

PME3453 Máquinas de fluxo e sistemas fluidodinâmicos



EPUSP / Engenharia Mecânica



Humberto Gissoni



1. Energia
2. Máquinas de transformação de energia
3. Cavitação
4. Aproveitamentos hidrelétricos
5. Aproveitamentos termelétricos
- 6. Sistemas de recalque**



PARTE 2

6.5 Operação de bombas hidráulicas de fluxo

6.5.1 Introdução

6.5.2 Regulagem por manobra de válvula

6.5.3 Regulagem por associação de bombas

6.5.4 Regulagem por by-pass

6.5.5 Regulagem por variação de rotação

6.5.6 Comparação entre regulagens

6.5.7 Regulagem por manobra de pás do rotor

6.5.8 Adequação das curvas da bomba à operação

6.5.9 Condições limite de operação



PARTE 2

6.6 Partida e parada de bombas hidráulicas de fluxo

6.6.1 Partida com válvula de controle de vazão fechada

6.6.2 Partida com retenção fechada e controle aberto

6.6.3 Partida com controle aberto e sem carga estática

6.6.4 Partida com controle aberto e tubulação vazia

6.6.5 Parada de bomba com válvula de retenção

6.6.6 Parada de bomba sem válvula de retenção

6.6.7 Alternativas ao bloqueio por válvula de retenção

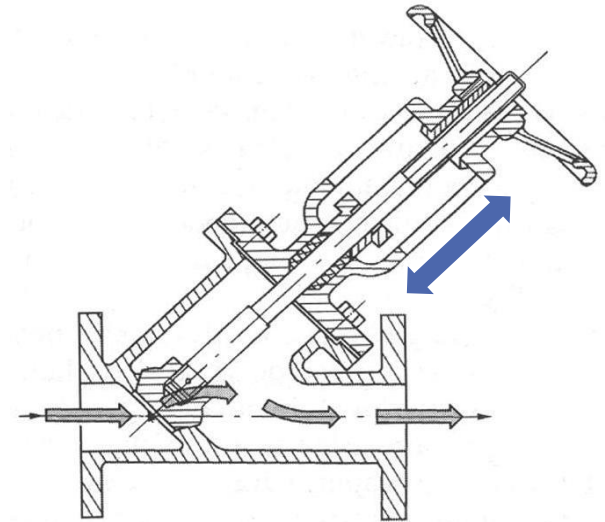
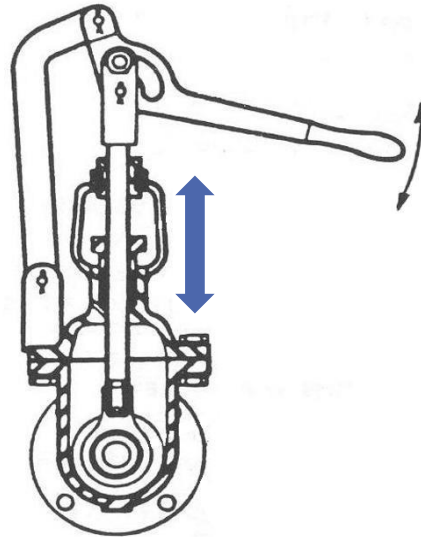
Regulagem por manobra de válvula



Válvulas: variações de vazão a partir da variação da perda de carga localizada por elas imposta ao sistema de recalque.



Válvula de gaveta
(acionamento rápido)



Válvula de globo
(em Y)

Regulagem por manobra de válvula



$$H_B = H_g + \Delta h_t$$

$$\Delta h_t = \Delta h_f + \Delta h_s + \Delta h_v$$

Δh_f = perdas distribuídas Δh_s = perdas localizadas Δh_v = perdas na válvula

Δh_f e Δh_s = perdas dependem apenas da instalação.

$$\Delta h_t = \left(f \frac{L}{D} + \Sigma k_s + k_v \right) \frac{v^2}{2g} \quad \Rightarrow \quad \Delta h_t = (C + C_v) Q^2$$

$$C = \left(f \frac{L}{D} + \Sigma k_s \right) \frac{8}{g \pi^2 D_r^4} \quad C_v = \frac{8}{g \pi^2 D_r^4} k_v$$

$$H_B = H_g + (C + C_v) Q^2$$

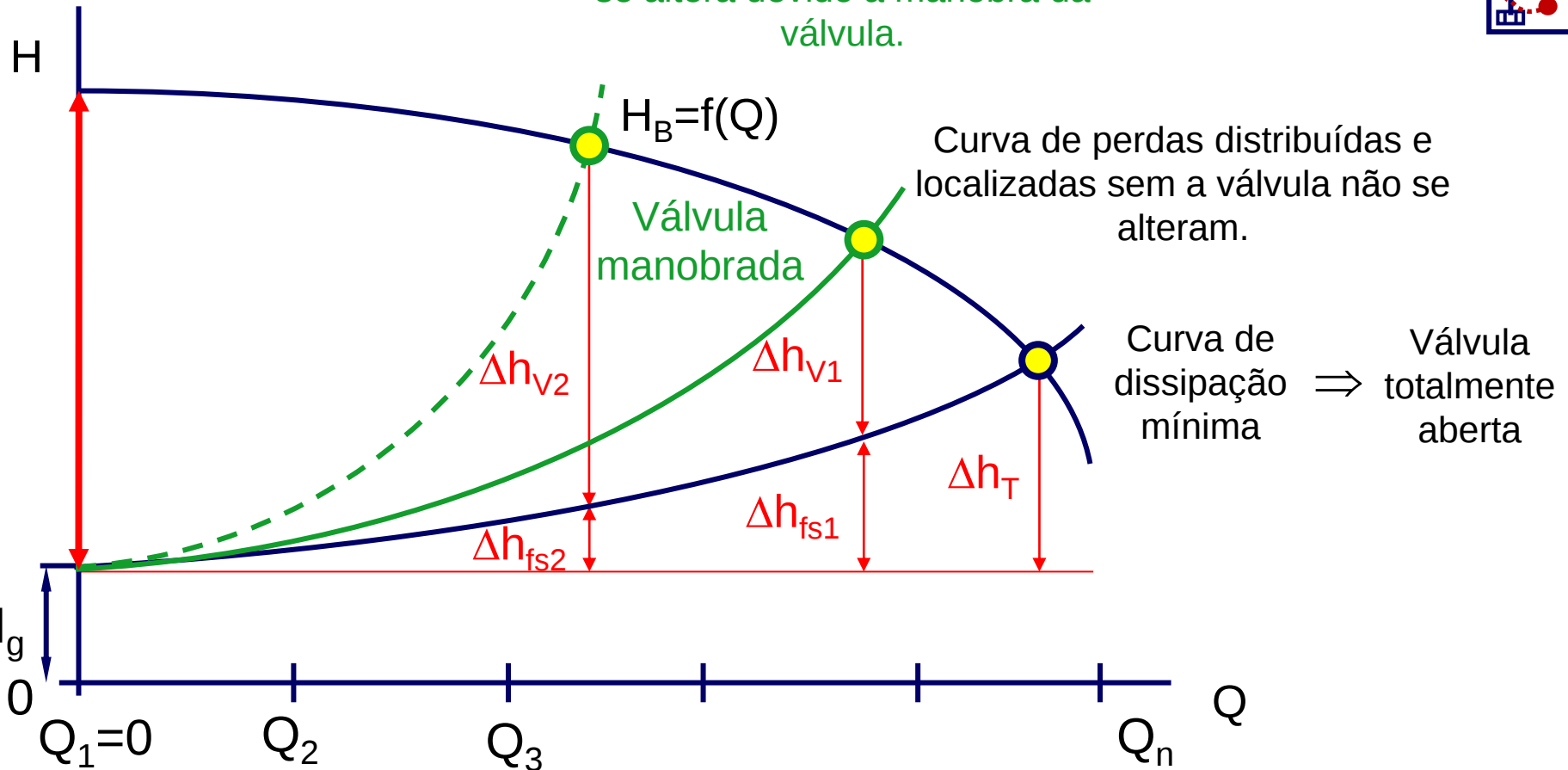
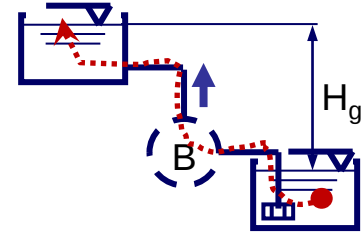
Regulagem por manobra de válvula



$$\Delta h_T = \Delta h_f + \Delta h_s + \Delta h_v$$

$$\Delta h_{fs} = \Delta h_f + \Delta h_s$$

Curva da perda de carga total se altera devido à manobra da válvula.



