

# Décima segunda aula de teoria de ME5330

08 de novembro de 2011



Vamos iniciar o estudo do inversor de frequência.

**Conceito: dispositivo eletrônico que transforma energia elétrica CA fixa ( tensão e frequência ) em energia elétrica CA variável , controlando a potência consumida pela carga.**

Portanto o inversor de frequência pode ser utilizado para controlar a rotação de um motor assíncrono (de indução) !





E se eu posso controlar a rotação eu posso também controlar a Q pelo inversor de frequência!

Lembrando que 51% da energia elétrica gasta na indústria é usada para alimentar os motores, podemos então ver a importância de se dimensionar corretamente nossos motores e de reduzir ao máximo a potência consumida otimizando os meios de controle e de processo.

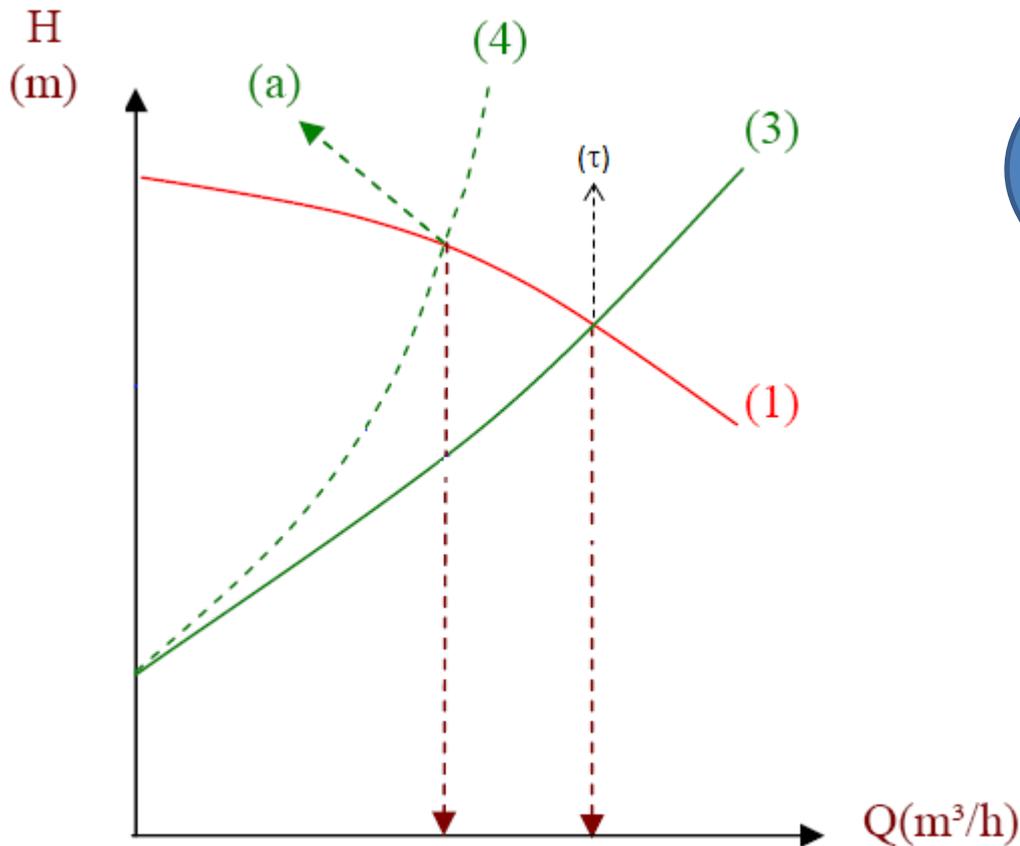
E o inversor de frequência propicia essa redução!

Como?

