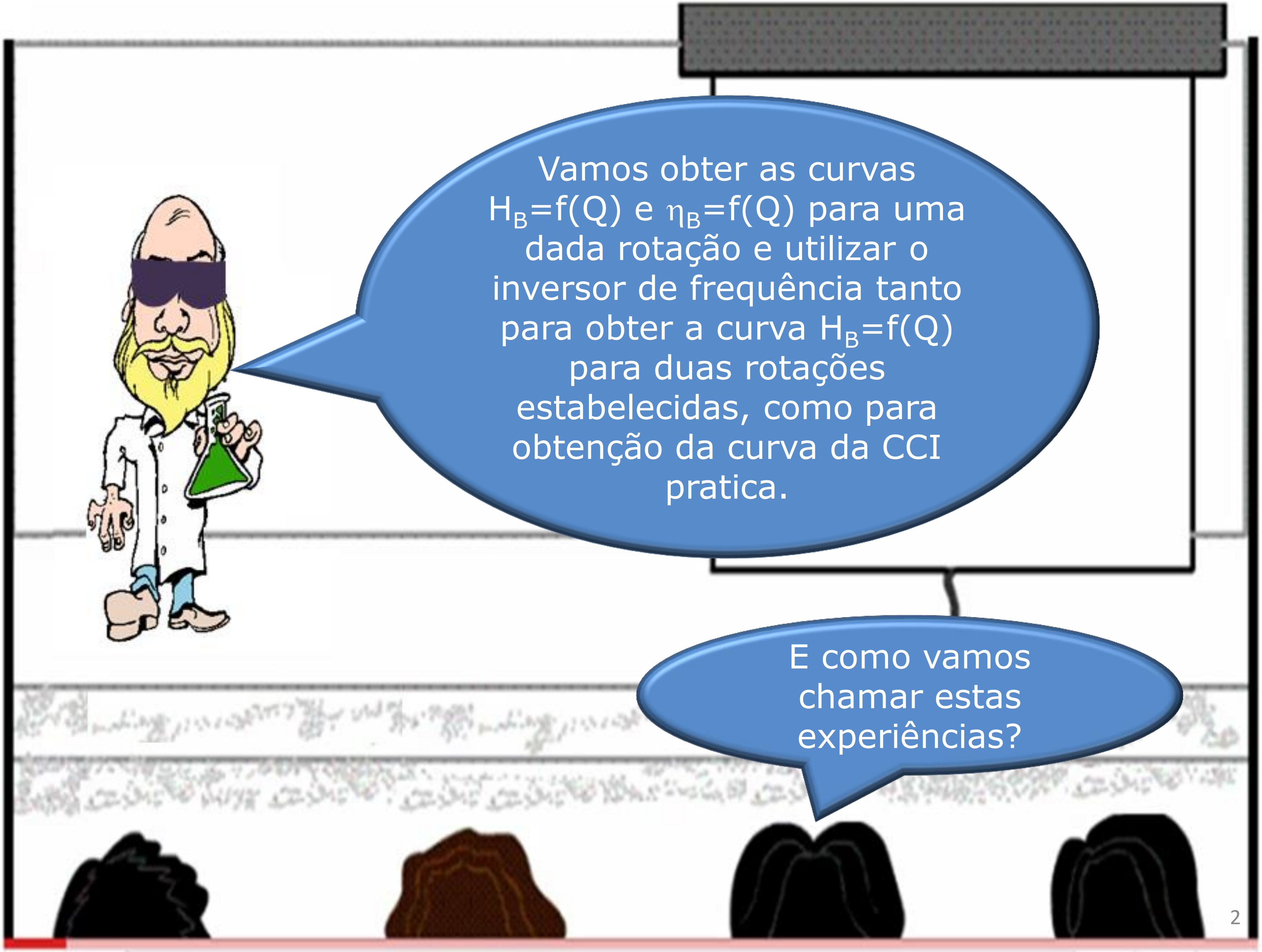
Oitava aula de laboratório de ME5330

Segundo semestre de 2014

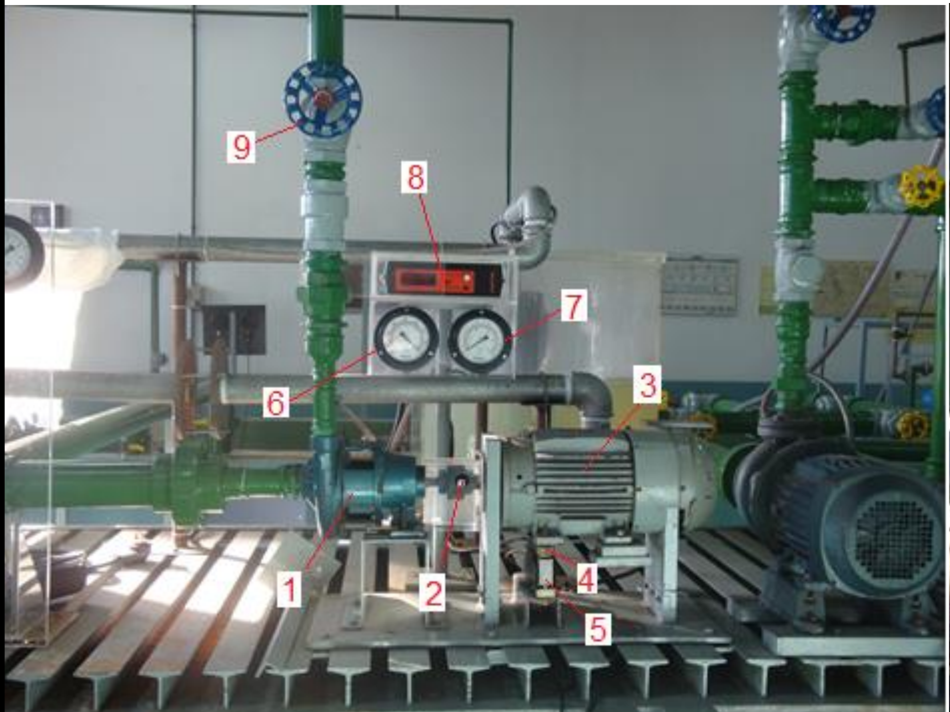

Vamos obter as curvas H_B=f(Q) e η_B=f(Q) para uma dada rotação e utilizar o inversor de frequência tanto para obter a curva H_B=f(Q) para duas rotações estabelecidas, como para obtenção da curva da CCI pratica.
E como vamos chamar estas experiências?


Experiência do freio dinamométrico e experiências do inversor de frequência.
Iniciamos com a do freio dinamométrico.

Experiência do freio dinamométrico

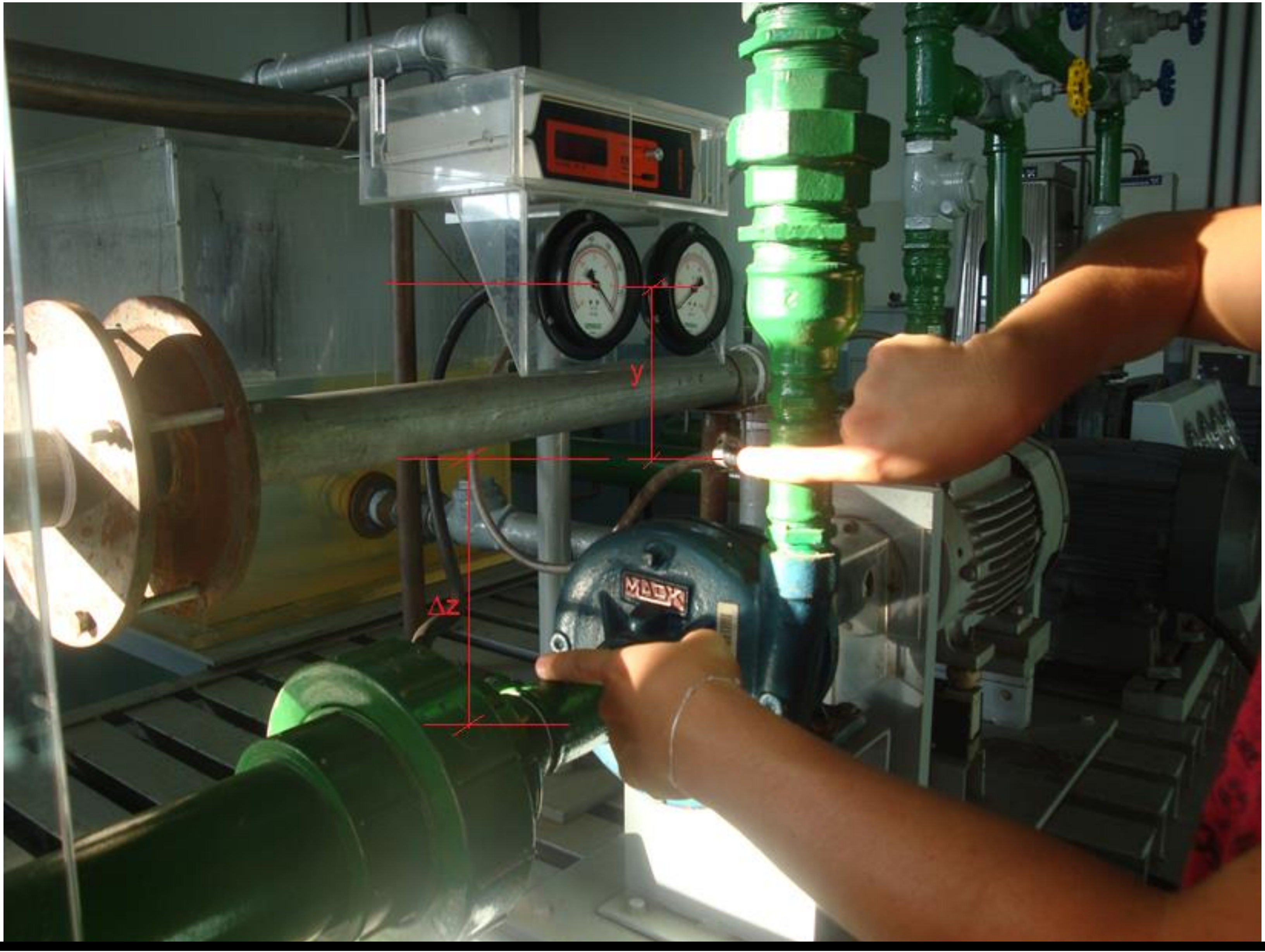
- **objetivos**
  - conhecer um freio dinamométrico
  - obter as curvas
    - HB = f(Q)
    - rendimento da bomba = f(Q)
- **aprender**
  - a calcular em uma dada rotação
    - vazão
    - carga manométrica
    - potência da bomba
    - rendimento da bomba
  - corrigir os cálculos acima para uma rotação n