Regulagem por manobra de válvula

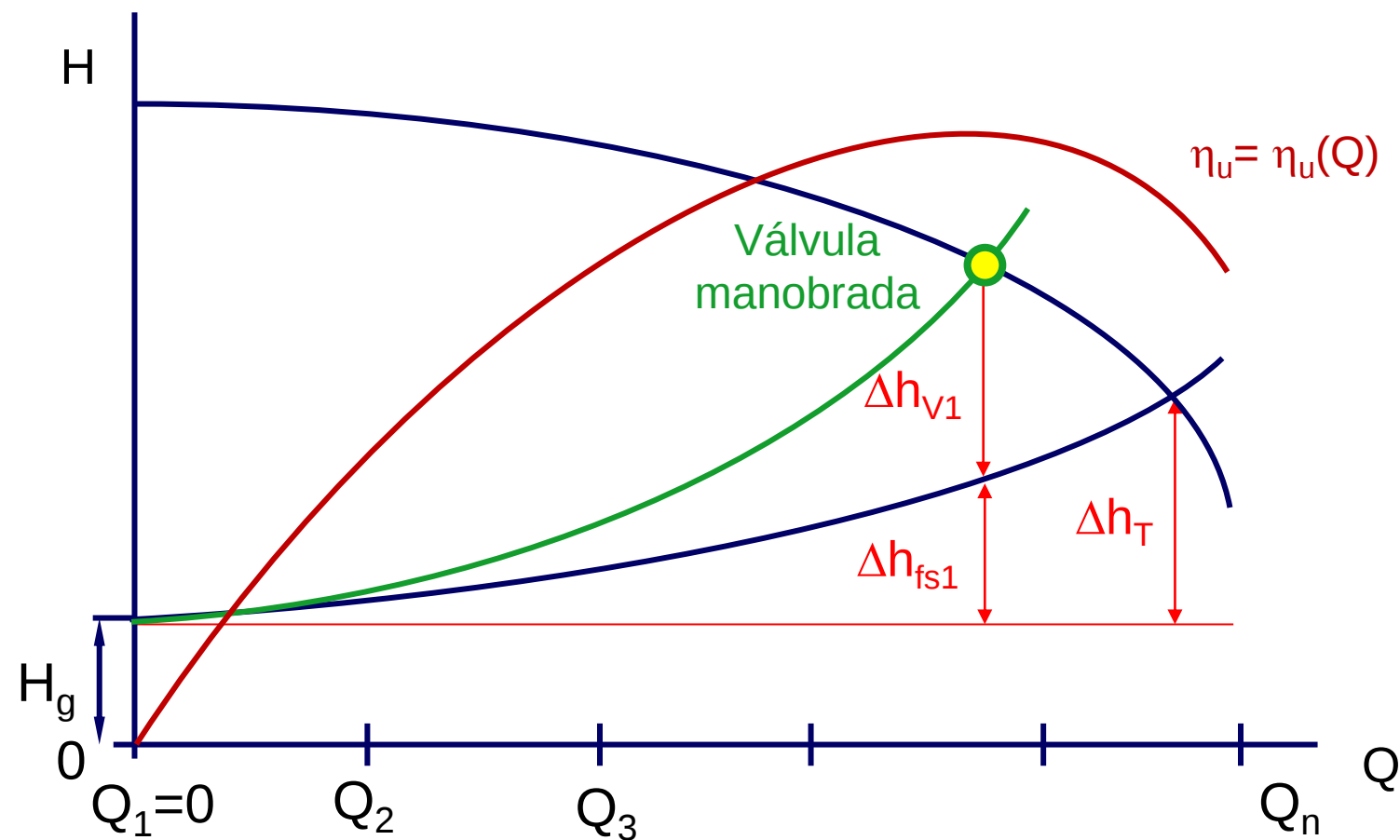


η_u = rendimento útil

$$P_u = \frac{\gamma Q H}{\eta_u}$$

P_u = potência útil

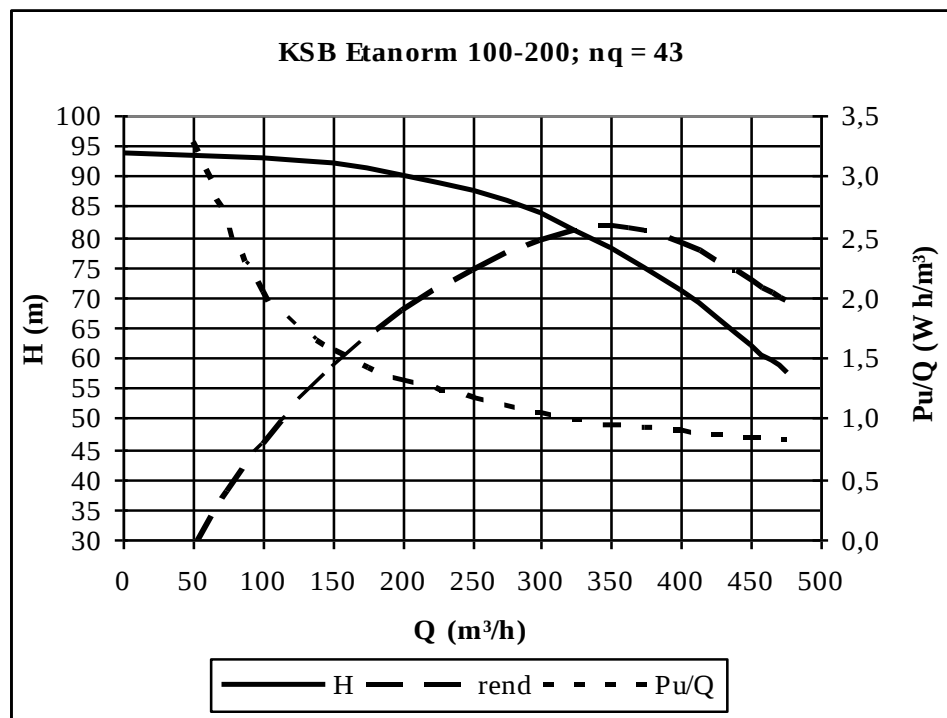
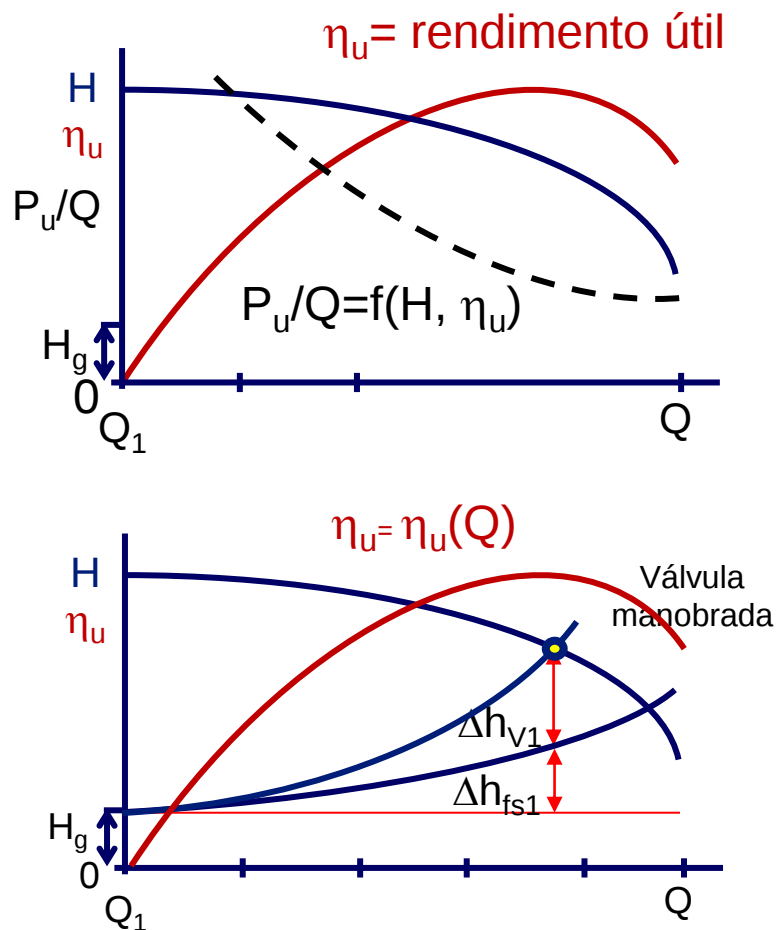
P_u : adquirida sob forma de energia elétrica



Regulagem por manobra de válvula



$$P_u = \frac{\gamma Q H}{\eta_u} \Rightarrow \frac{P_u}{Q} = \gamma \frac{H}{\eta_u}$$



Regulagem por manobra de válvula

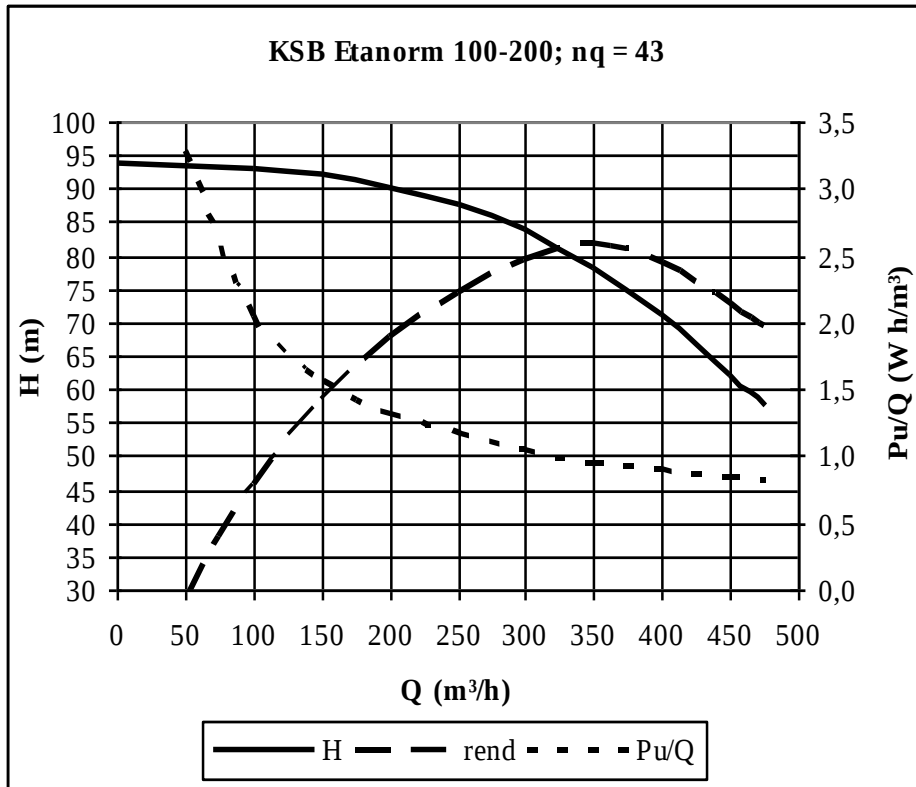


η_u = rendimento útil

P_u = potência útil (elétrica)

$$P_u = \frac{\gamma Q H}{\eta_u} \Rightarrow \frac{P_u}{Q} = \gamma \frac{H}{\eta_u}$$

$$\frac{P_u}{Q} = [W] \frac{[s]}{[m^3]} = \frac{[N m]}{[s]} \frac{[s]}{[m^3]} = \frac{[N m]}{[m^3]}$$



$$\frac{P_u}{Q} = \frac{E}{\Delta}$$

E : energia
 Δ : volume

Da curva P_u/Q conclui-se que o custo operacional cresce com a redução da vazão.