É uma das formas de se manejar adequadamente um sistema de bombeamento visando reduzir vazão, é alterar a rotação da bomba até a obtenção da vazão necessária, de acordo com as leis de Rateaux; isto não implica em introdução de perda de carga e o tempo de funcionamento não é alterado. Um equipamento capaz de produzir este efeito com rapidez e eficiência é o inversor de frequência, que trabalha alterando a frequência da tensão aplicada ao motor, possibilitando controlar a sua rotação; o uso do inversor de frequência na indústria em sistemas de bombeamento com este objetivo é uma prática bastante comum, pois sua aplicabilidade econômica é justificável pela redução do consumo energético, em comparação com outros procedimentos, especialmente de fechamento de válvula.



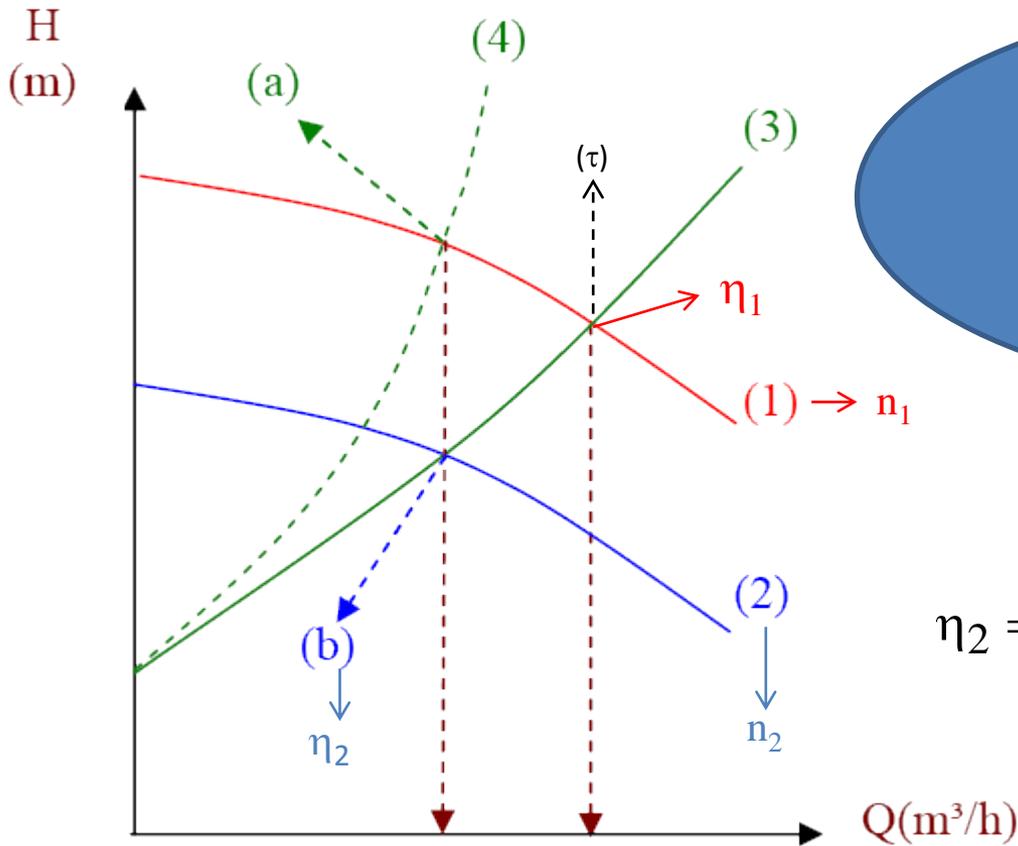
Normalmente, maneja-se o volume de água necessário de duas formas. Azevedo Netto & Alvarez (1991) citam o controle de vazão através do fechamento de registro na saída das motobombas, como sendo uma das práticas mais comuns; neste caso, há introdução de perda de carga acidental na curva do sistema, proporcionando desperdício de energia.



Regular a vazão pela válvula é o mesmo que dirigir o carro com o freio de mão puxado!



Supondo que o ponto de trabalho inicial ( $\tau$ ) corresponde ao ponto de projeto do fabricante da bomba, ao fechar a válvula chega-se a  $Q_{\text{reduzida}}$ , onde além de ter sido criada a perda, trabalha-se com rendimento menor, outro ponto importante a ser observado é que geralmente o  $H_B$  aumenta mais do que a vazão é reduzida, portanto irá ocorrer um aumento da potência consumida para a rotação  $n$ .