Trecho da bancada utilizado nesta experiência

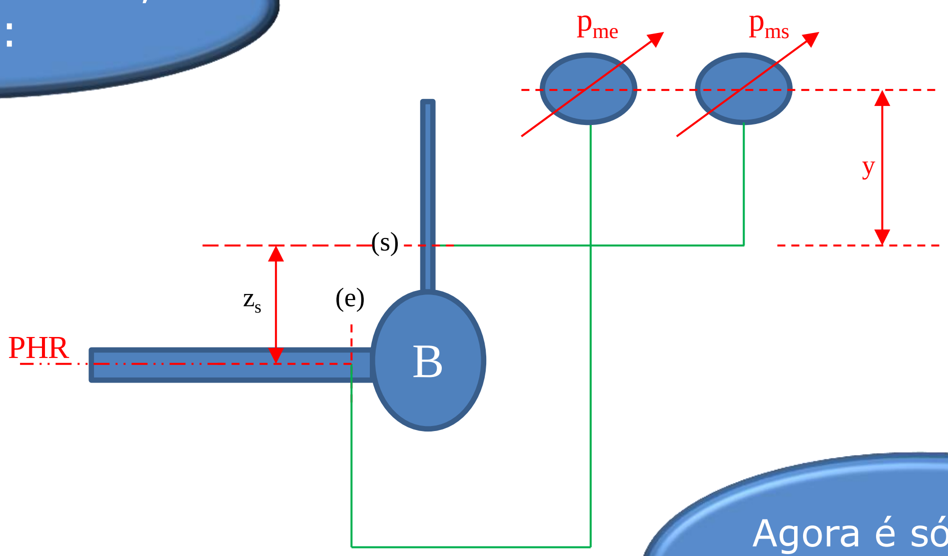


1 = bomba MARK de 4 CV	6 = manovacuômetro	10 = tubulação de sucção
2 = fita adesiva para det. n	7 = manômetro	11 = tubulação de recalque
3 = motor elétrico de 5 CV	8 = analisador Kratos	12 = tubulação de recalque
4 = esfera	9 = válv. globo para controlar a vazão (Q)	13 = tanque de distribuição
5 = célula de carga		14 = piezômetro p/ det. da Q

Visualizando a seção de entrada e saída da bomba e as cotas para corrigir as pressões manométricas para esta experiência.



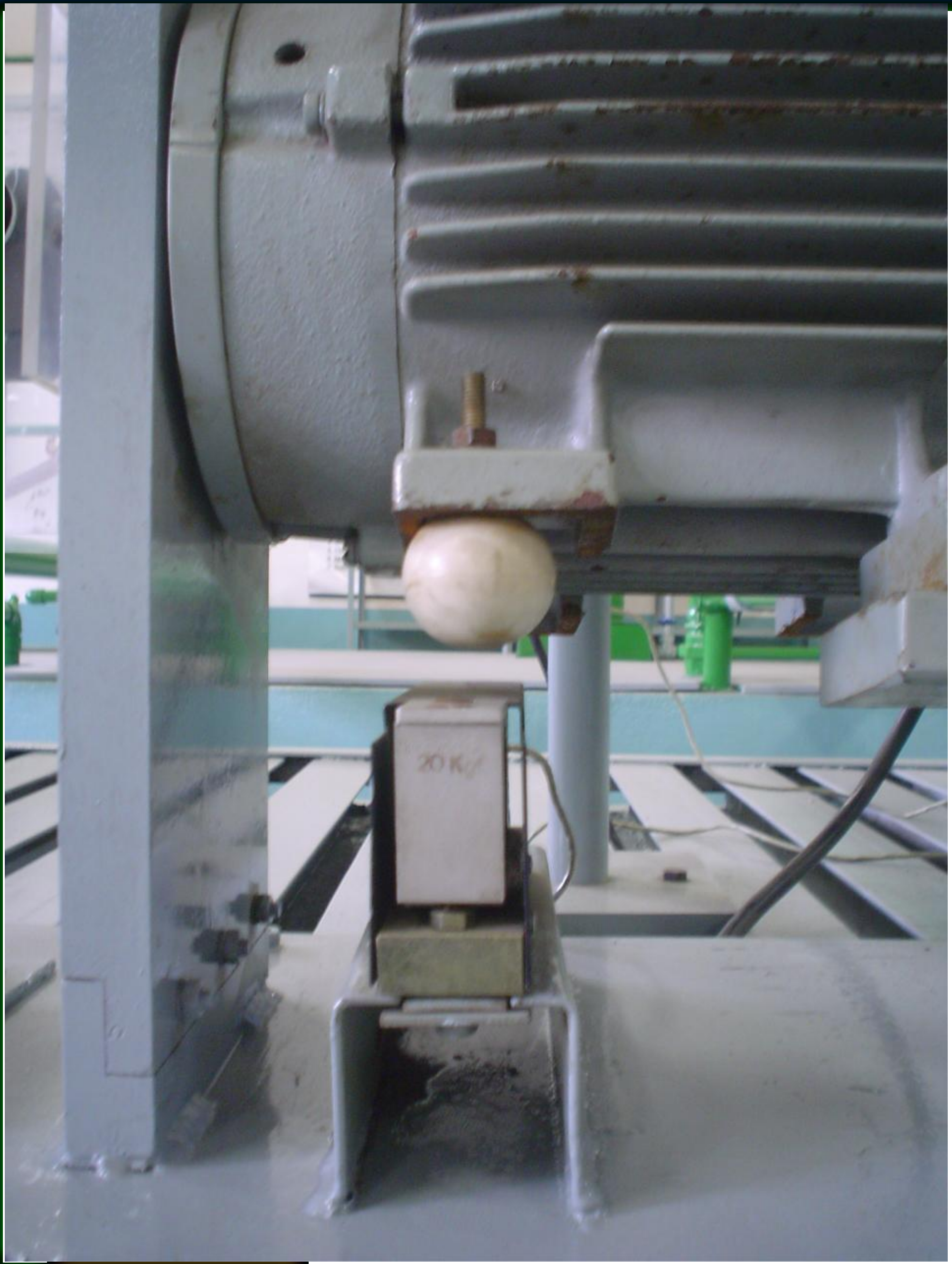
Esquematicamente, temos:



Agora é só aplicar a equação da energia.