OU

A energia demandada para o bombeamento aumenta com a redução do volume recalcado.

Regulagem por manobra de válvula



η_u = rendimento útil

P_u = potência útil (elétrica)

Da curva P_u/Q conclui-se que o custo operacional cresce com a redução da vazão.

OU

A energia demandada para o bombeamento aumenta com a redução do volume recalcado.

$\eta_q=43$; BHF radial

Faixa recomendada

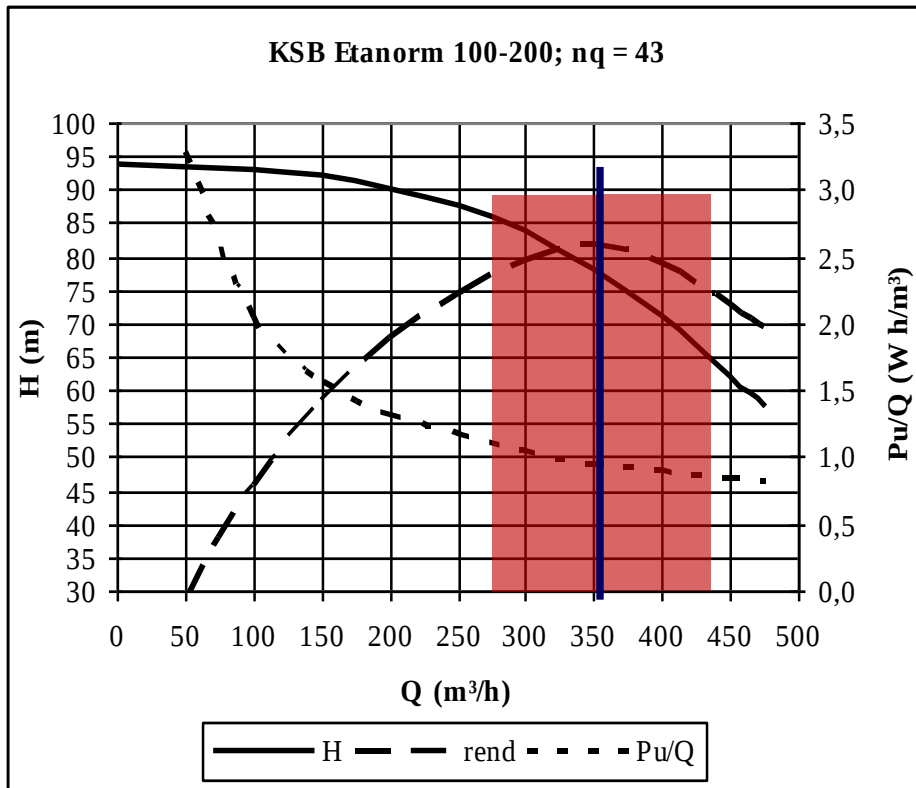
$q_{\text{mín}}: 1,0$ $q_{\text{máx}}: 1,65$

KSB Etanorm 100-200

$Q_{\text{mínfr}}: 264 \text{ m}^3/\text{h}$

$Q_{\text{ot}}: 350 \text{ m}^3/\text{h}$

$Q_{\text{máxfr}}: 436 \text{ m}^3/\text{h}$



Regulagem por manobra de válvula



η_u = rendimento útil

P_u = potência útil (elétrica)

KSB Etanorm 100-200

Faixa recomendada

$Q_{\text{mínfr}}$: 264 m³/h

$Q_{\text{ót}}$: 350 m³/h

$Q_{\text{máxfr}}$: 436 m³/h

Menor custo

Melhor opção econômica

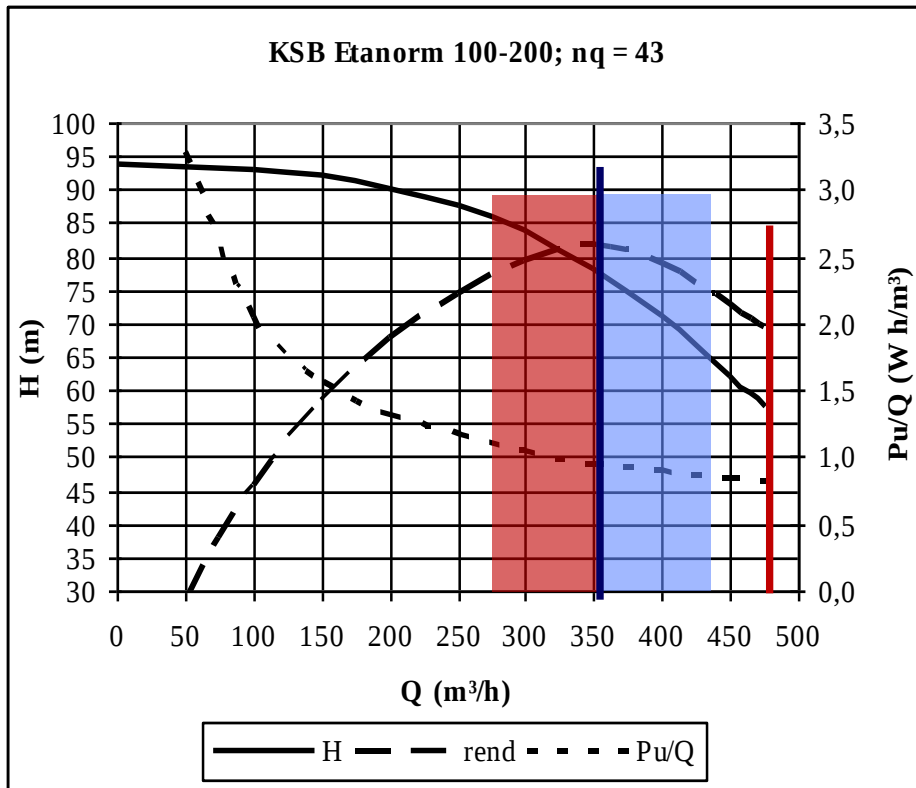
Operar na vazão máxima da bomba:

$Q_{\text{máxBHF}}$ = 475 m³/h

Melhor opção técnico-econômica

Operar entre a vazão ótima, $Q_{\text{ót}}$ e a máxima recomendada $Q_{\text{máxfr}}$

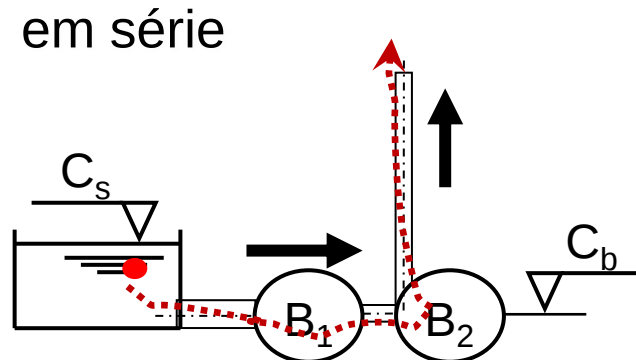
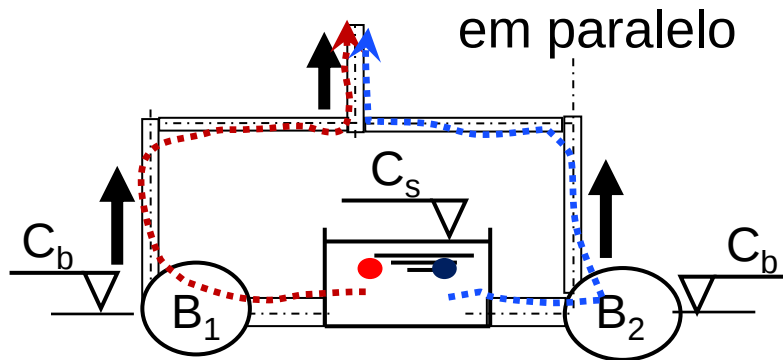
$350 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q_{\text{op}} \leq 436 \text{ m}^3/\text{h}$



Regulagem por associação de bombas



Várias bombas sendo associadas a partir de sua entrada ou saída de operação.