Já com o inversor ocorre tanto a redução da vazão como a da carga manométrica (ponto b), isto em um rendimento praticamente constante, ou com a variação que pode ser calculada pela expressão obtida no livro do Macintyre a seguir:

$$\eta_2 = 1 - \left[ (1 - \eta_1) \times \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^{0,1} \right]$$

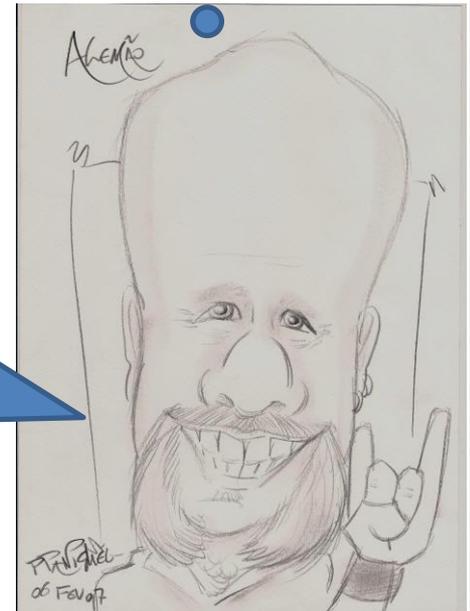


Vamos procurar  
entender o  
mencionado através  
de um exercício!

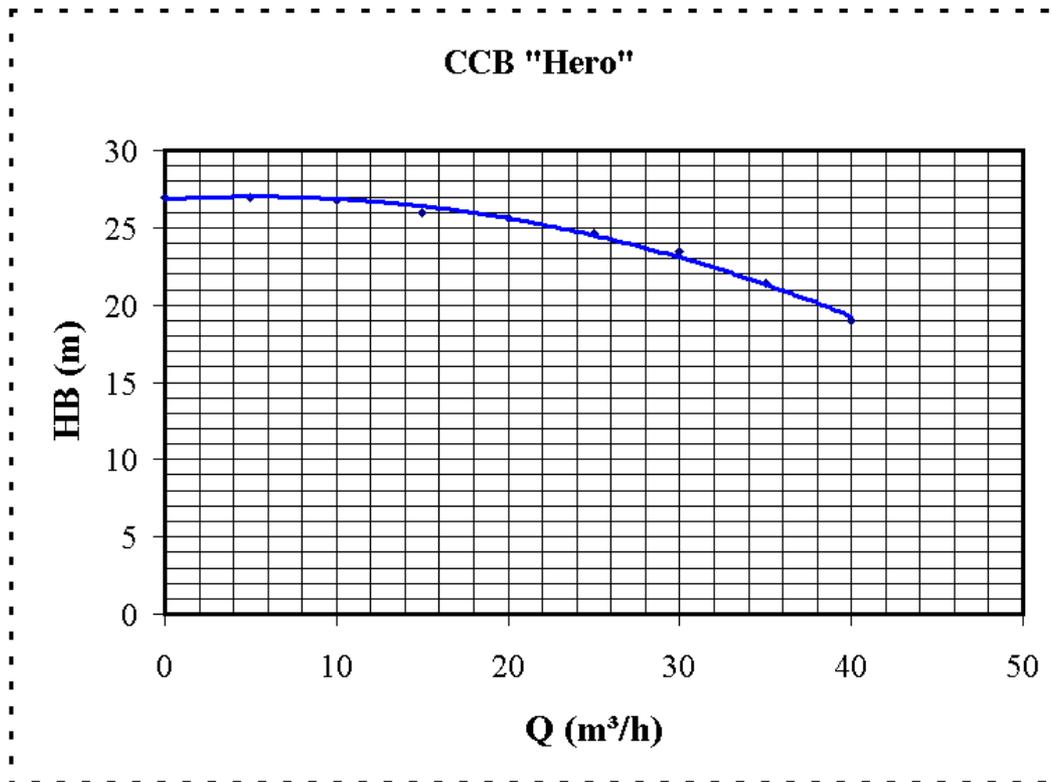


Objetivo verificar a influência da rotação ( $n$ ) nas curvas características da bomba, iniciando com  $H_B = f(Q)$