$$H_e + H_B = H_s$$

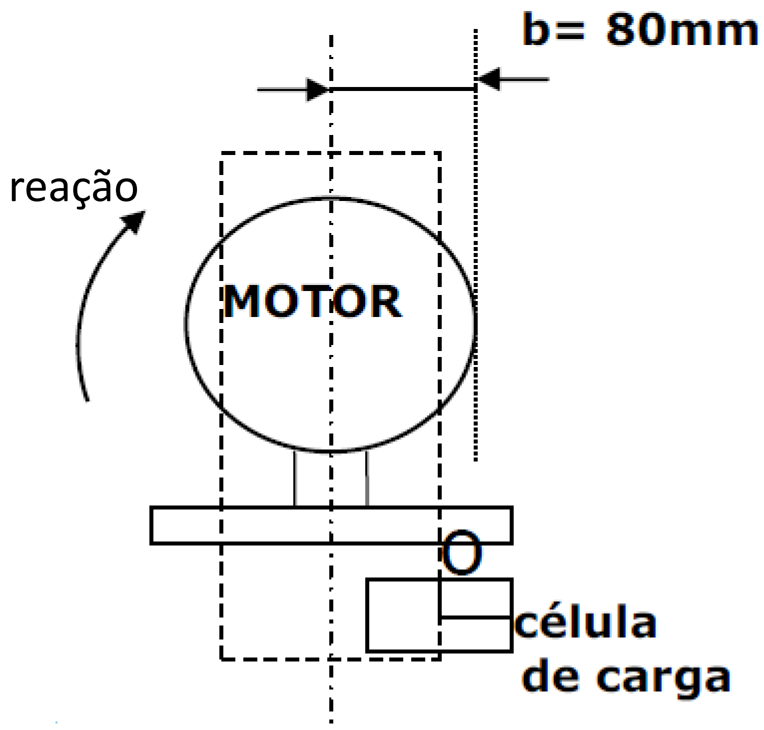
$$z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{\alpha_e \times v_e^2}{2g} + H_B = z_s + \frac{p_s}{\gamma} + \frac{\alpha_s \times v_s^2}{2g}$$



Ao acionar o conjunto motor bomba, olhando-o por trás, este girará no sentido horário, como a carcaça (estator) está solta, pelo princípio da ação e reação, ela tenderá a girar no sentido anti-horário e uma esfera presa em uma das “patas” do motor, pressionará uma célula de carga que irá registrar a força aplicada, já que a célula de carga está ligada a um analisador, no caso da Kratos.

A foto a seguir mostra o registro de uma força pelo analisador da Kratos, registro feito em “**kgf**”.

Através da força aplicada e registrada, além do torque, podemos calcular a potência da bomba (potência mecânica), já que:



Vista frontal do conjunto motor bomba

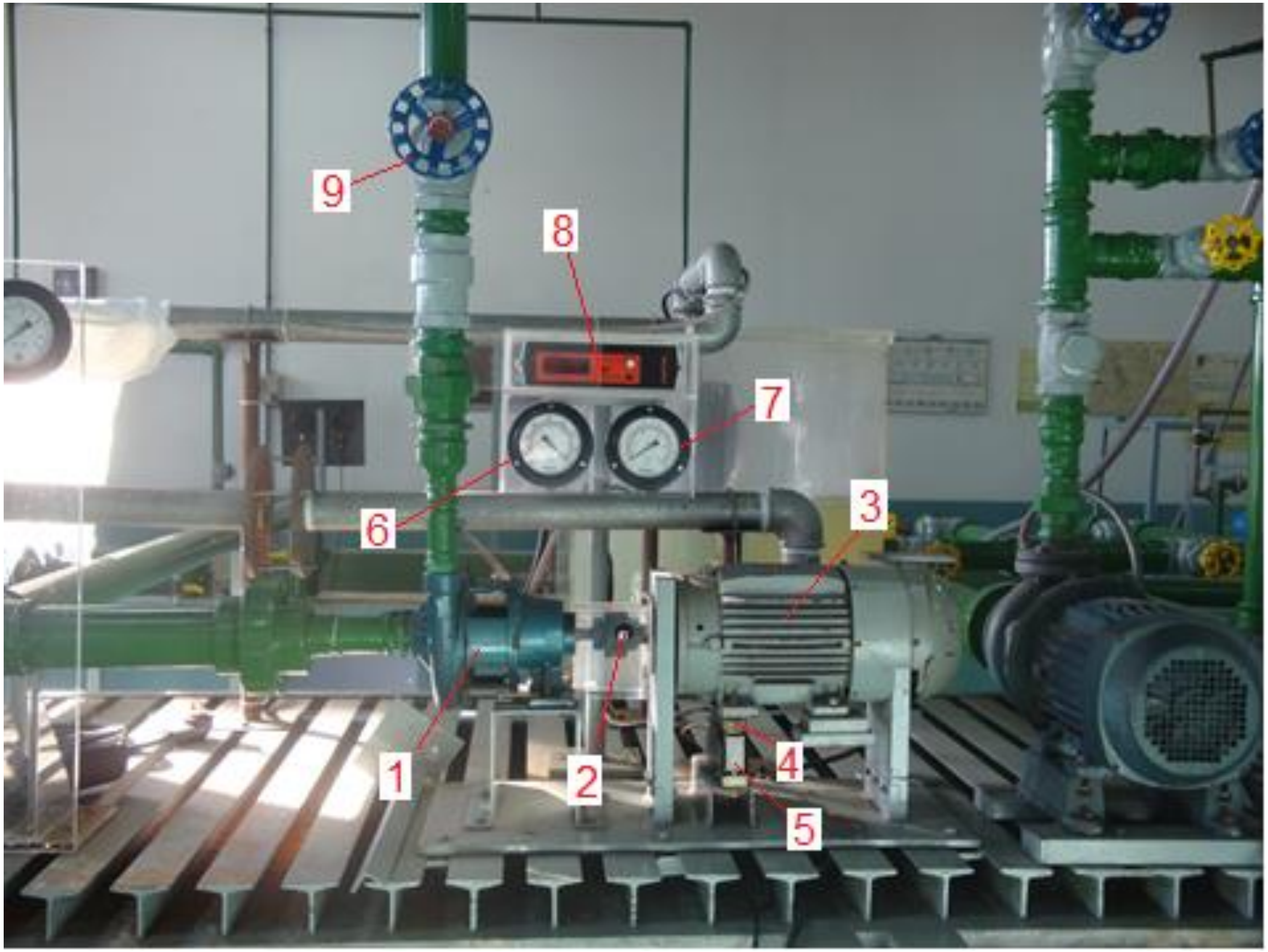
$$N_B = \text{Momento} \times \omega$$

$$N_B = F \times \text{braço} \times 2\pi \times n$$

$$[n] = \text{rps}$$

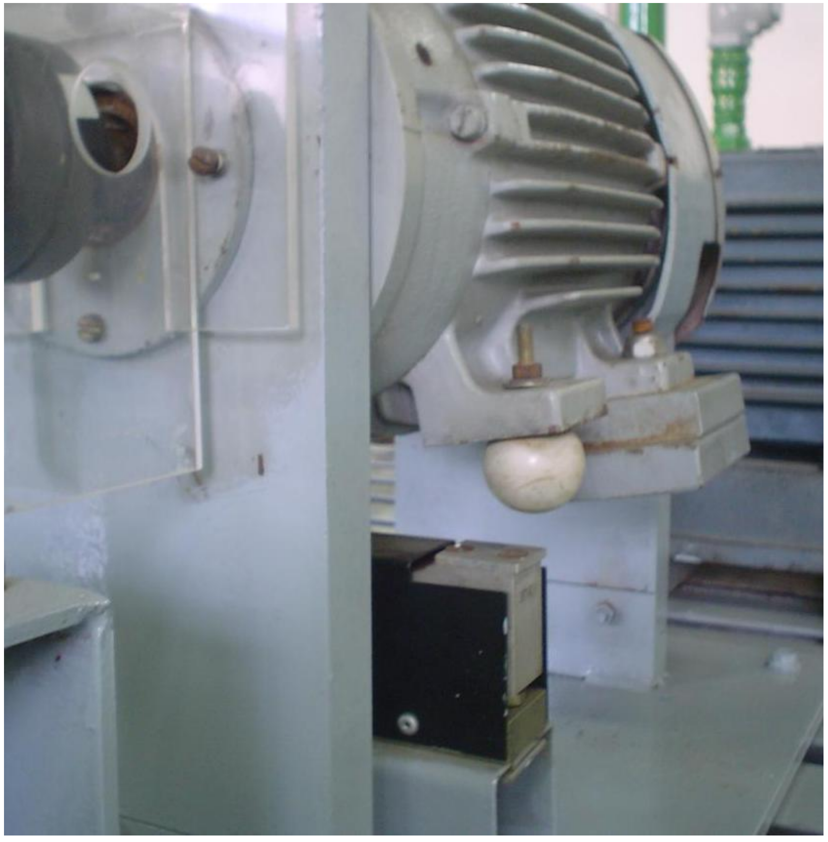
COMO ACHAR A ROTAÇÃO?

A rotação é obtida através de um tacômetro a laser, o qual é apontado para o adesivo branco = 2



Cuidado para não danificar o sistema

Se acionarmos o motor sem a esfera estar apoiada na célula de carga (analisador indicando zero), a mesma poderá ser danificada, por esse motivo, o acionamento do motor só deve ser feito após a esfera estar apoiada na célula de carga.