$$H_{as} = H_{B1} = H_{B2}$$

cargas

$$Q_{as} = Q_{B1} + Q_{B2}$$

vazões

$$P_{uas} = P_{ua1} + P_{ua2}$$

potências

n bombas

$$H_{as} = H_{B1} + H_{B2}$$

$$Q_{as} = Q_{B1} = Q_{B2}$$

$$P_{uas} = P_{ua1} + P_{ua2}$$

$$H_{as} = H_{B1} = \dots = H_{Bn}$$

$$Q_{as} = Q_{B1} + Q_{B2} + \dots + Q_{Bn}$$

$$P_{uas} = P_{ua1} + P_{ua2} + \dots + P_{uan}$$

$$H_{as} = H_{B1} + H_{B2} + \dots + H_{Bn}$$

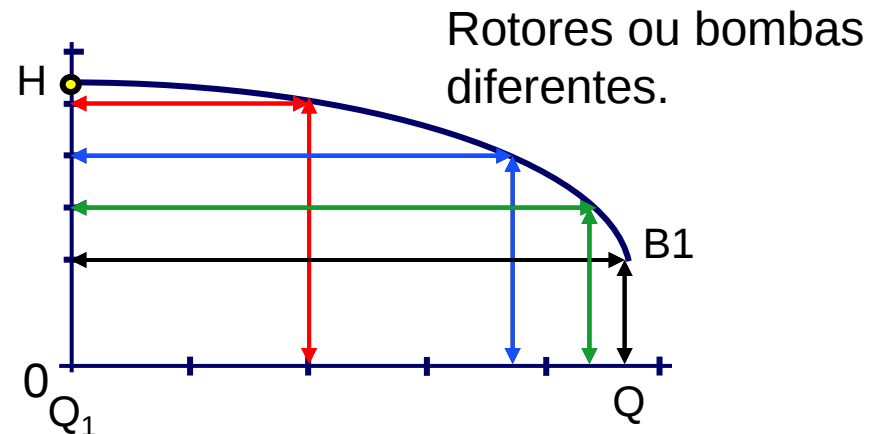
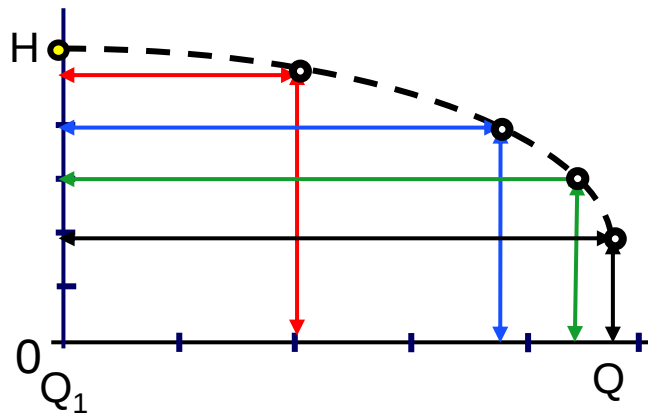
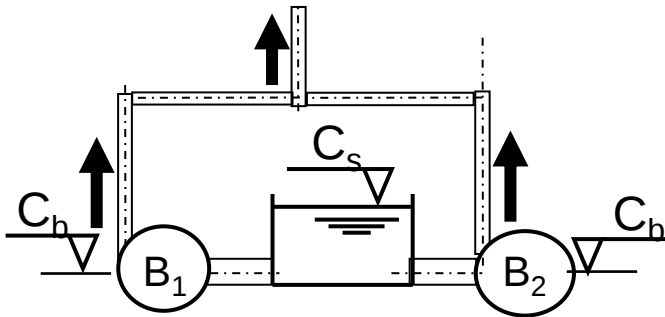
$$Q_{as} = Q_{B1} = \dots = Q_{Bn}$$

$$P_{uas} = P_{ua1} + P_{ua2} + \dots + P_{uan}$$

Regulagem por associação de bombas



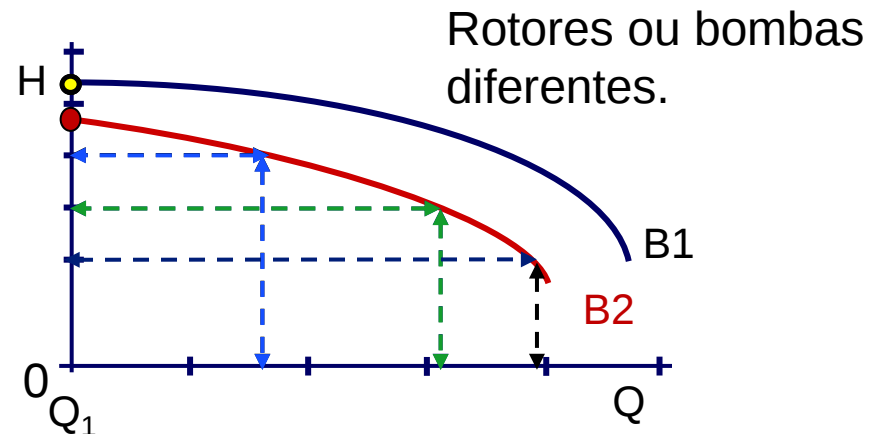
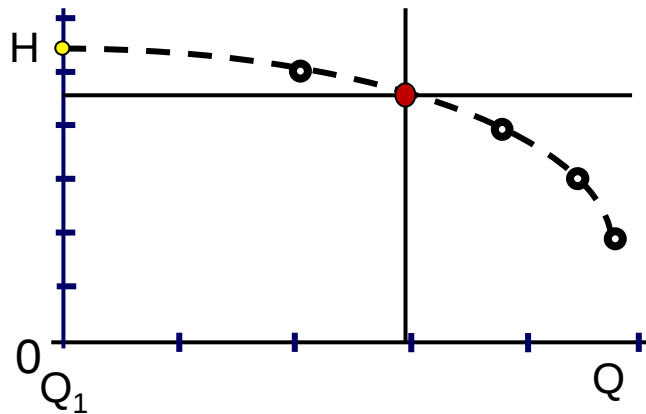
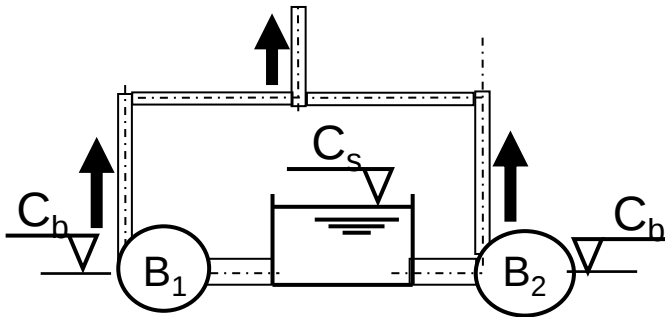
Várias bombas sendo associadas em paralelo a partir de sua entrada ou saída de operação.



Regulagem por associação de bombas



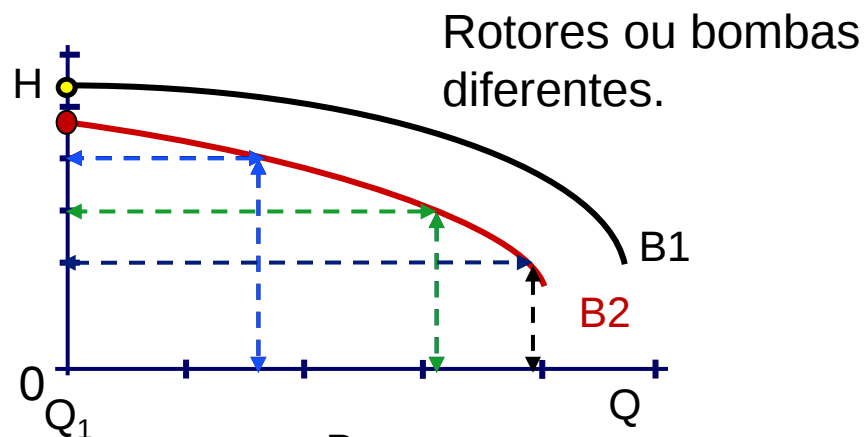
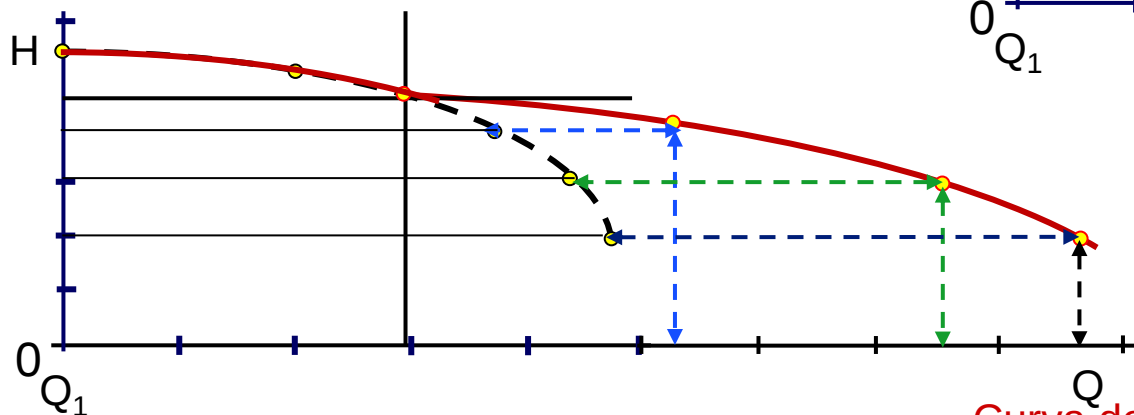
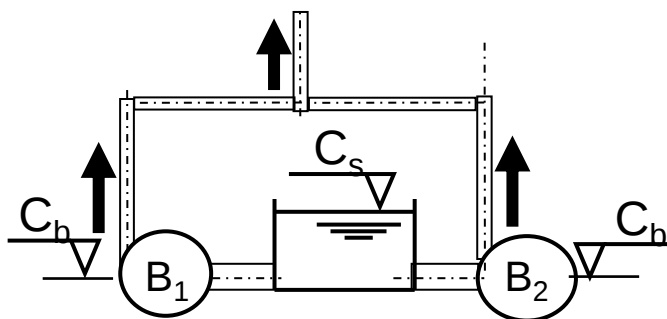
Várias bombas sendo associadas em paralelo a partir de sua entrada ou saída de operação.



Regulagem por associação de bombas



Várias bombas sendo associadas em paralelo a partir de sua entrada ou saída de operação.



