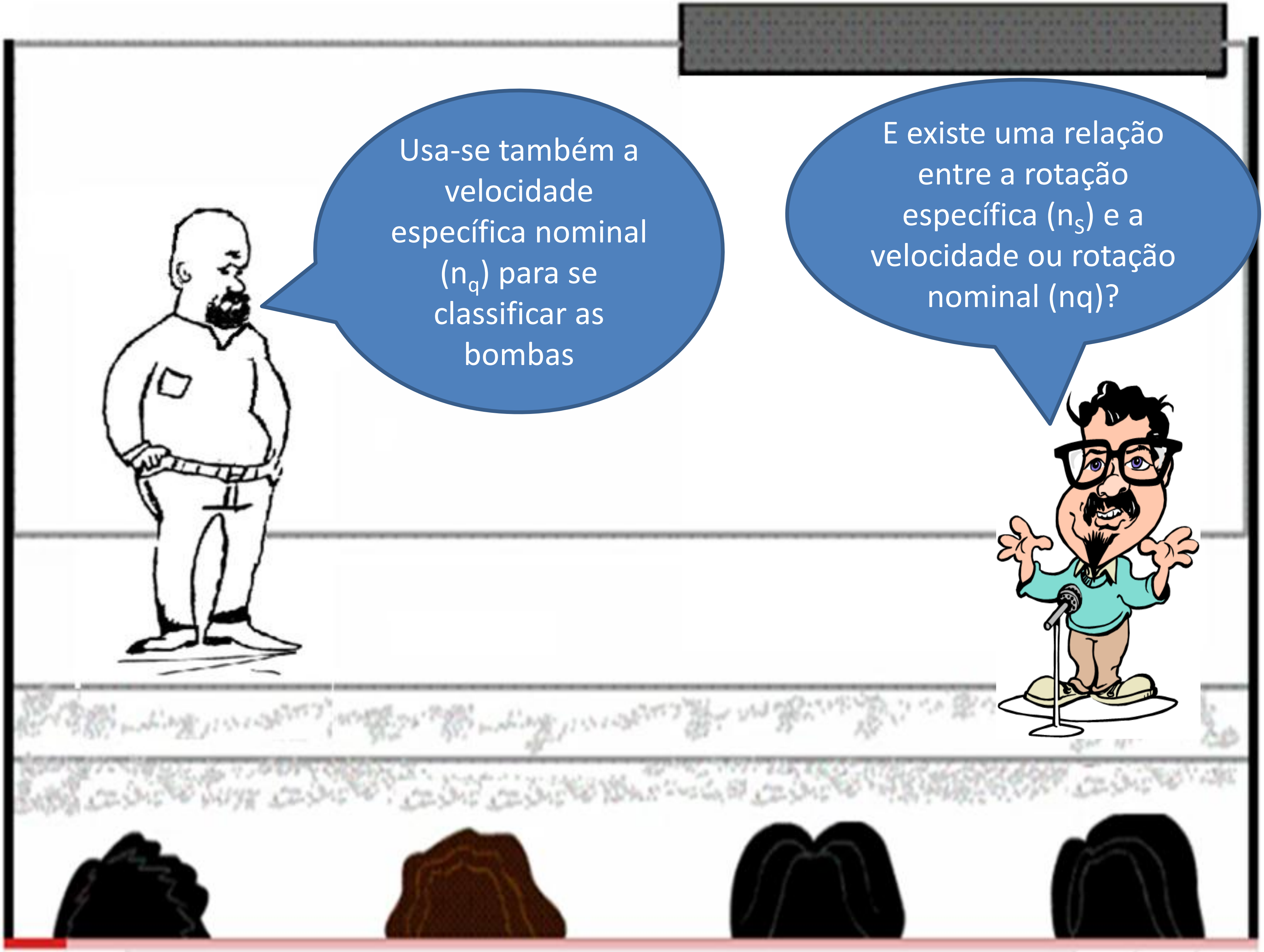

Verificando o fenômeno de cavitação!
O que fazer quando não é dado o $NPSH_{requerido}$ pelo fabricante?
Devemos recorrer ao fator de Thoma, o qual depende da rotação específica.
?
O que vem a ser rotação específica?