Vamos supor que a frequência foi reduzida de 58,5 Hz para 50 Hz, o que irá acontecer com a vazão máxima? E com a carga manométrica correspondente a vazão máxima? E com a potência da bomba nesta situação?



Seja a CCB da bomba Hero a seguir que tem uma rotação de 3510 rpm, motor elétrico de 2 pólos e diâmetro do rotor igual a 120 mm e onde a bomba opera com a vazão máxima.



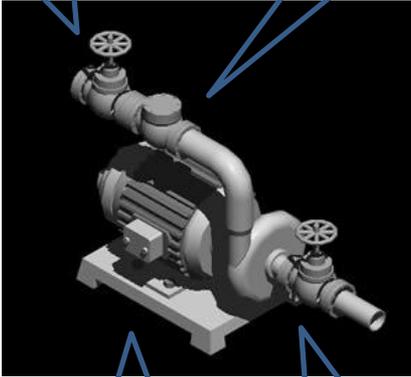
Consideramos como fluido a água com massa específica igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

$$\eta_B = 0,029 \times Q^2 + 0,0645 \times Q + 21,2$$

$$\eta_B \rightarrow \% \text{ e } Q \rightarrow \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\psi = \frac{g \times H_B}{n^2 \times D_r^2}$$

$$\phi = \frac{Q}{n \times D_r^3}$$



$$\chi = \frac{N_B}{\rho \times n^3 \times D_r^5}$$

$$n = \frac{120 \times f}{p}$$

Na solução desse exercício nós recorremos aos adimensionais típicos das bombas e ao cálculo da rotação da mesma.



$$f = 50,0 \text{ Hz} \Rightarrow n = \frac{50 \times 120}{2} = 3000 \text{ rpm}$$

Para  $n = 3510 \text{ rpm}$ , temos:  $Q_{\text{máxima}} = 40 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \Rightarrow H_B = 19 \text{ m}$

$$\eta_B = 0,029 \times 40^2 + 0,0645 \times 40 + 21,2 = 70,18 \%$$

$$N_B = \frac{1000 \times 9,8 \times \left(\frac{40}{3600}\right) \times 19}{0,7018} \cong 2948 \text{ w}$$

Condições de semelhança:

$$\phi_{58,5} = \phi_{50} \Rightarrow \frac{40}{3510} = \frac{Q_{50}}{3000} \therefore Q_{50} \cong 34,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\psi_{58,5} = \psi_{50} \Rightarrow \frac{19}{3510^2} = \frac{H_{B_{50}}}{3000^2} \therefore H_{B_{50}} \cong 13,9 \text{ m}$$

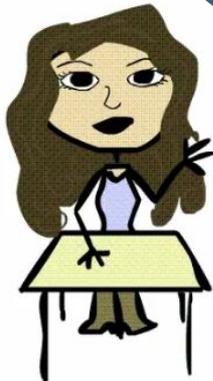
$$\chi_{58,5} = \chi_{50} \Rightarrow \frac{2948}{3510^3} = \frac{N_{B_{50}}}{3000^3} \therefore N_{B_{50}} \cong 1841 \text{ w}$$



Portanto:

1. a vazão foi reduzida;
2. a carga manométrica também foi reduzida;
3. a potência da bomba e em consequência o consumo foi reduzido.

Existiria outra maneira para se obter a vazão de  $34,2 \text{ m}^3/\text{h}$  sem alterar as características da bomba? Se sim, determine para esta situação a carga manométrica, o rendimento e a potência da bomba. Daria para comparar as duas possibilidades e concluir alguma coisa?