Não acionar o motor nessa situação

Acionar o motor só nessa situação

Desenvolvimento da experiência

Com a válvula controladora de vazão totalmente fechada se obtém as coordenadas do ponto de shut- off, para tal, deve-se anotar as pressões manométricas respectivamente na entrada e saída da bomba e a rotação do conjunto motor bomba. Observe que:

$$p_e = p_{me} + \gamma \times (y + z_s)$$

$$p_s = p_{ms} + \gamma \times y \therefore p_s - p_e = p_{ms} - p_{me} - \gamma \times z_s$$

$$\frac{p_s - p_e}{\gamma} = \frac{p_{ms} - p_{me}}{\gamma} - z_s$$

Aplica-se a equação da energia entre as seções de entrada e saída da bomba com o PHR no eixo da bomba:

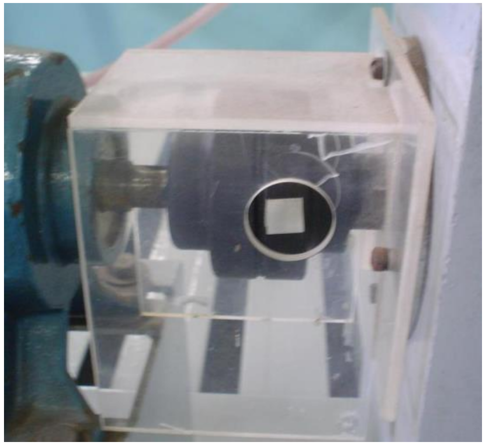
$$H_e + H_B = H_s$$

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

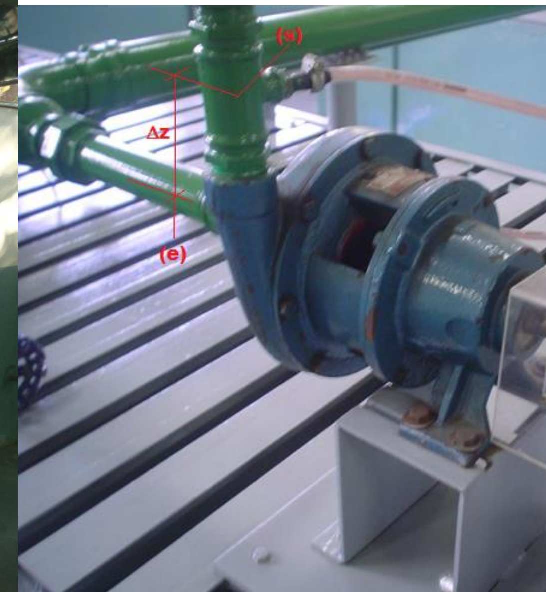
$$Q = 0 \rightarrow \text{shut} - \text{off} \rightarrow v_s = v_e = 0$$

$$\therefore H_B = z_s + \frac{(p_{ms} - p_{me})}{\gamma} - z_s = \frac{(p_{ms} - p_{me})}{\gamma}$$

Não esquecer de registrar a rotação.



Após as leituras de p_{ms}, p_{me} e da n para Q=0, deve-se abrir totalmente a válvula controladora da vazão (último ensaio) e para essa situação efetuar a leitura do Δh (mm), t(s), p_{me}, p_{ms} e n.



A seção de entrada e a de saída, pertencem a tubos de aço 40 com diâmetros nominais de 1,5” e 1” respectivamente.

$$H_B = \frac{(p_{ms} - p_{me})}{\gamma} + \frac{(\alpha_s v_s^2 - \alpha_e v_e^2)}{2g}$$

$$Q = \frac{\text{Volume}}{\text{tempo}} = \frac{\Delta h \times A_{\tan\text{que}}}{t} \rightarrow A_{\tan\text{que}} = 0{,}681\,m^2$$

$$(e) \rightarrow D_{int} = 40{,}8mm \Rightarrow A = 13{,}1cm^2 \rightarrow (s) \rightarrow D_{int} = 26{,}6mm \Rightarrow A = 5{,}57cm^2$$

Adotando: $\alpha_s = \alpha_e = 1{,}0$

temos: $$H_B = \frac{(p_{ms} - p_{me})}{\gamma} + \frac{\left(v_s^2 - v_e^2\right)}{2g}$$

com: $$v_s = \frac{Q}{A_s} \rightarrow v_e = \frac{Q}{A_e}$$

Determina-se a potência e o rendimento da bomba para uma rotação n, que é lida no tacômetro a laser:

$$N_B = \text{Momento} \times \omega = F \times \text{braço} \times 2\pi \times n$$

$$[n] = \text{rps}$$

$$\text{braço} = 0{,}08\text{m}$$

$$\eta_B = \frac{N}{N_B} = \frac{\gamma \times Q \times H_B}{F \times \text{braço} \times 2\pi \times n}$$

Fechando-se planejadamente a válvula controladora de vazão, obtemos as demais leituras que originarão a tabela de dados:

Ensaio	Δh (mm)	t(s)	p_{me} (mmHg)	p_{ms} (kgf/cm²)	F (kgf)	n (rpm)
1			-80	5,1	3,64	3571
2	100	27,13	-135	4,5	7,09	3539
3	100	18,35	-205	3,8	8,42	3525
4	100	14,41	-245	3,1	9,24	3515
5	100	13,75	-295	2,4	9,69	3510
6	100	12,57	-340	1,7	10,17	3505
7	100	11,53	-350	1	11,18	3513

Temperatura d'água: 20 ^{0}C

Exemplo de tabela de dados

Não se pode esquecer de se corrigir a vazão (Q), a carga manométrica (H_B), e o rendimento da bomba (η_B) para uma rotação estabelecida, por exemplo 3500 rpm.

Correções

$$Q_{3500} = \left(\frac{3500}{n_{lida}}\right) \times Q_{exp\,erimental}$$

$$H_{B_{3500}} = \left(\frac{3500}{n_{lida}}\right)^2 \times H_{B_{exp\,erimental}}$$

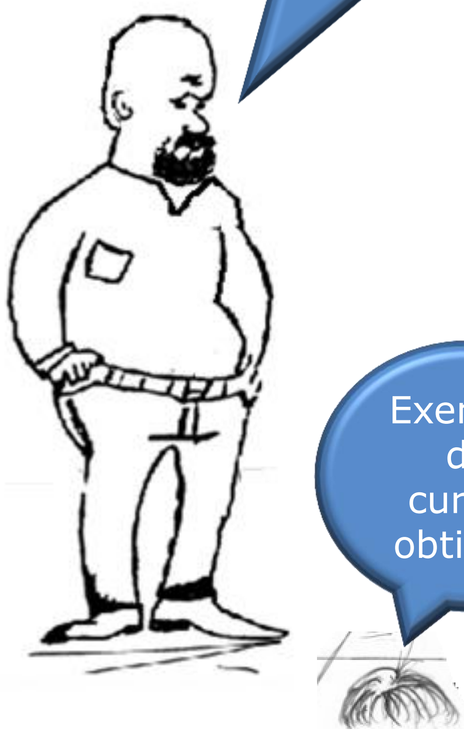
$$\eta_{B_{3500}} = \eta_{B_{exp\,erimental}}$$

Considerando que a rotação altera o rendimento, podemos recorrer a equação a seguir para calculá-lo:

$$\eta_{B_{3500}} = 1 - (1 - \eta_{B_{experimental}})\left(\frac{n_{lido}}{3500}\right)^{0,1}$$

Equação obtida no livro: Bombas e Instalações de Bombeamento - Archibald Joseph Macintyre - Livros Téc. e Cient. Editora 2008- segunda edição revisada - ISBN 978-85-216-1086-1 – página 126

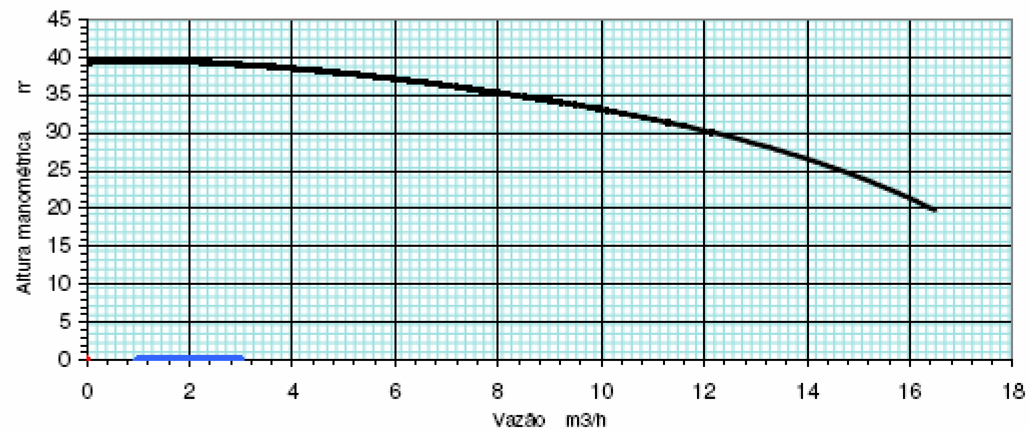
Importante observar que todos os pontos da curva de HB em função da vazão estão na mesma rotação.