É um parâmetro que permite escolher o tipo de bomba, estimar o rendimento quando o mesmo não for dado e estimar o $NPSH_{requerido}$ quando este não for dado


A rotação específica, ou velocidade específica é calculada pela expressão:
$$n_S = 3{,}65 \times \frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}}$$
A vazão será utilizada em "m³/s" , a carga manométrica em "m" e a rotação em "rpm".
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.


Vamos ver o valor de n_S especificando o tipo de bomba a usar.


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 cilindricas, 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


Usa-se também a velocidade específica nominal (n_q) para se classificar as bombas
E existe uma relação entre a rotação específica (n_S) e a velocidade ou rotação nominal (nq)?

Sim:

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

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

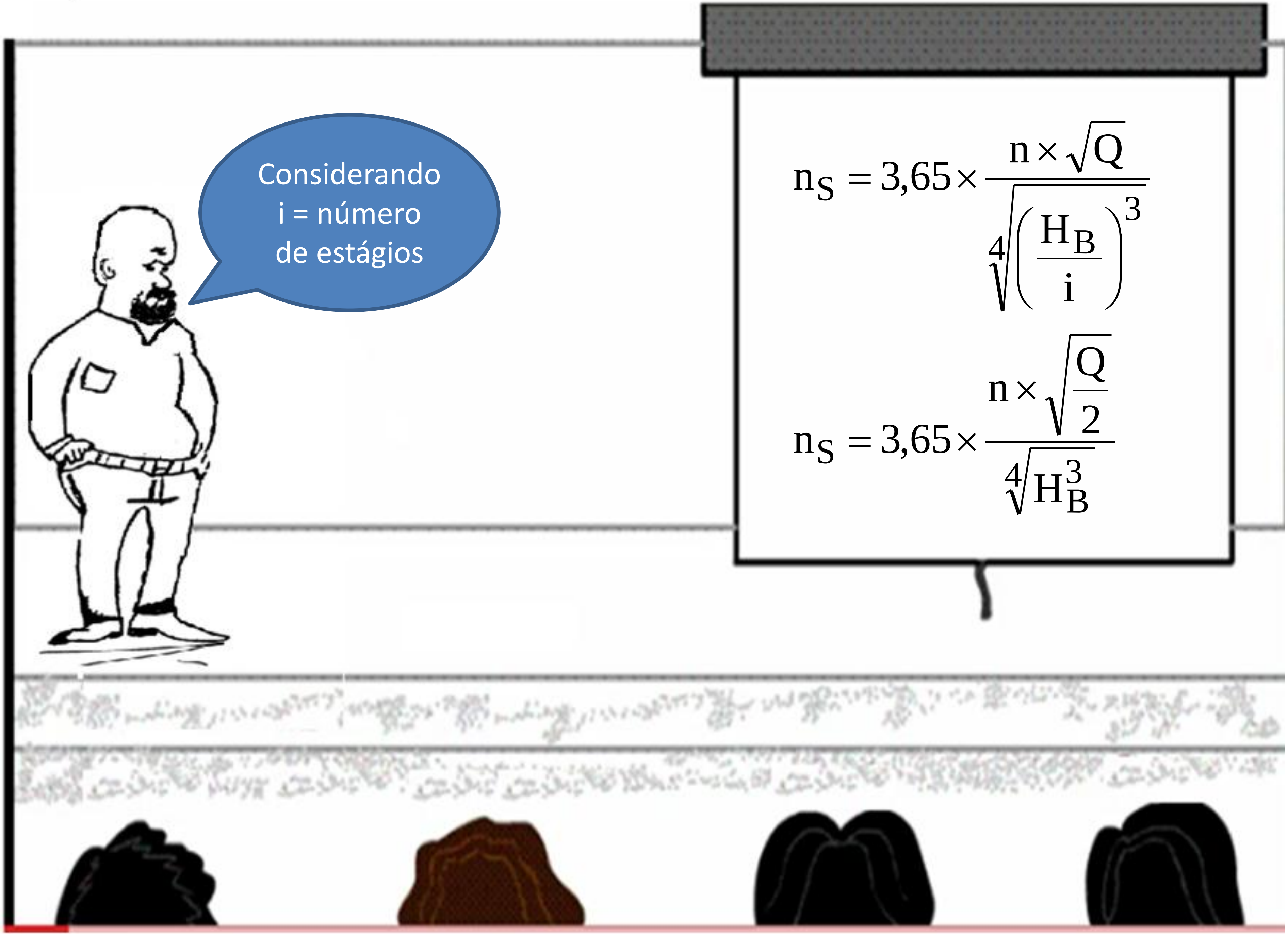
Os norte-americanos usam U.S galão por minuto como unidade de vazão e pés para a carga manométrica, de modo que teremos que converter as unidade:

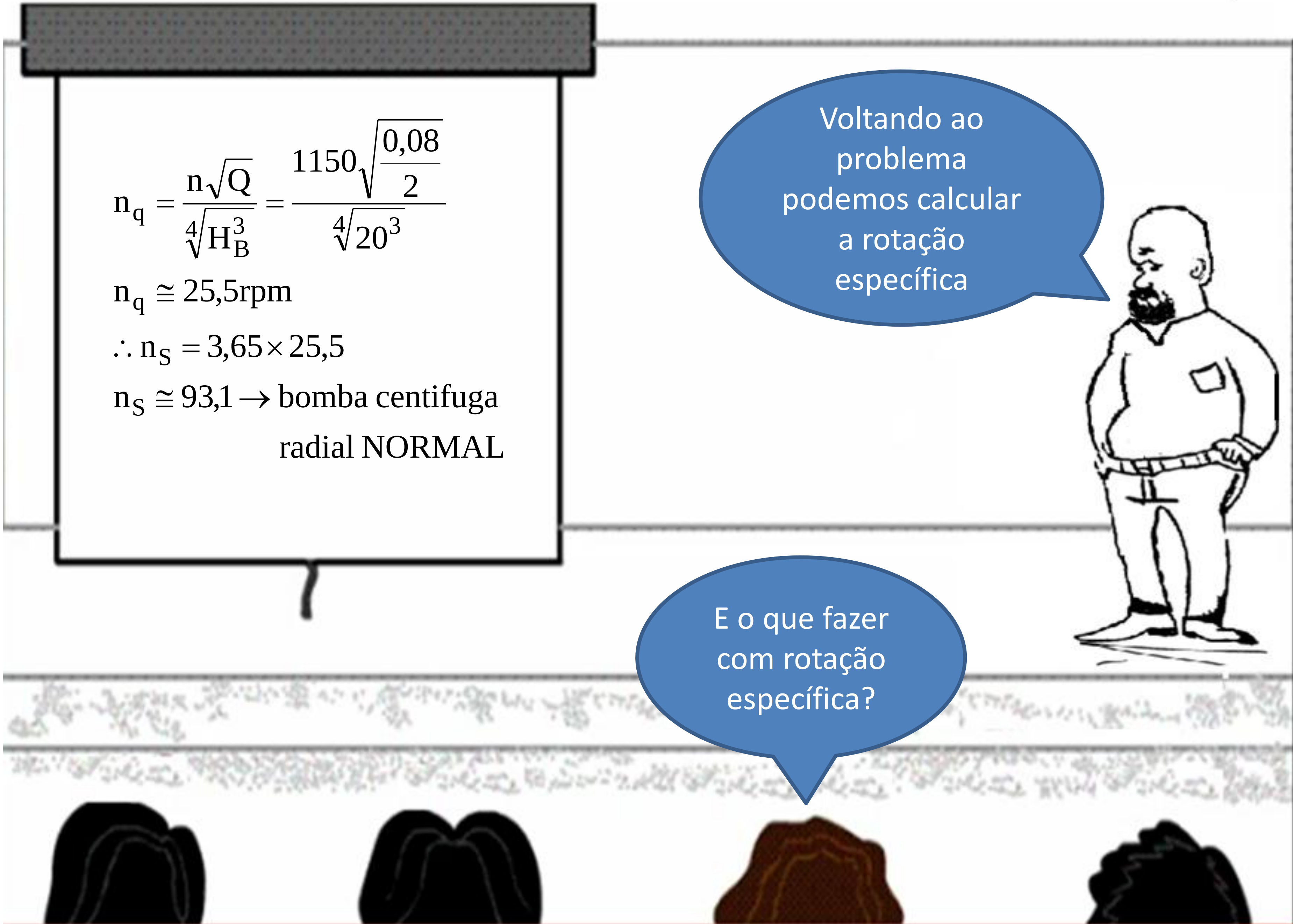
$$n_{S_{\text{métrico}}} = \frac{n_{S_{\text{USA}}}}{14{,}15}$$