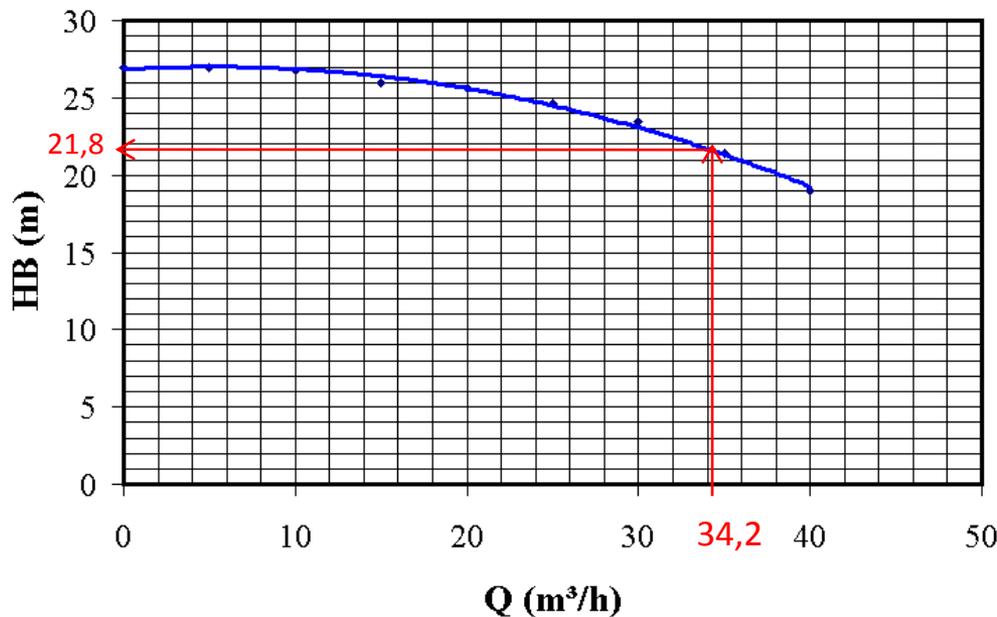
Solução: a nova maneira seria fechando parcialmente a válvula controladora de vazão



$$\text{Para a vazão de } 34,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \Rightarrow H_B \cong 21,8 \text{ m}$$

$$\eta_B = 0,029 \times 34,2^2 + 0,0645 \times 34,2 + 21,2 \cong 57,3 \%$$

CCB "Hero"



$$N_B = \frac{1000 \times 9,8 \times \left( \frac{34,2}{3600} \right) \times 21,8}{0,573}$$

$$N_B \cong 3542 \text{ w}$$

Pode-se observar que o consumo será muito maior nesta situação do que na obtida através do inversor de frequência.





Na solução do exercício anterior recorreremos também as condições de semelhança.

Condições de semelhança:

$$\Psi_{\text{modelo}} = \Psi_{\text{protótipo}}$$

$$\phi_{\text{modelo}} = \phi_{\text{protótipo}}$$

$$X_{\text{modelo}} = X_{\text{protótipo}}$$

E o rendimento, será uma condição de semelhança?





Para responder o questionamento anterior, evoca-se a expressão para o cálculo do rendimento da bomba:

$$\eta_B = \frac{\gamma \times Q \times H_B}{N_B}$$



Através dos adimensionais típicos das bombas hidráulicas, pode-se obter uma importante relação entre o rendimento da bomba e estes adimensionais:

$$Q = \phi \times n \times D_r^3$$

$$g \times H_B = \psi \times n^2 \times D_r^2$$

$$N_B = \chi \times \rho \times n^3 \times D_r^5$$

$$\therefore \eta_B = \frac{\rho \times \phi \times n \times D_r^3 \times \psi \times n^2 \times D_r^2}{\chi \times \rho \times n^3 \times D_r^5}$$

$$\eta_B = \frac{\phi \times \psi}{\chi}$$



Como na condição de semelhança completa tem-se que:  $\Phi_m = \Phi_p$  ;  
 $\Psi_m = \Psi_p$  e  $\chi_m = \chi_p$  pode-se concluir que também fará parte das condições de semelhança a igualdade entre os rendimentos das bombas, ou seja:  $\eta_m = \eta_p$ .