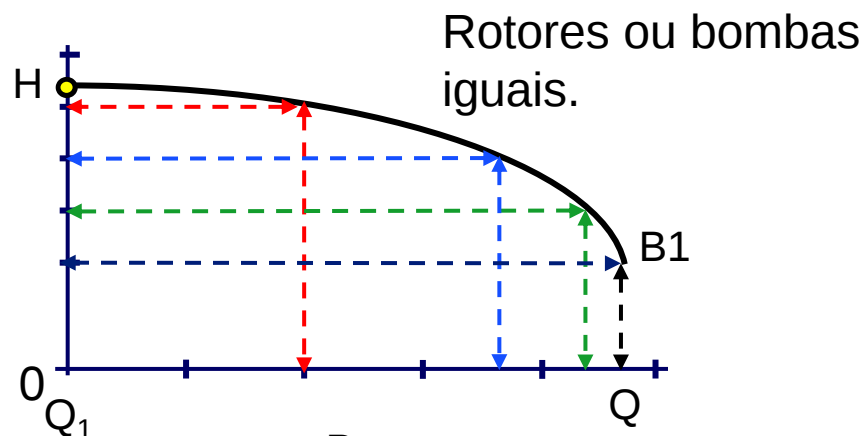
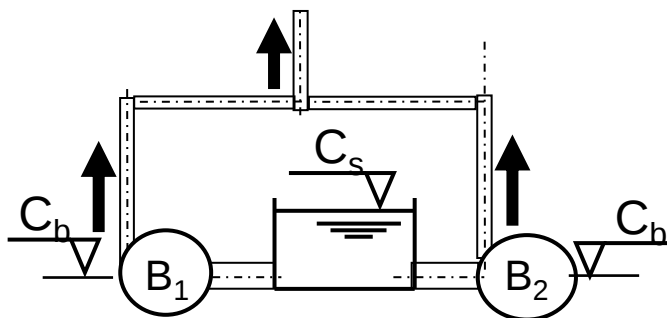
Para a mesma carga, somam-se as vazões de cada uma das bombas ou dos rotores associados.

Curva de carga da associação em paralelo das bombas ou rotores B1 e B2

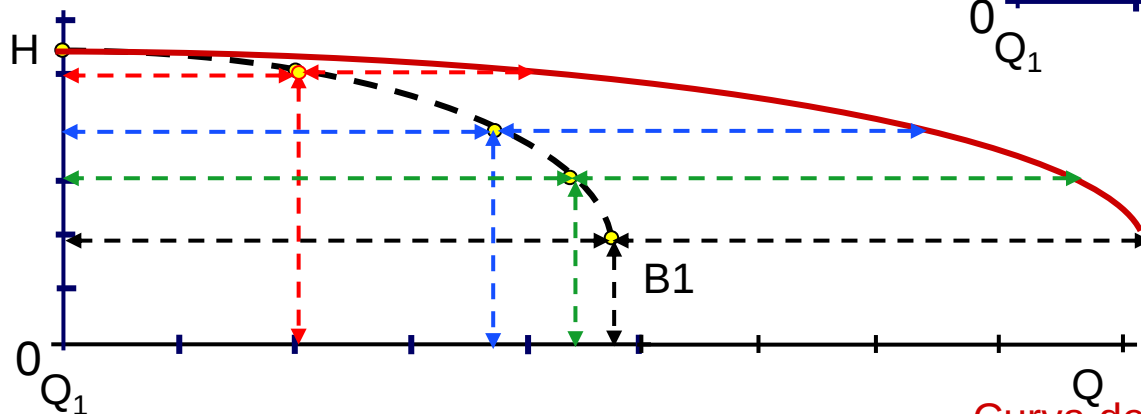
Regulagem por associação de bombas



Várias bombas sendo associadas em paralelo a partir de sua entrada ou saída de operação.



Para a mesma carga, somam-se as vazões de cada uma das bombas ou dos rotores associados.



Curva de carga da associação em paralelo das bombas ou rotores B1

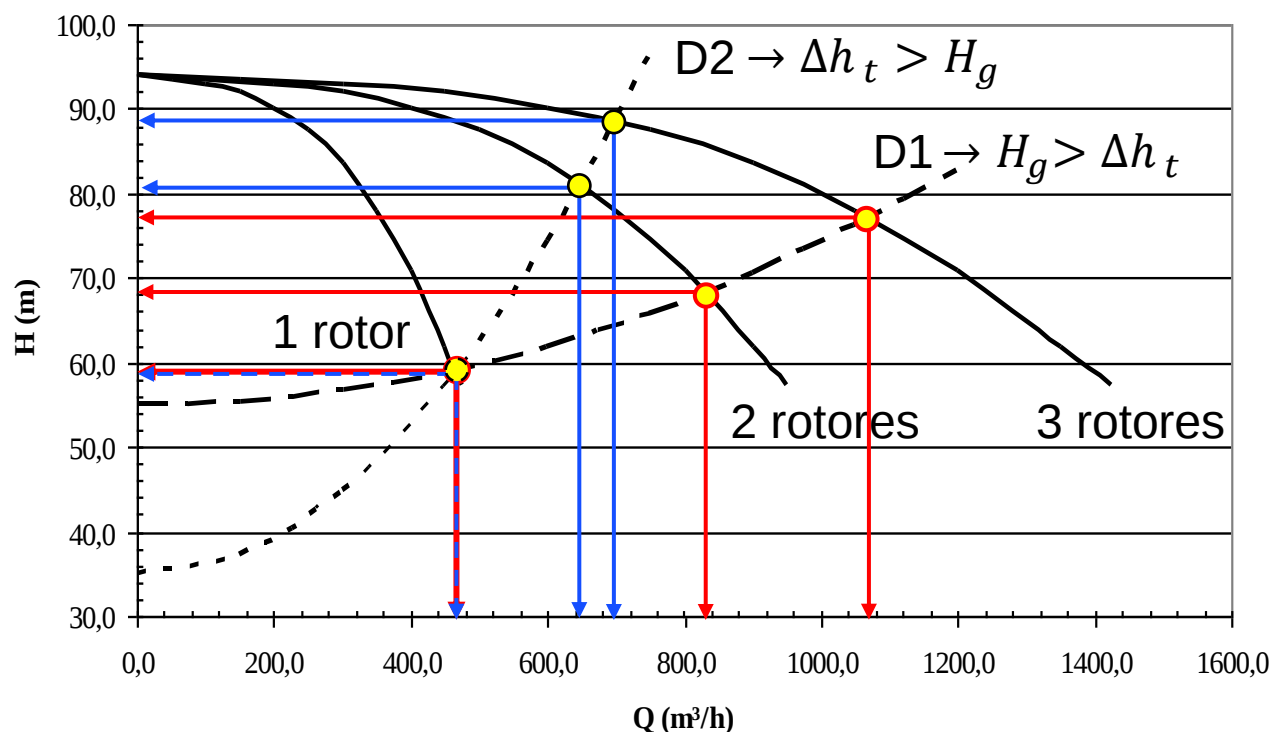
Regulagem por associação de bombas



Várias bombas sendo associadas em paralelo a partir de sua entrada ou saída de operação.

KSB Etanorm 100-200

D1 e D2: curvas de dissipação.



Curvas de dissipação

- definem os pontos de funcionamento
- definem o acréscimo de carga ou de vazão nas associações

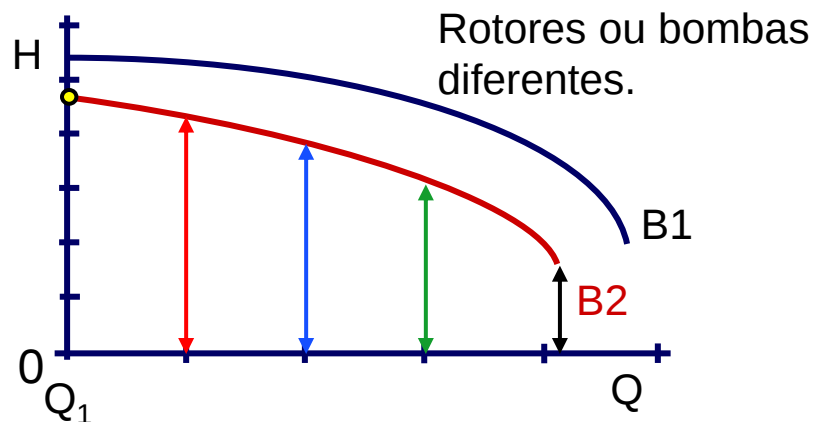
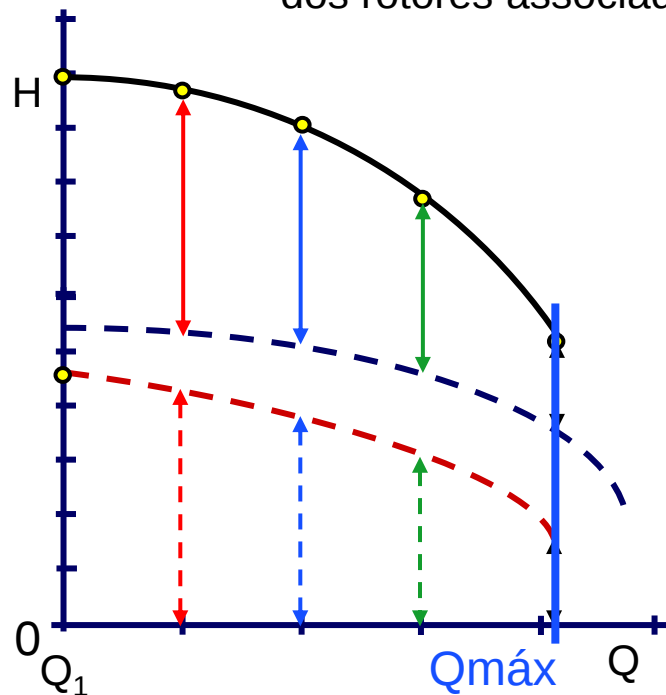
Comparar os acréscimos de carga e de vazão impostos pelas curvas de dissipação D1 e D2.