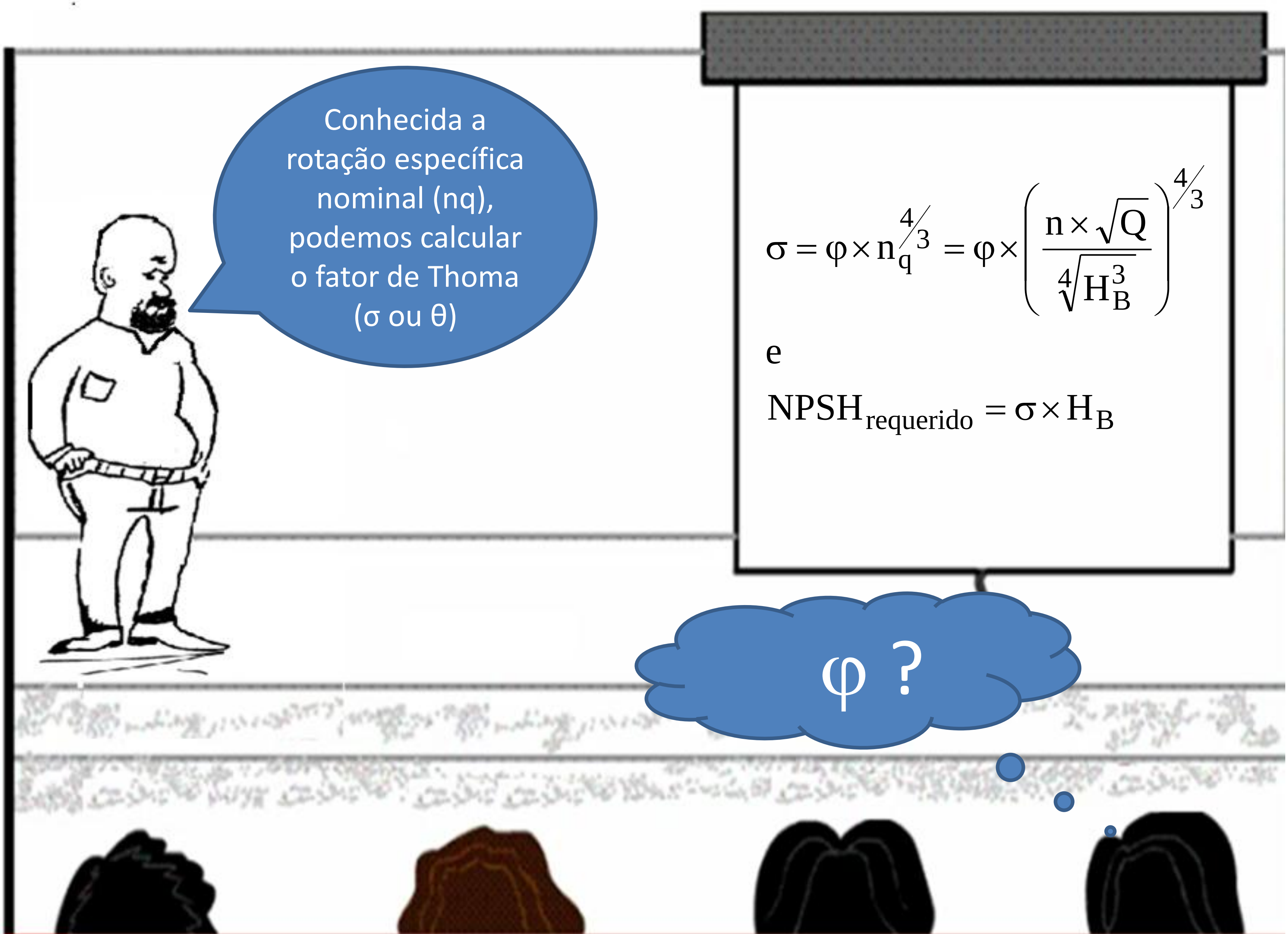
$$\therefore n_{S_{\text{USA}}} = 3{,}65 \times 14{,}15 \times n_{q_{\text{métrico}}}$$