Será que isso vale sempre?



Na prática o rendimento pode sofrer variações tanto com a rotação como com o diâmetro do rotor. Para a variação da rotação essa correção pode ser feita introduzindo-se os rendimentos na equação de potência, considerando para isto o rendimento  $\eta_1$  em rotação nominal e o rendimento  $\eta_2$  para uma rotação qualquer, que pode ser obtido a partir da expressão empírica 12 (Macintyre, Archibald Joseph - Bombas e Instalações de Bombeamento - editado pela Guanabara Dois - segunda edição) a seguir. Comolet (1.961) também propôs uma outra expressão empírica para essa correção (equação 13) que geralmente é utilizada para água quente.

$$\eta_2 = 1 - \left[ (1 - \eta_1) \times \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^{0,1} \right] \rightarrow (12)$$

$$\eta_2 = \frac{\eta_1}{\eta_1 + (1 - \eta_1) \times \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^{0,17}} \rightarrow (13)$$



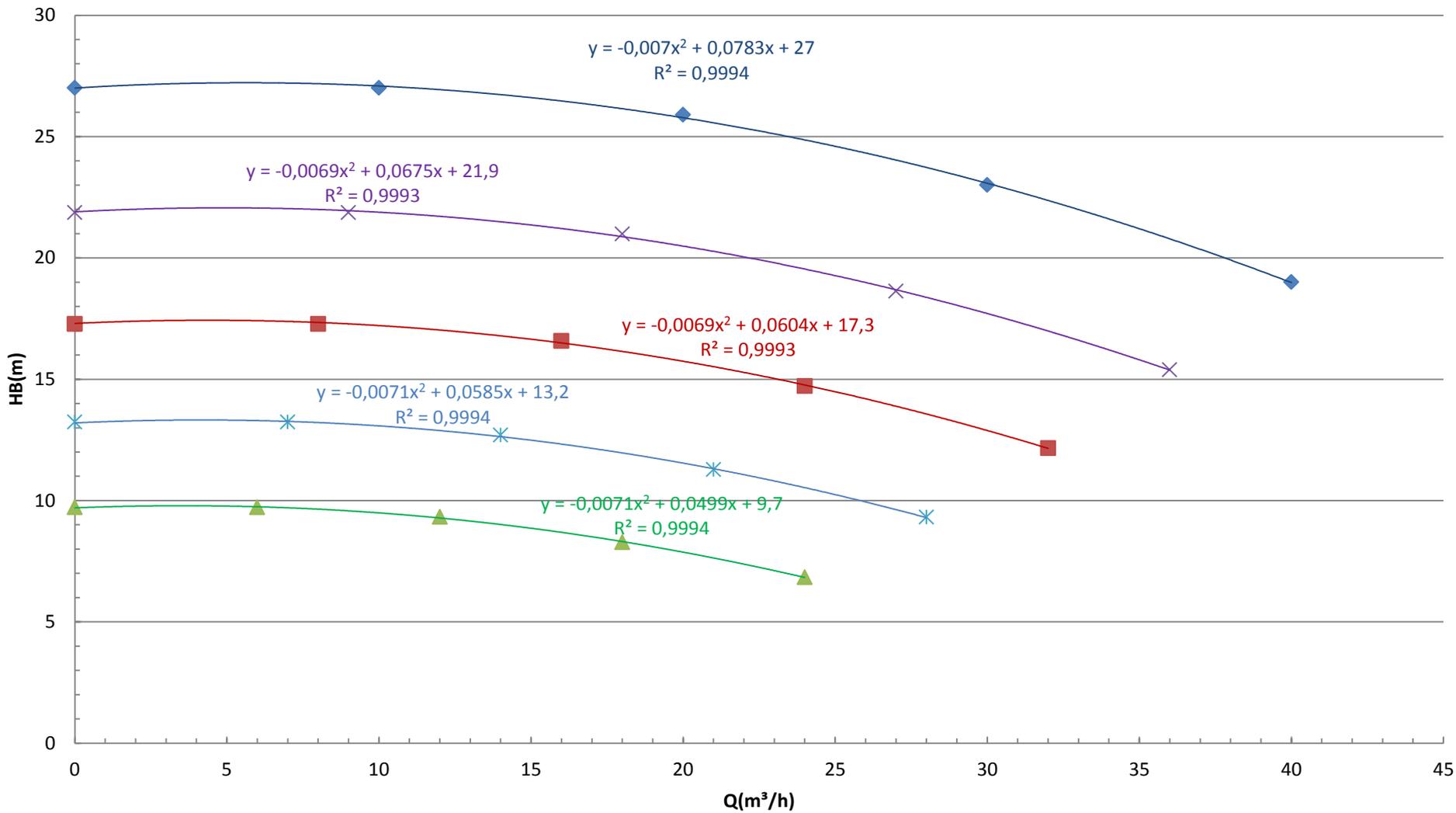
Poderíamos utilizar o  
inversor de frequência  
para alguma outra  
aplicação?