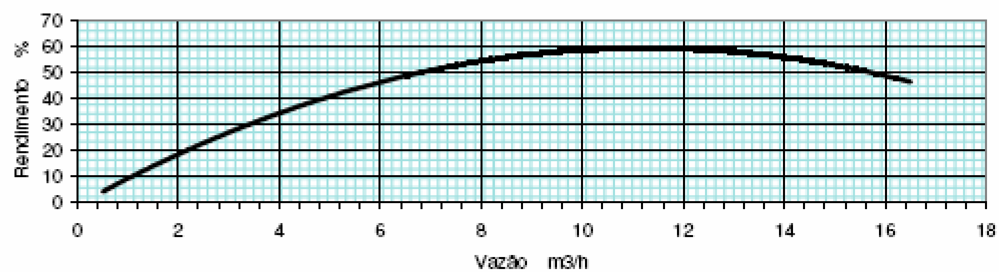


Exemplo de curvas obtidas!

GRUNDFOS MARK	MARK GRUNDFOS LTDA.						
	Bomba Centrífuga Monoestágio						MODELO DF
Rotor	146	mm	Número de estágios	1	Sucção	Recalque	RPM
Ponto de trabalho					1.1/2"	1"	3.500
Q		Hm			Vedação	Roscas	Válido para água limpa a 20 C.
CV		%			Selo mecânico	BSP	

Testes e Aceitação conforme Norma ISO 9906:1999 Anexo A





Experiência do inversor de frequência

- **objetivos**
  - conhecer um inversor de frequência
  - obter as curvas
    - HB = f(Q)
      - para 60 Hz
      - para 50 Hz
    - $H_S = f(Q)$ ⇒ CCI prática
- **aprender**
  - a calcular em uma dada rotação
    - vazão
    - carga manométrica
  - variar a vazão pelo inversor de frequência


Bancada do
inversor de
frequência e
que foi projeto
de alunos!

Esta experiência será feita numa bancada que ficou pronta em Julho de 1999 e foi projetada e montada por um grupo de alunos que cursou a disciplina no primeiro semestre de 1998. Agradecemos aos ex-alunos: ***Alexandre Martins Sousa*** *(Mecânica – Automobilística)*, ***Fernando Augusto Callado*** *(Mecânica – Produção)* e ***Marcelo Dietrich Martini*** *(Mecânica - Produção)*, formados em Julho/2000, que deixaram esta contribuição para o curso, de grande valor didático. Agradecemos também a **Newtronic** que doou o variador de freqüência e a **Mark** que fez a doação da bomba utilizada. A fábrica da **Mark** foi adquirida pela **Grundfos**, atual **Grundfos-Mark**.

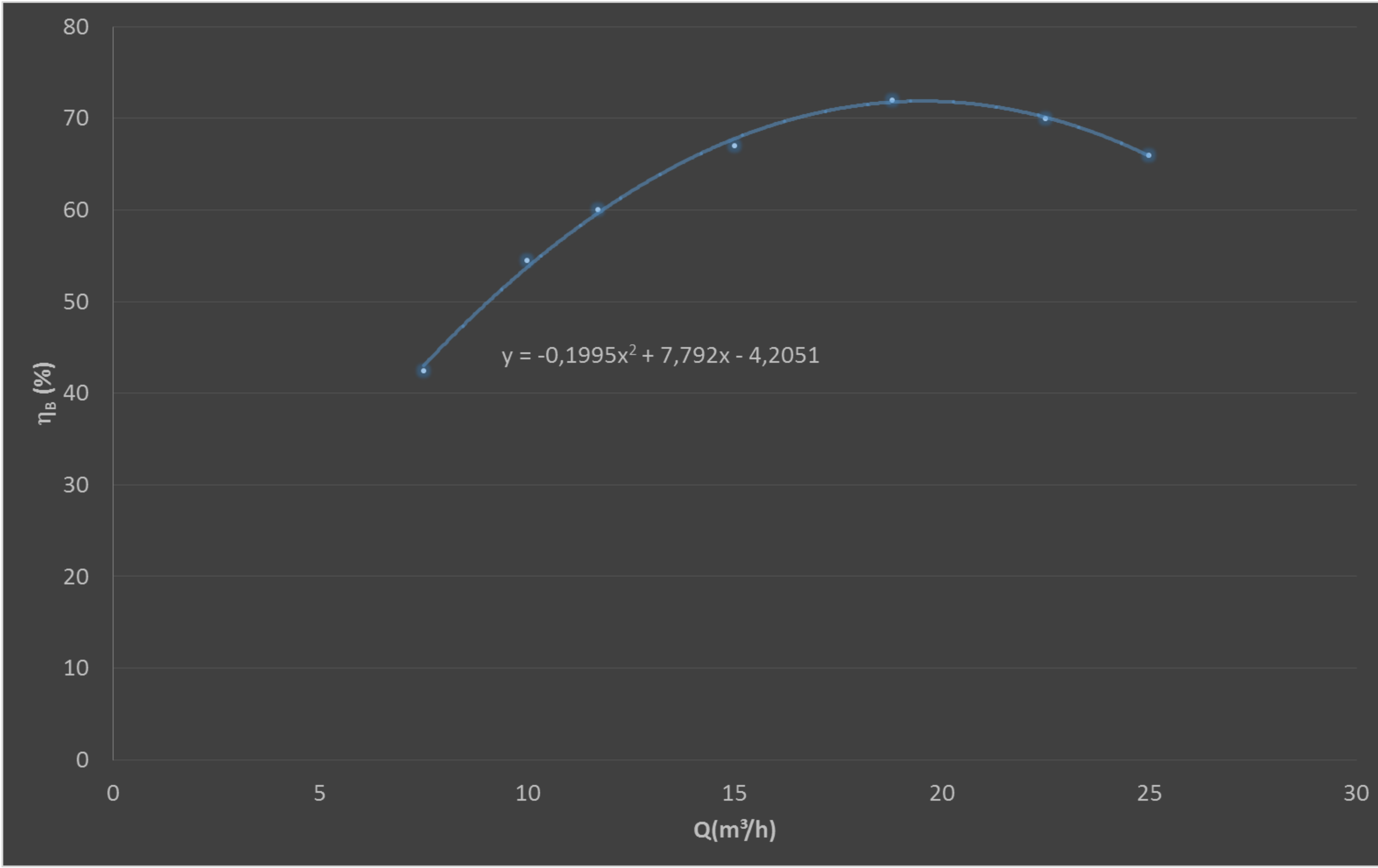
O histórico deste projeto pode ser visto no site da disciplina, no endereço:

http://www.fei.edu.br/mecanica/SisFlu/projetoalunos.htm

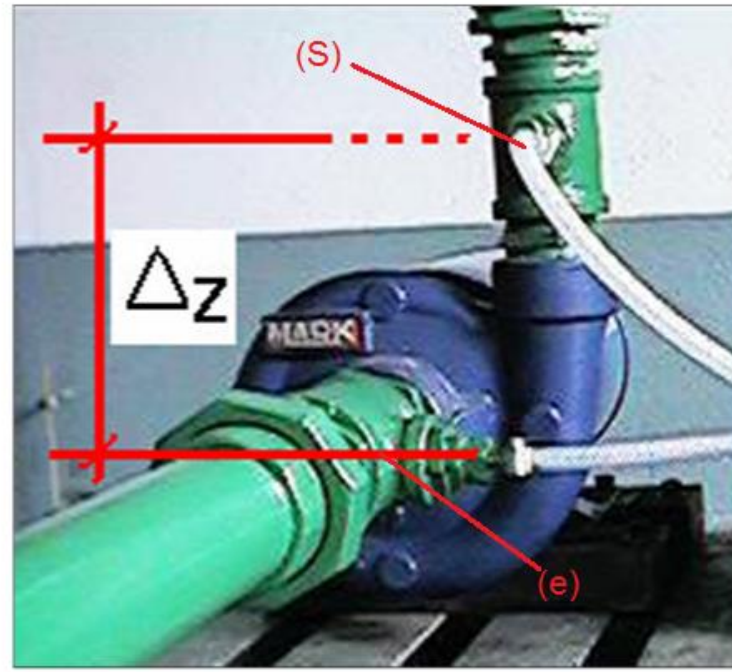
Ao construir as curvas $H_B = f(Q)$ e $H_S = f(Q)$ vamos procurar comprovar que a utilização do inversor trará uma redução na potência consumida e para viabilizar isto no próximo slide é dada a curva do rendimento da bomba em função da vazão.