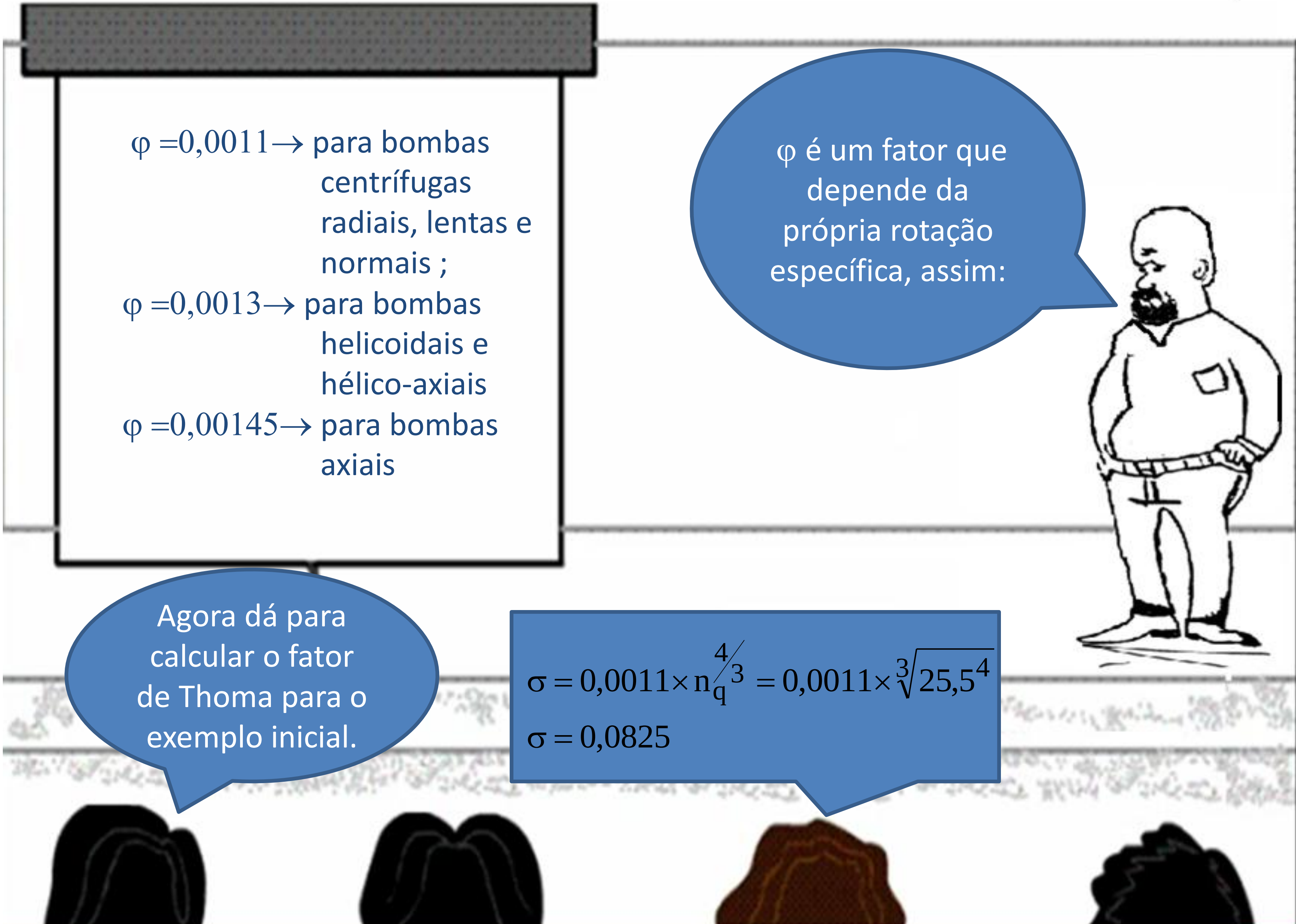
$$n_{S_{\text{USA}}} \cong 52 \times n_{q_{\text{métrico}}}$$