Regulagem por associação de bombas

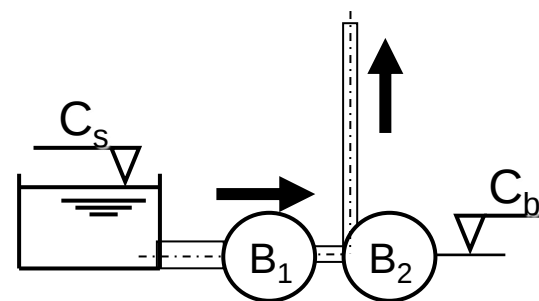


Várias bombas sendo associadas em série a partir de sua entrada ou saída de operação.

Para a mesma vazão, somam-se as cargas de cada uma das bombas ou dos rotores associados.



Curva de carga da associação em série das bombas ou rotores B1 e B2.

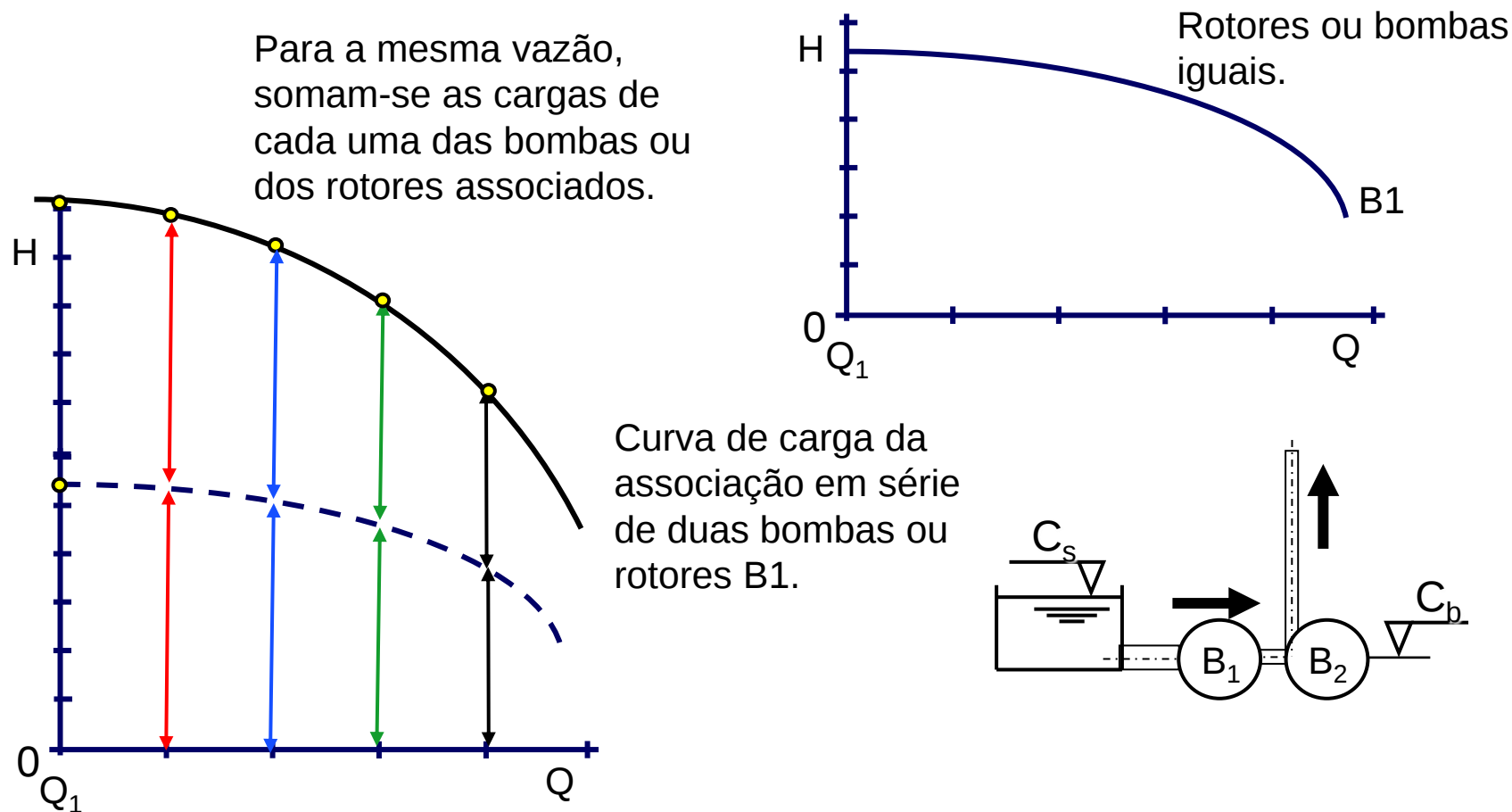


$Q_{máx}$: vazão máxima da associação, limitada pela bomba de menor vazão.

Regulagem por associação de bombas



Várias bombas sendo associadas em série a partir de sua entrada ou saída de operação.



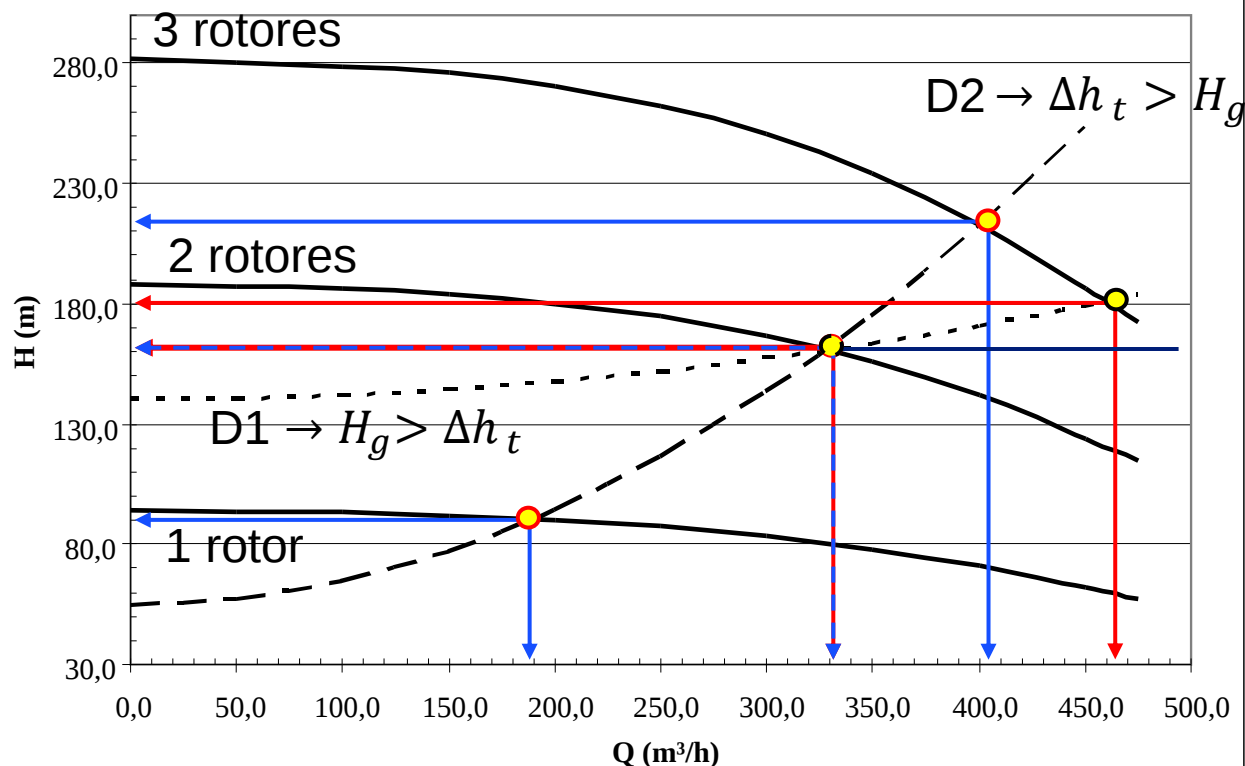
Regulagem por associação de bombas



Várias bombas sendo associadas em série a partir de sua entrada ou saída de operação.

KSB Etanorm 100-200

D1 e D2: curvas de dissipação.