Curva de Rendimento - DBC/MARK

3500rpm da MARK – ϕ105mm



Obtenção da carga manométrica



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

Manômetros alinhados, portanto:

$$p_{m_e} = p_e \rightarrow p_{m_s} = p_s$$

Calculando a H_B

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

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

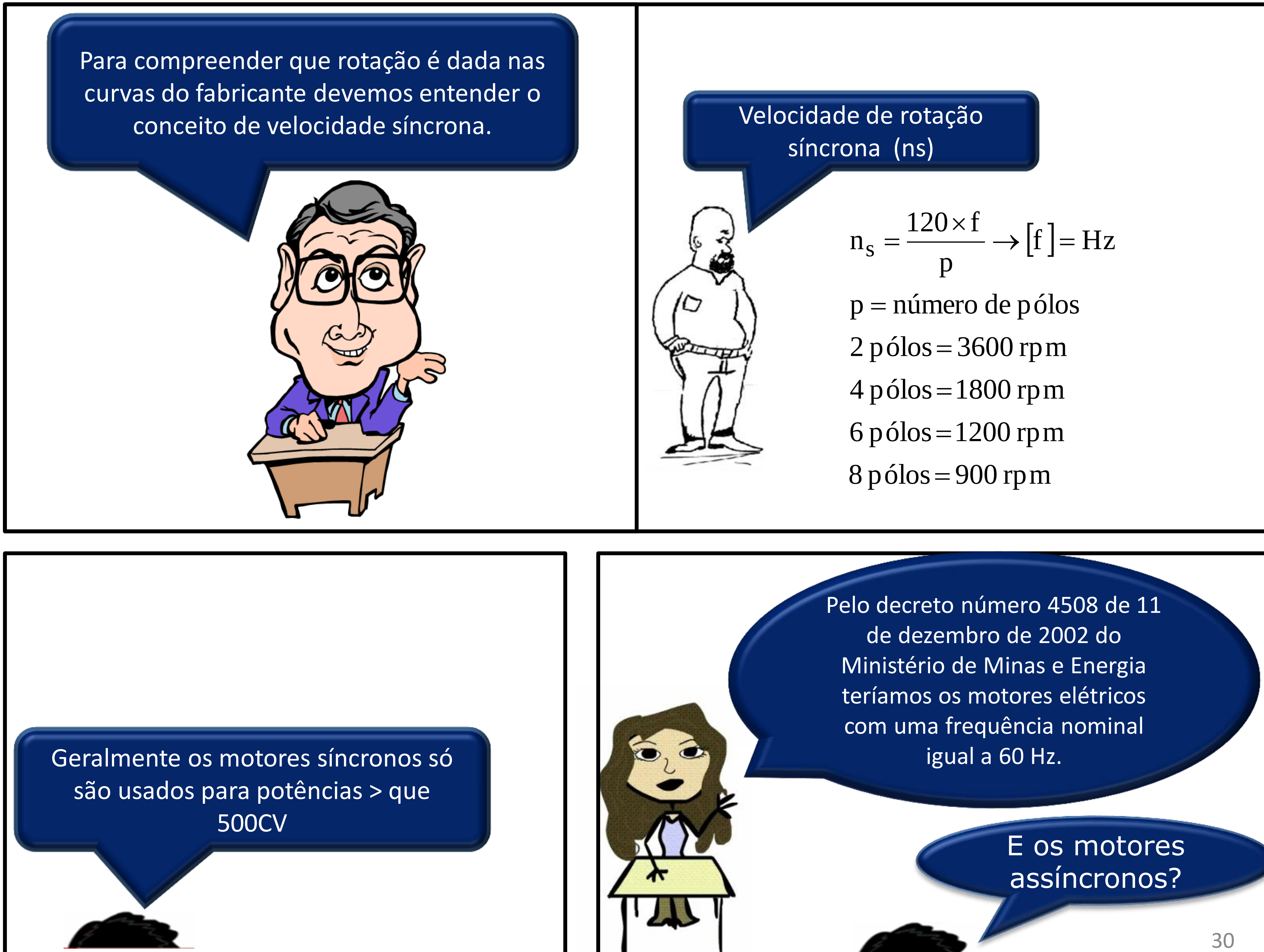
$$(s) \rightarrow \text{recalque} \rightarrow 1{,}5'' \text{ aço } 40 \rightarrow D_{int} = 40{,}8\text{mm} \rightarrow A = 13{,}1\text{cm}^2$$

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

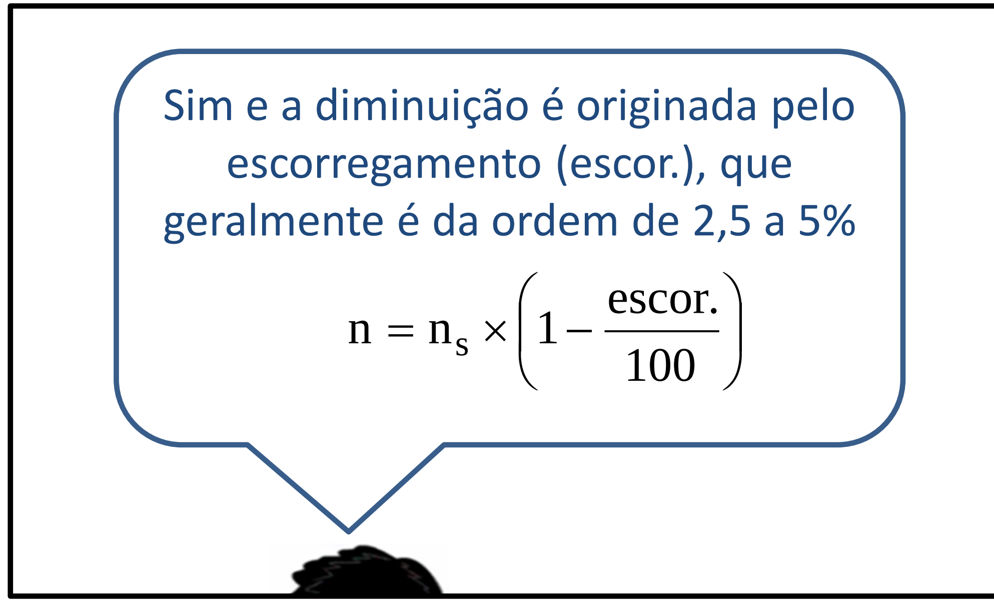
A vazão é lida diretamente no rotâmetro

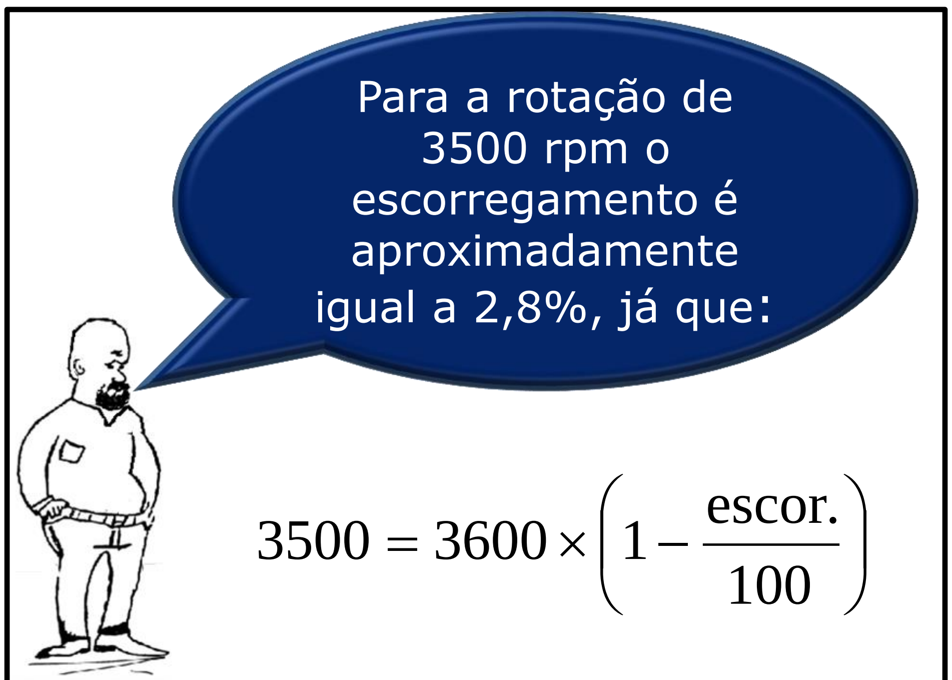
Exemplo de tabela de dados para mostrar a vantagem de controlar a vazão pelo inversor.