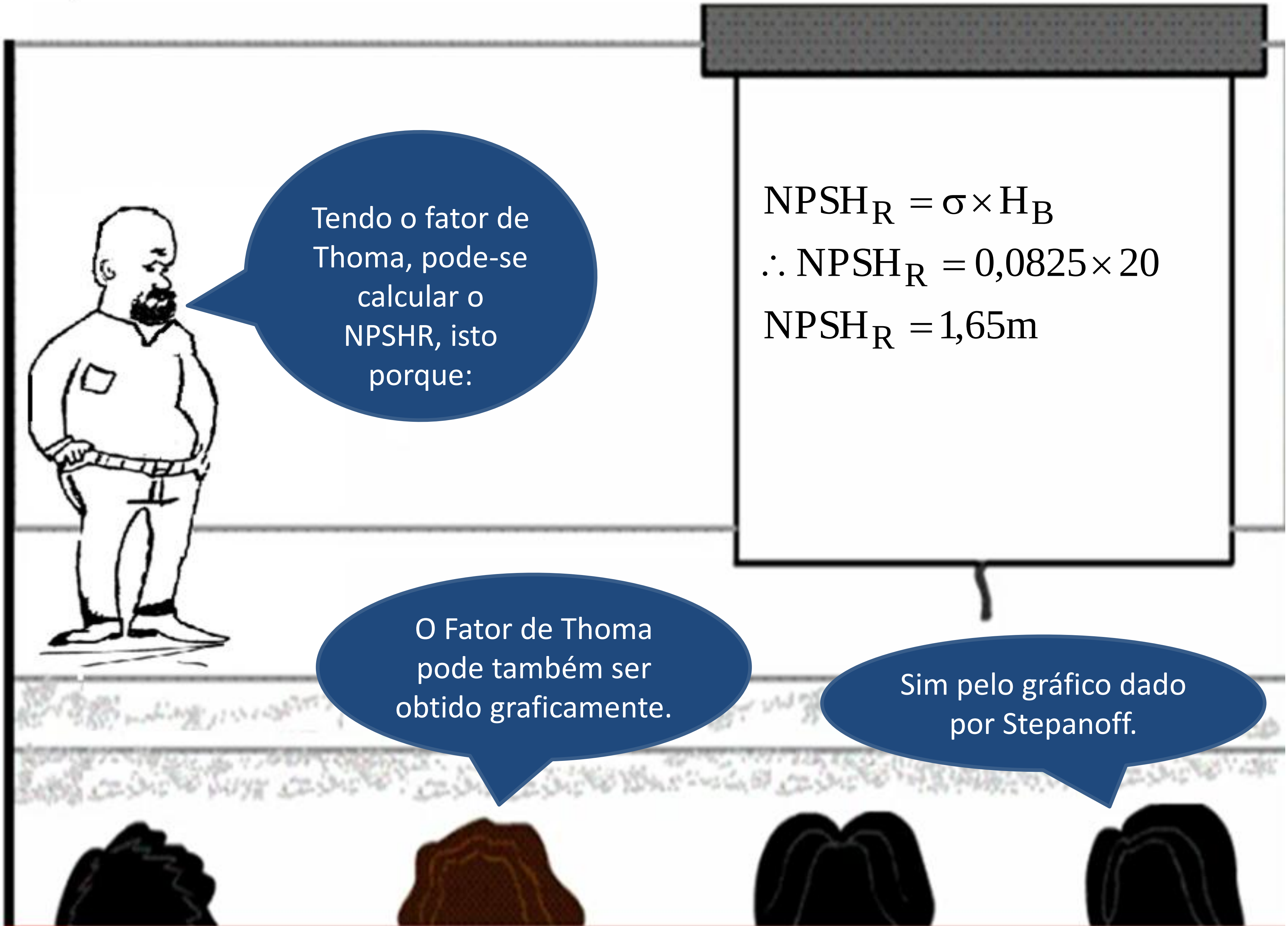
E para as bombas de múltiplos estágios e de entrada bilateral?