Se conhecermos a carga estática da instalação, poderíamos utilizá-lo para obtenção da CCI prática.



Conhecida a tabela abaixo e a carga estática de uma dada instalação de bombeamento que é igual a 1,9 m, obtenha a sua CCI prática

3500 rpm		3150		2800		2450		2100	
$Q_{3500}$ (m <sup>3</sup> /h)	$H_{B3500}$ (m)	$Q_{3150}$ (m <sup>3</sup> /h)	$H_{B3150}$ (m)	$Q_{2800}$ (m <sup>3</sup> /h)	$H_{B2800}$ (m)	$Q_{2800}$ (m <sup>3</sup> /h)	$H_{B2800}$ (m)	$Q_{2100}$ (m <sup>3</sup> /h)	$H_{B2100}$ (m)
0	27	0	21,9	0	17,3	0,0	13,2	0	9,7
10	27	9	21,9	8	17,3	7,0	13,2	6	9,7
20	25,9	18	21,0	16	16,6	14,0	12,7	12	9,3
30	23	27	18,6	24	14,7	21,0	11,3	18	8,3
40	19	36	15,4	32	12,2	28,0	9,3	24	6,8



- ◆ HB3500 (m)
  - CCB\_2800
  - ▲ CCB\_2100
  - × CCB\_3150
  - ✱ CCB\_2450
- Polinômio (HB3500 (m))
  - Polinômio (CCB\_2800)
  - Polinômio (CCB\_2100)
  - Polinômio (CCB\_3150)
  - Polinômio (CCB\_2450)



Conhecida as CCB para diversas rotações, as quais foram obtidas através de um inversor de frequência, podemos obter a tabela de pontos da CCI!

Importante observar que só consideramos um (1) ponto de cada CCB.

A carga estática é dada, mas quais seriam os outros pontos?