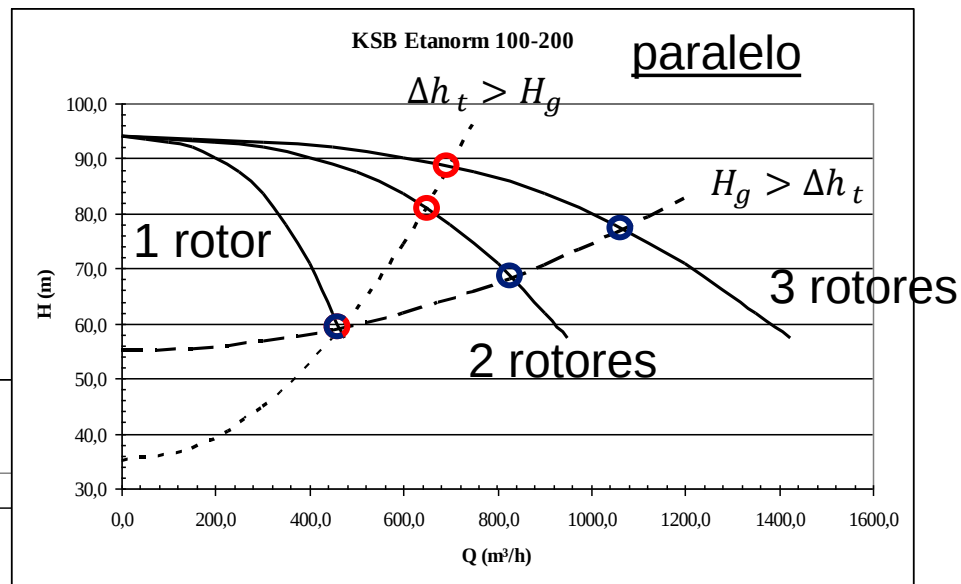
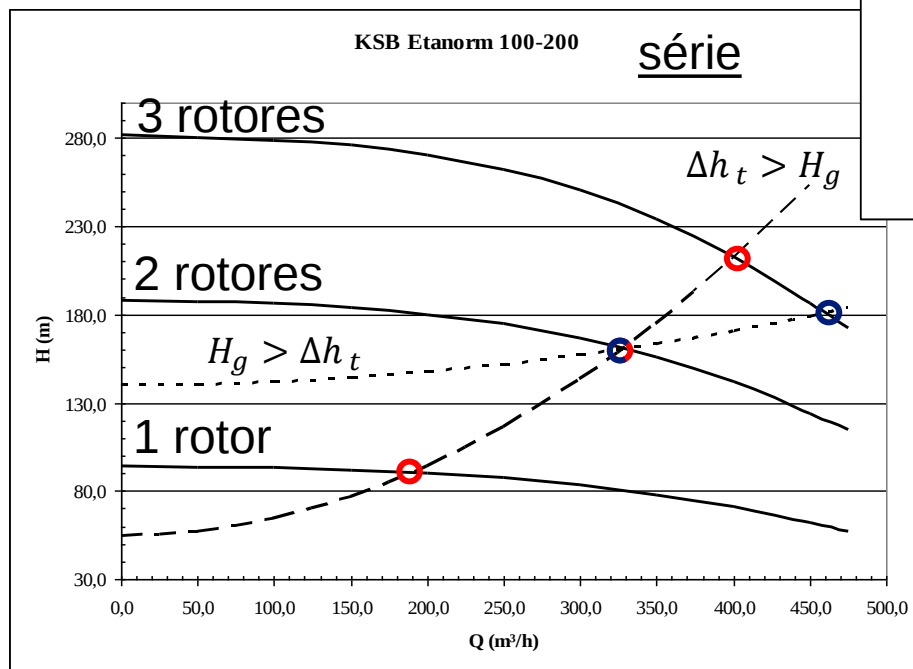


Curvas de dissipação

- definem os pontos de funcionamento
- definem o acréscimo de carga ou de vazão nas associações

Comparar os acréscimos de carga e de vazão impostos pelas curvas de dissipação D1 e D2.

Regulagem por associação de bombas

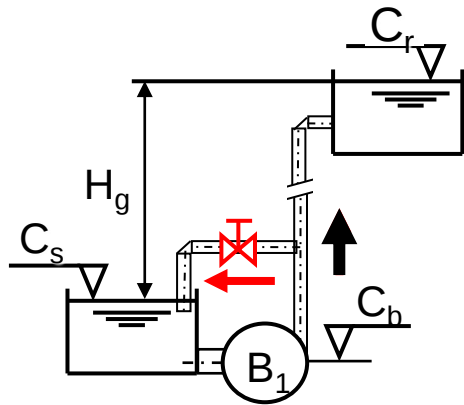


A variação mais significativa de carga ou de vazão não depende da forma de associação, senão das curvas de dissipação dos sistemas onde a associação está aplicada.

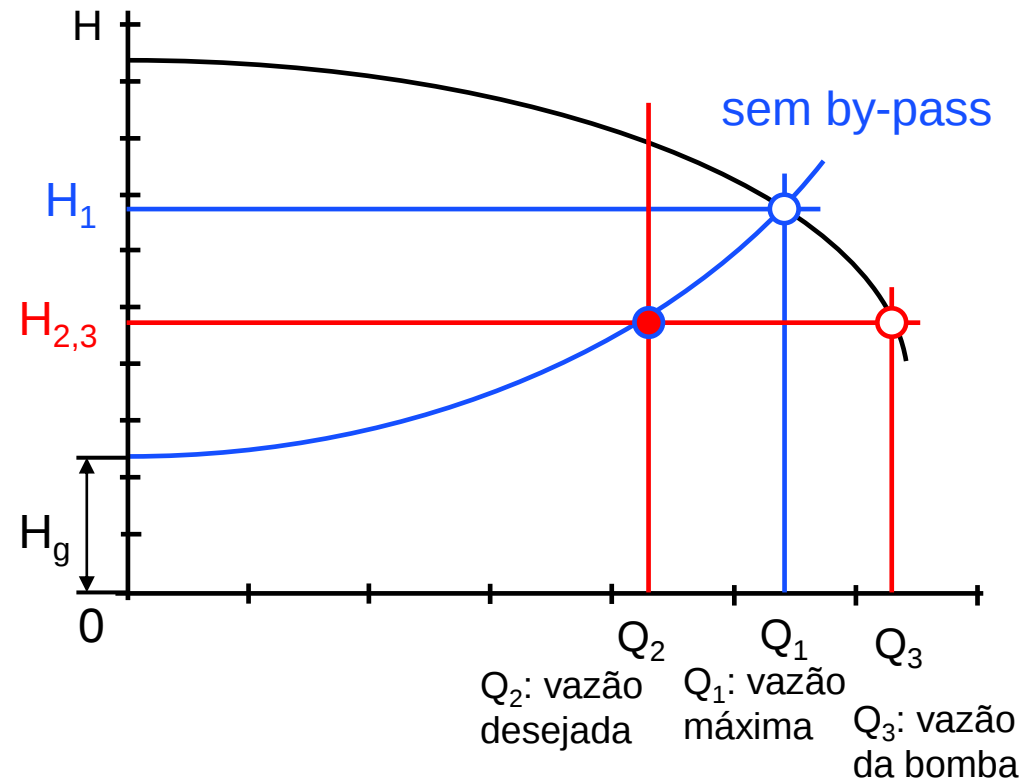
Regulagem por by-pass



Parte da vazão recalçada pela bomba retorna ao reservatório de sucção.
Permite apenas reduções de vazão.



A curva de dissipação do sistema mantém-se a mesma.

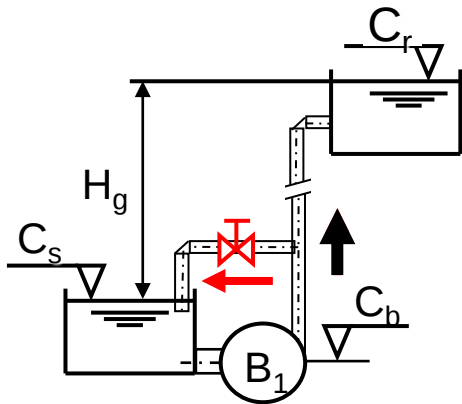


● A condição operacional do sistema para a vazão Q_2 é definida pela curva de dissipação.

Regulagem por by-pass



Parte da vazão recalçada pela bomba retorna ao reservatório de sucção.
Permite apenas reduções de vazão.

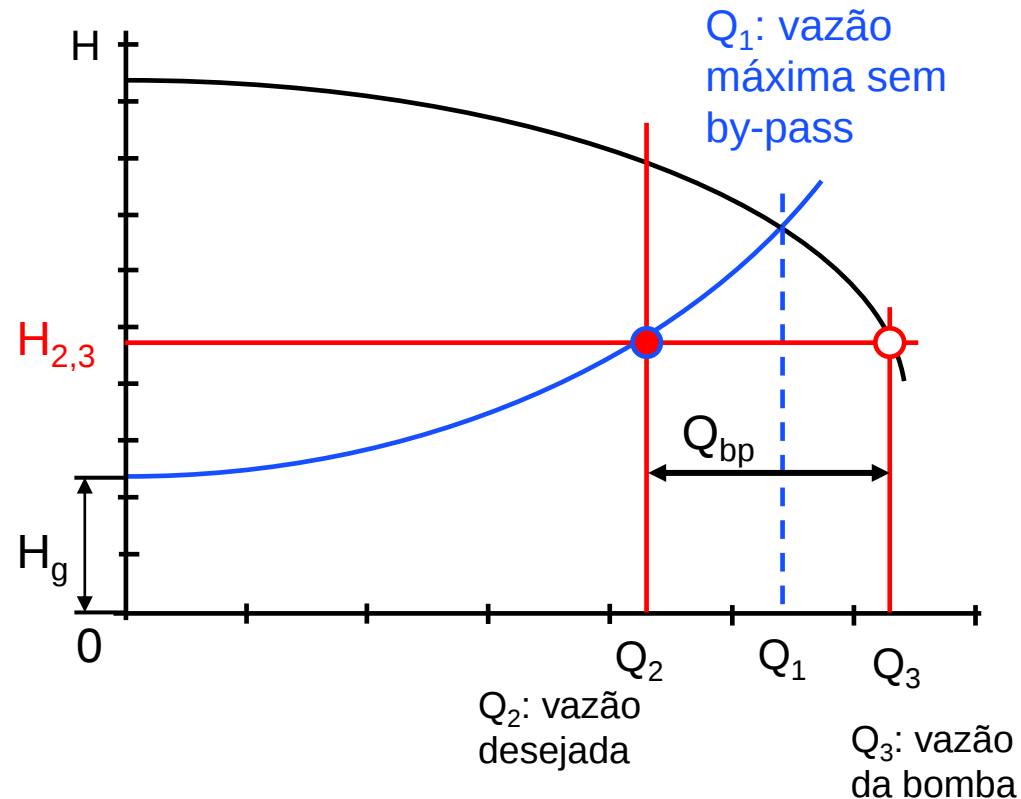


(Q_3, H_3) : ponto de funcionamento da bomba

Q_2 : vazão desejada para o reservatório de recalque

Q_{bp} : vazão no by-pass

$$Q_{bp} = (Q_3 - Q_2)$$

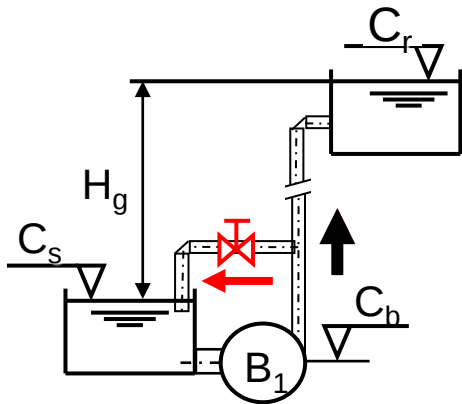


● A condição operacional do sistema para a vazão Q_2 é definida pela curva de dissipação.