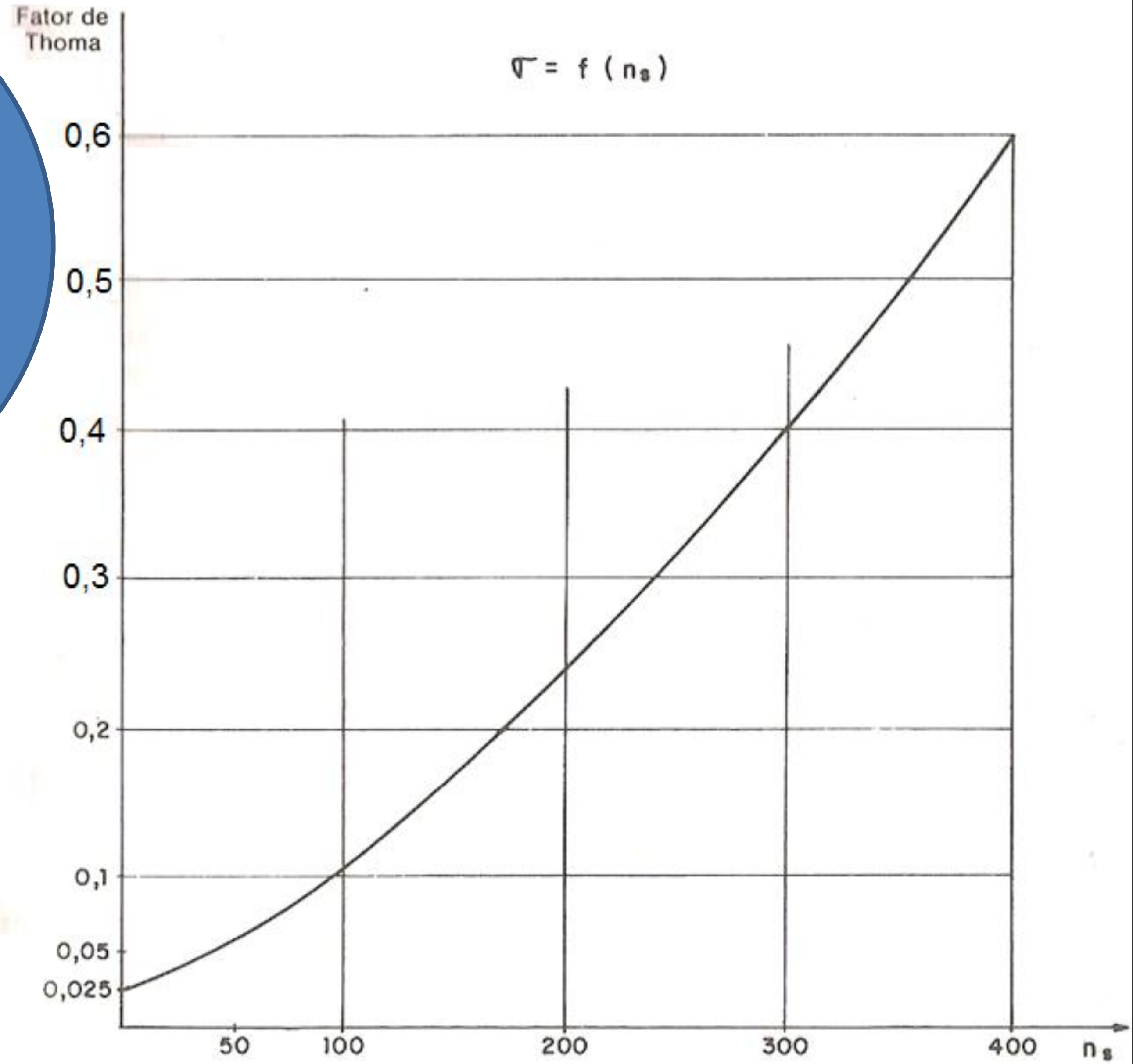

Considerando
i = número
de estágios
$$n_S = 3{,}65 \times \frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{\left(\frac{H_B}{i}\right)^3}}$$
$$n_S = 3{,}65 \times \frac{n \times \sqrt{\frac{Q}{2}}}{\sqrt[4]{H_B^3}}$$


$n_q = \frac{n\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}} = \frac{1150\sqrt{\frac{0,08}{2}}}{\sqrt[4]{20^3}}$
$n_q \cong 25,5 \text{rpm}$
$\therefore n_S = 3,65 \times 25,5$
$n_S \cong 93,1 \rightarrow$ bomba centifuga radial NORMAL
Voltando ao problema podemos calcular a rotação específica
E o que fazer com rotação específica?