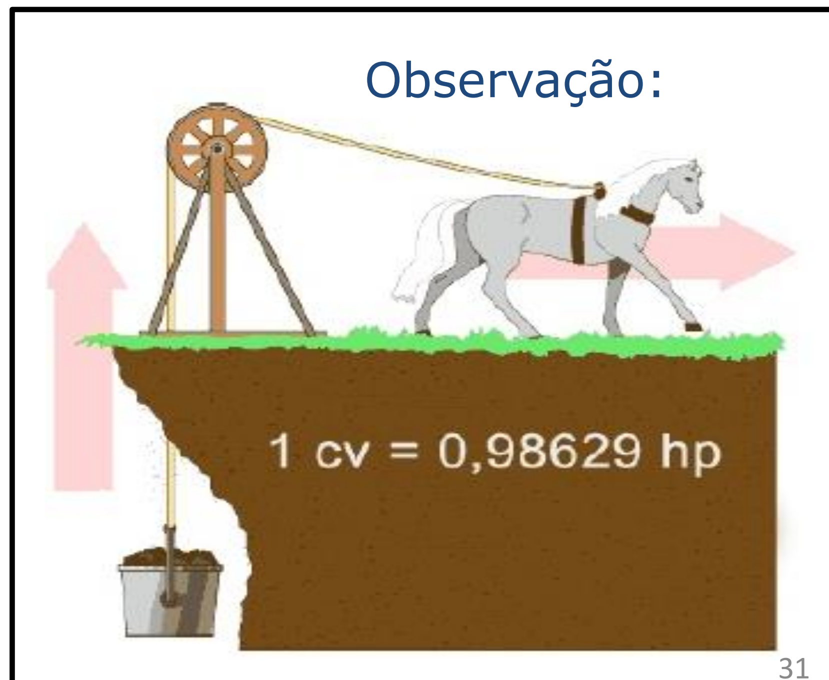
Experiência do inversor de frequência – primeira parte								
Frequência de 60 Hz					Frequência de 50 Hz			
	Q	p_{me}	p_{ms}	n	Q	p_{me}	p_{ms}	n
Ensaio	(m^3/h)	(mmHg)	(kgf/cm^2)	(rpm)	(m^3/h)	(mmHg)	(kgf/cm^2)	(rpm)
1	0	-30	2,5	3550	0	-30	1,7	2967
2	5,5	-100	2,5	3515	4,5	-80	1,7	2942
3	7,5	-110	2,4	3506	6	-100	1,65	2937
4	9,5	-130	2,35	3495	7,5	-120	1,6	2935
5	11,5	-170	2,2	3489	9,5	-140	1,5	2928
6	13,5	-200	2,1	3479	11	-150	1,45	2923
7	15,5	-250	2	3473	12,5	-190	1,3	2918
8	17,5	-300	1,8	3467	14	-230	1,2	2914

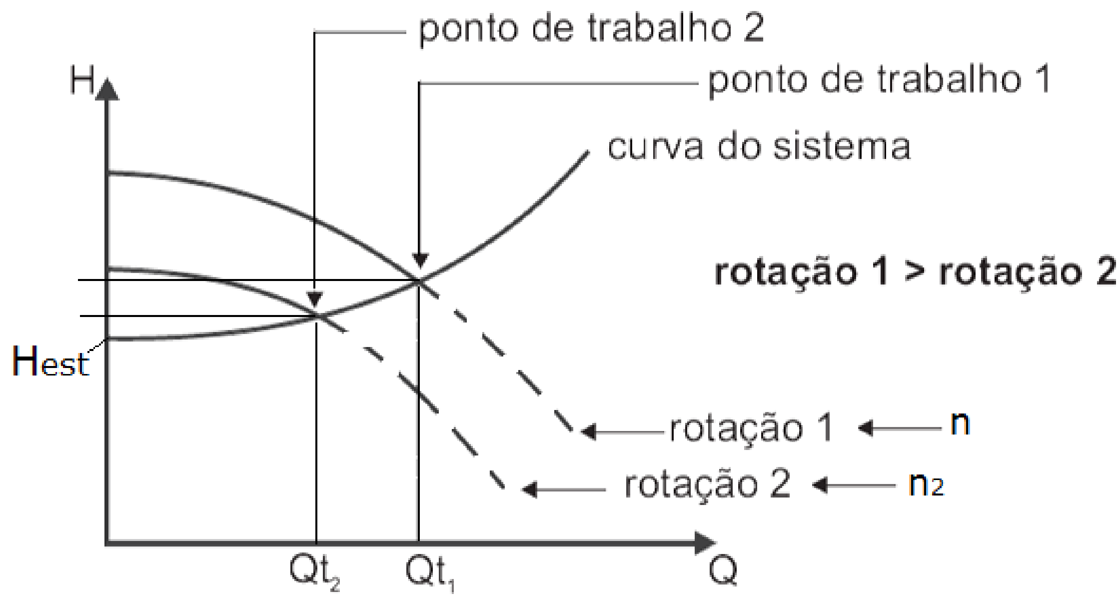

Para compreender que rotação é dada nas curvas do fabricante devemos entender o conceito de velocidade síncrona.
Velocidade de rotação síncrona (ns)
$n_s = \frac{120 \times f}{p} \rightarrow [f] = Hz$
$p =$ número de pólos
2 pólos $= 3600$ rpm
4 pólos $= 1800$ rpm
6 pólos $= 1200$ rpm
8 pólos $= 900$ rpm
Geralmente os motores síncronos só são usados para potências > que 500CV
Pelo decreto número 4508 de 11 de dezembro de 2002 do Ministério de Minas e Energia teríamos os motores elétricos com uma frequência nominal igual a 60 Hz.
E os motores assíncronos?


Nos motores assíncronos a velocidade de rotação não coincide exatamente com a velocidade de sincronismo.
Ela é menor?


Sim e a diminuição é originada pelo escorregamento (escor.), que geralmente é da ordem de 2,5 a 5%
$$n = n_s \times \left(1 - \frac{\text{escor.}}{100}\right)$$


Para a rotação de 3500 rpm o escorregamento é aproximadamente igual a 2,8%, já que:
$$3500 = 3600 \times \left(1 - \frac{\text{escor.}}{100}\right)$$

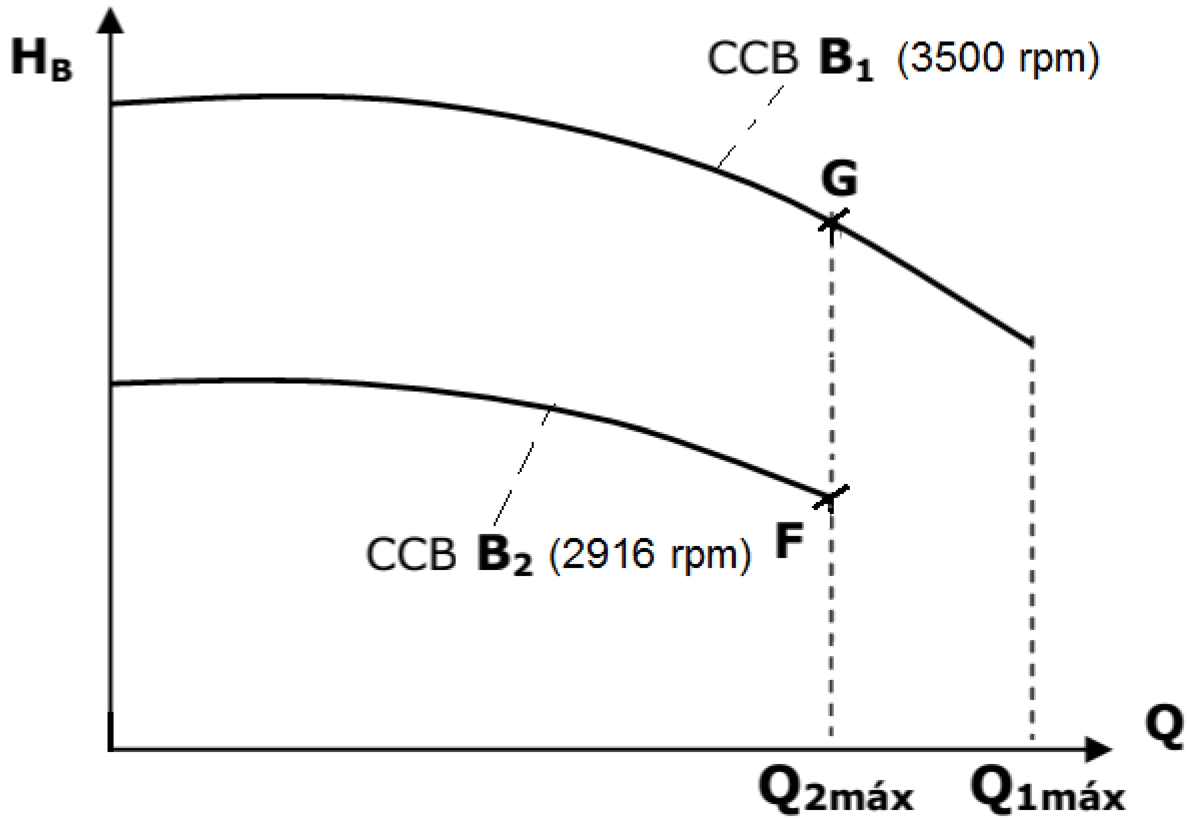

Observação:
1 cv = 0,98629 hp



Isto para rotação (n_{lida})

Analogamente faremos as correções para a rotação de 2916 rpm.