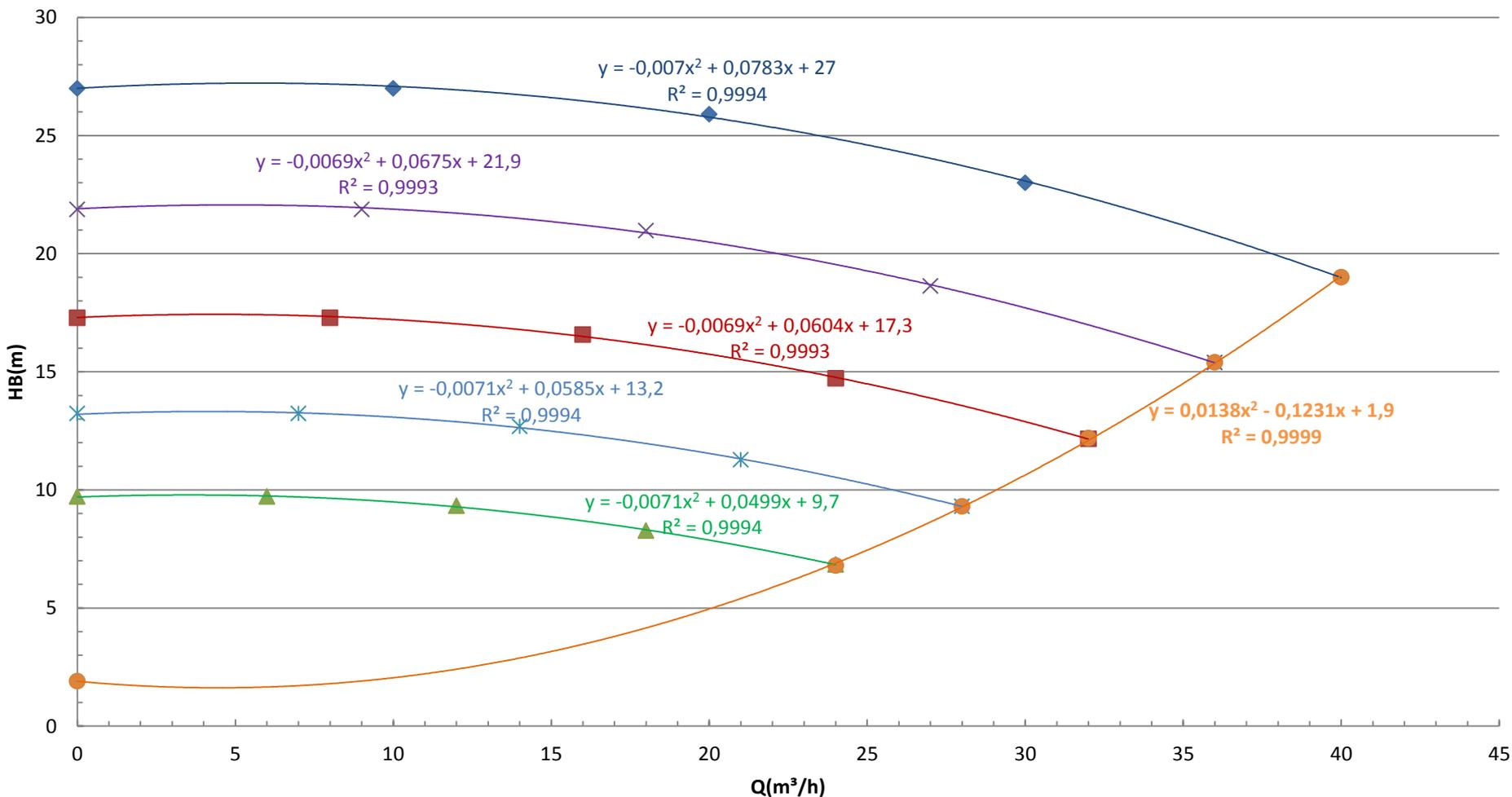


Lembre que:

$$n = \frac{120 \times f}{p}$$

CCI	
Q (m <sup>3</sup> /h)	H <sub>s</sub> (m)
0	1,9
24	6,8
28	9,3
32	12,2
36	15,4
40	19

Seriam os pontos correspondentes a máxima vazão de cada rotação imposta pelo inversor, já que este representa o ponto de trabalho obtido com a válvula de controle de vazão totalmente aberta.



- |                        |                        |                          |                        |
|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| ◆ HB3500 (m)           | ■ CCB_2800             | ▲ CCB_2100               | ✕ CCB_3150             |
| ✕ CCB_2450             | ● CCI                  | — Polinômio (HB3500 (m)) | — Polinômio (CCB_2800) |
| — Polinômio (CCB_2100) | — Polinômio (CCB_3150) | — Polinômio (CCB_2450)   | — Polinômio (CCI)      |

Vamos aplicar o que acabamos de ver na próxima experiência de laboratório!