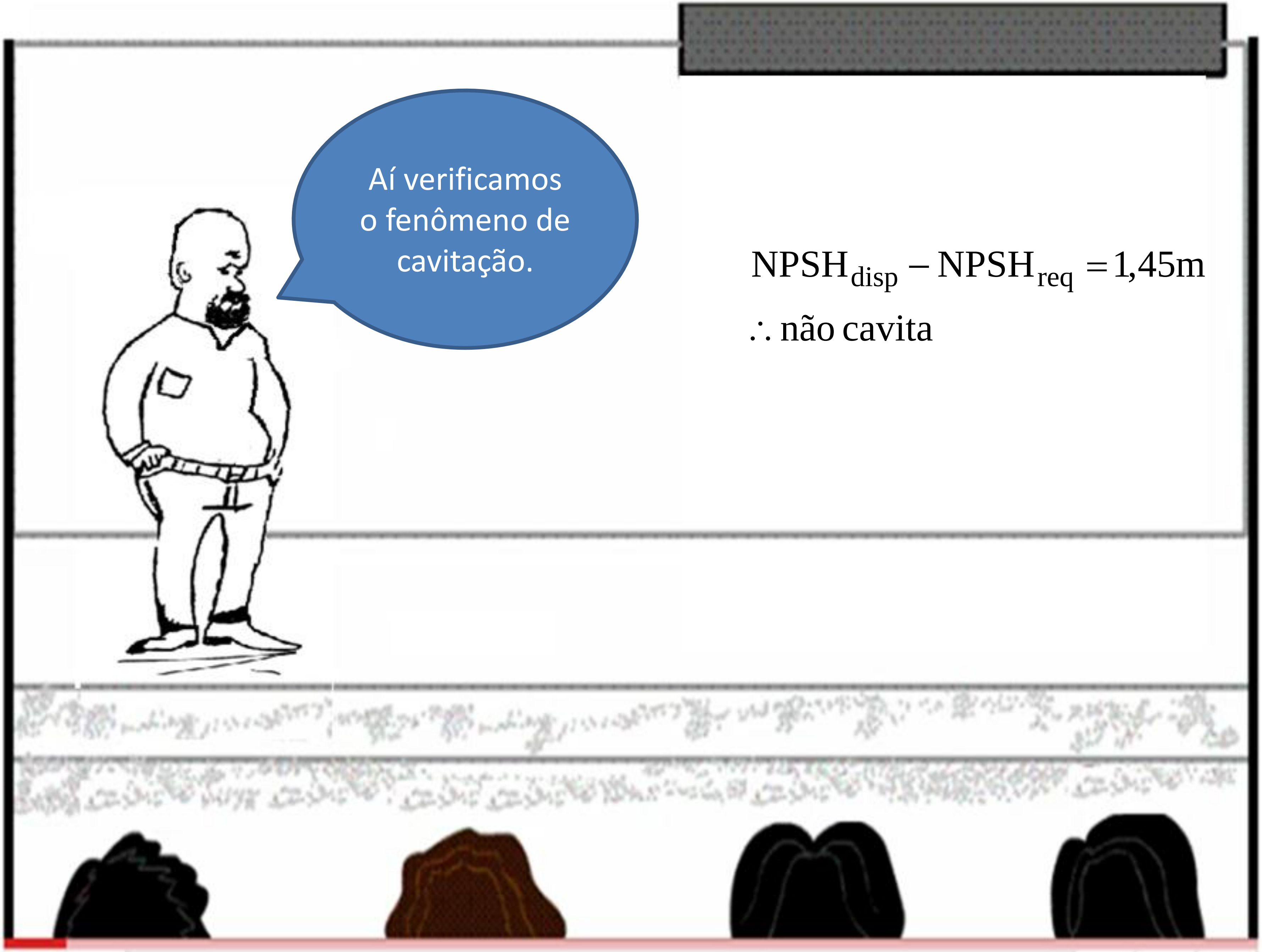

Conhecida a rotação específica nominal (nq), podemos calcular o fator de Thoma (σ ou θ)
$\sigma = \varphi \times n_q^{4/3} = \varphi \times \left(\frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}} \right)^{4/3}$
e
$NPSH_{requerido} = \sigma \times H_B$
φ ?


φ =0,0011→ para bombas centrífugas radiais, lentas e normais ;
φ =0,0013→ para bombas helicoidais e hélico-axiais
φ =0,00145→ para bombas axiais
φ é um fator que depende da própria rotação específica, assim:
Agora dá para calcular o fator de Thoma para o exemplo inicial.
$\sigma = 0{,}0011 \times n_q^{4/3} = 0{,}0011 \times \sqrt[3]{25{,}5^4}$
$\sigma = 0{,}0825$


Tendo o fator de Thoma, pode-se calcular o NPSHR, isto porque:
$NPSH_R = \sigma \times H_B$
$\therefore NPSH_R = 0{,}0825 \times 20$
$NPSH_R = 1{,}65m$
O Fator de Thoma pode também ser obtido graficamente.
Sim pelo gráfico dado por Stepanoff.



Fator de cavitação de Thoma em função da velocidade específica.


Aí verificamos o fenômeno de cavitação.
$NPSH_{disp} - NPSH_{req} = 1{,}45m$
$\therefore$ não cavita