Aí obtemos as curvas abaixo, onde B_1 corresponde a 3500 rpm e a B_2 a 2916 rpm



Potência do ponto G

$$N_{B_G} = \frac{\gamma \times Q_G \times H_{B_G}}{\eta_{B_G}}$$

O rendimento do ponto G pode ser obtido da curva do rendimento em função da vazão para a rotação de 3500 rpm (slide 25)

Já o rendimento do ponto F não pode ser obtido diretamente do slide 25

Vamos recorrer a análise dimensional e igualarmos os coeficientes de vazão:

$$\phi_{B_1} = \phi_{B_2} \Rightarrow \frac{Q_{B_1}}{3500 \times D_R^3} = \frac{Q_{B_2}}{2910 \times D_R^3}$$

$$\therefore Q_{B_1} = Q_{B_2} \times \frac{3500}{2910}$$

Aí com a vazão do ponto da B_1 completamente semelhante ao ponto F da bomba B_2 no slide 25 nós calculamos o rendimento do ponto F

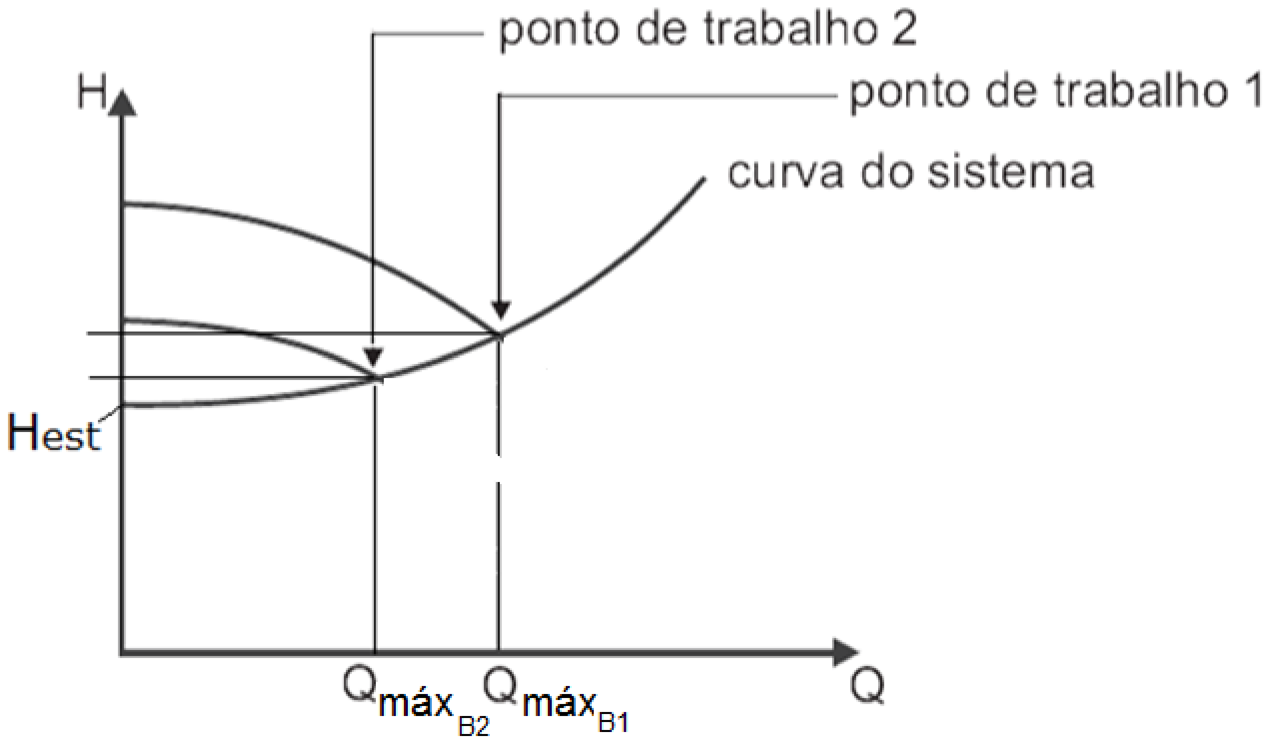
$$N_{B_F} = \frac{\gamma \times Q_F \times H_{B_F}}{\eta_{B_F}}$$

Aí podemos comparar as potências do ponto G com a do ponto F e como:

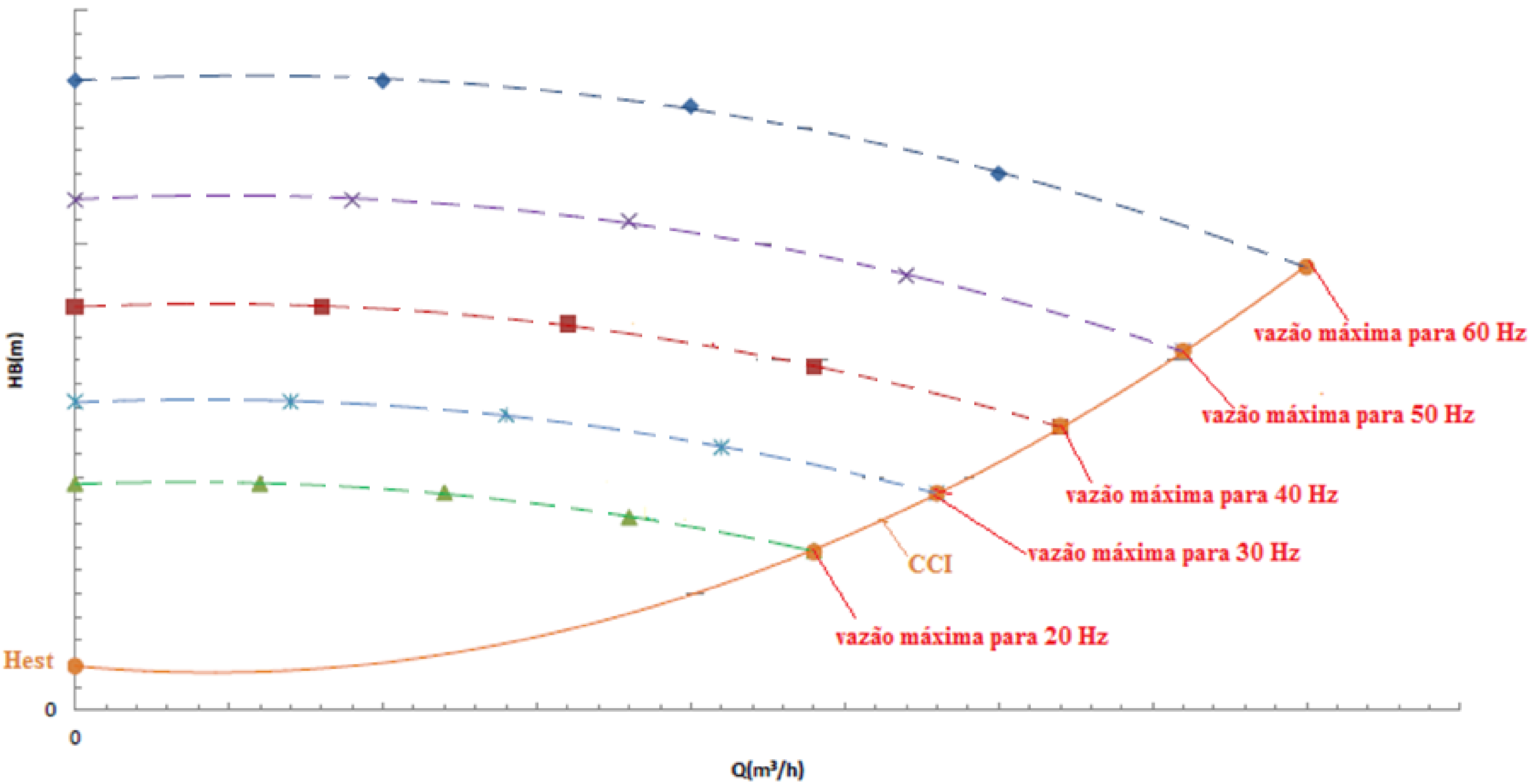
$$N_m = \frac{N_B}{\eta_m}$$

podemos concluir se houve ou não redução no consumo da potência elétrica.

Agora podemos partir para a determinação da CCI prática



O gráfico abaixo mostra o deslocamento da CCB em função da rotação



Dados coletados para a CCI prática:

Inversor de frequência – segunda parte				
	Frequência	Q	P_{me}	P_{ms}
Ensaio	(Hz)	(m^3/h)	(mmHg)	(kgf/cm^2)
1	25	4,75	-100	0,2
2	30	6,5	-110	0,3
3	40	10,5	-170	0,8
4	45	12	-200	1
5	50	14	-240	1,25
6	55	15,5	-270	1,5
7	60	17.5	-290	1,8

Determinação da carga estática feito pelo Mauricio e pelo Valdir

$$Z_{inicial} = 17cm$$

PHR
adotado no
chão

$$Z_{final} = 64cm$$