Regulagem por by-pass

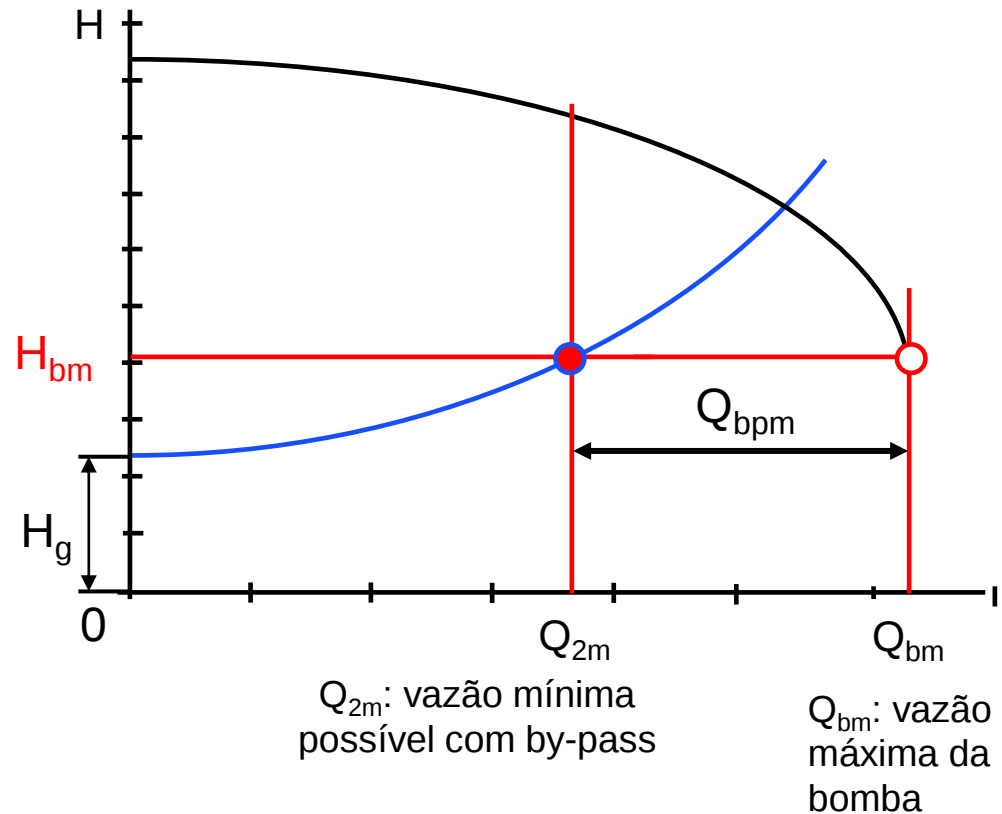


Parte da vazão recalçada pela bomba retorna ao reservatório de sucção.
Permite apenas reduções de vazão.



Q_{bpm} : vazão máxima no by-pass

H_{bm} : carga mínima da bomba



● A condição operacional do sistema para a vazão Q_{2m} é definida pela curva de dissipação.

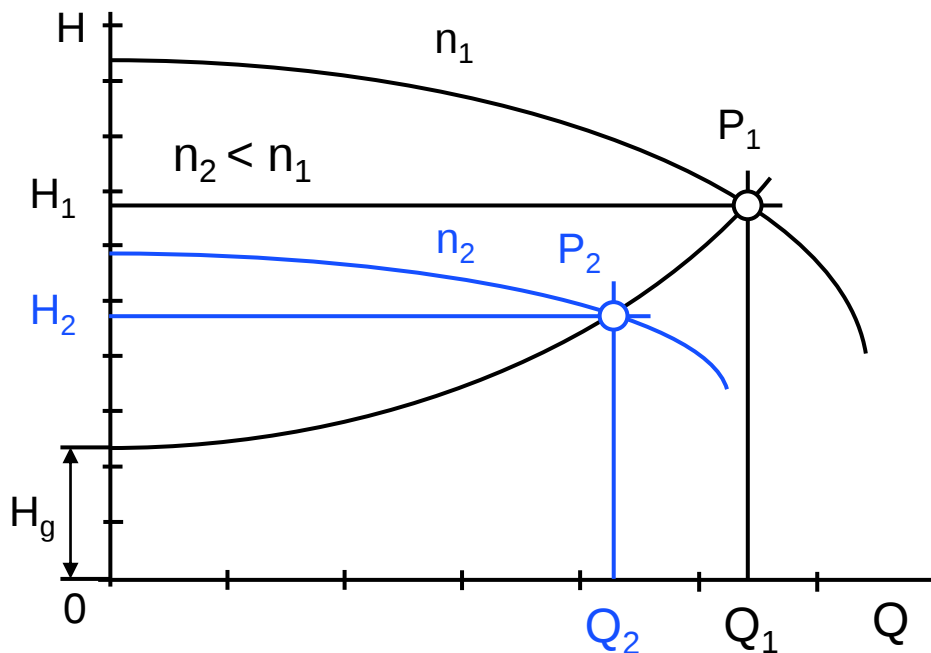
Regulagem por variação de rotação



A variação de rotação do rotor provoca a alteração da carga, da vazão, do NPSH e da potência da bomba.

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad ; \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad ; \quad \frac{P_{u1}}{P_{u2}} = \frac{n_1^3}{n_2^3} \quad ; \quad \frac{NPSH_{3\%1}}{NPSH_{3\%2}} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$$

em pontos
análogos de
operação



P_1 : ponto de funcionamento da bomba à rotação n_1 .

P_2 : ponto de funcionamento da bomba à rotação n_2 .

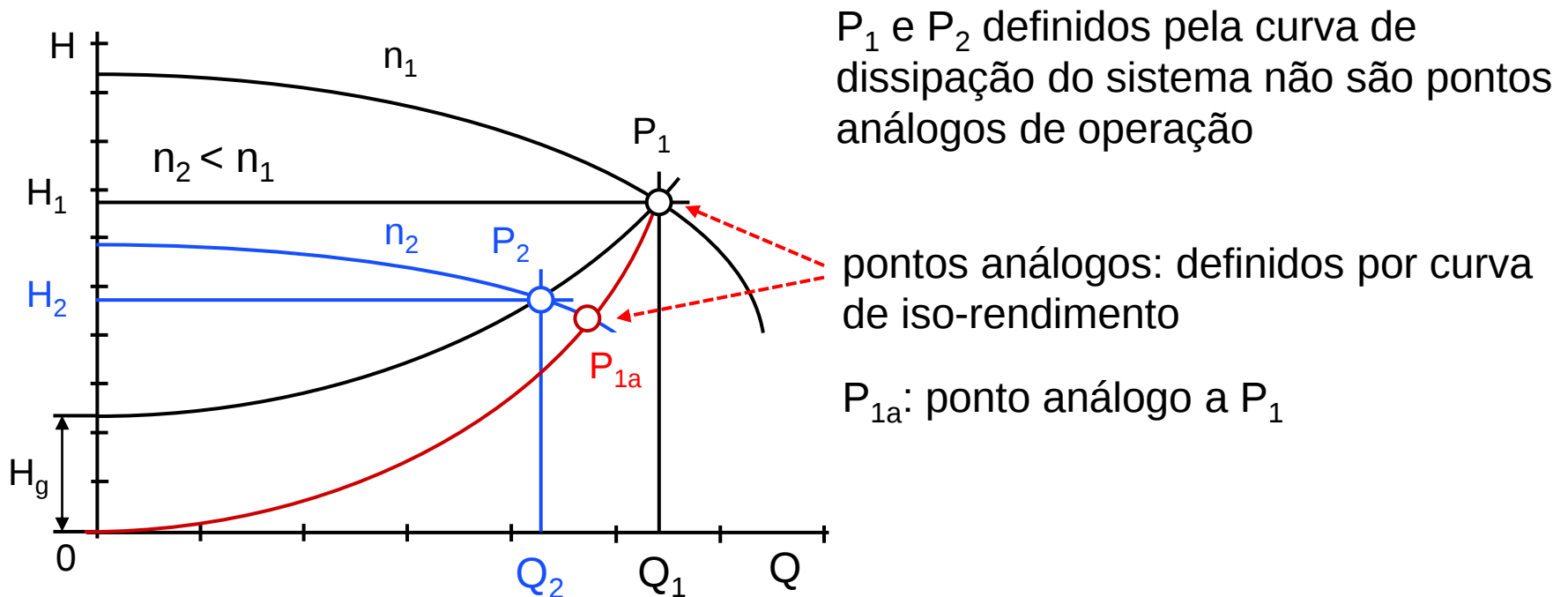
Regulagem por variação de rotação



A variação de rotação do rotor provoca a alteração da carga, da vazão, do NPSH e da potência da bomba.

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} ; \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} ; \quad \frac{P_{u1}}{P_{u2}} = \frac{n_1^3}{n_2^3} ; \quad \frac{NPSH_{3\%1}}{NPSH_{3\%2}} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$$

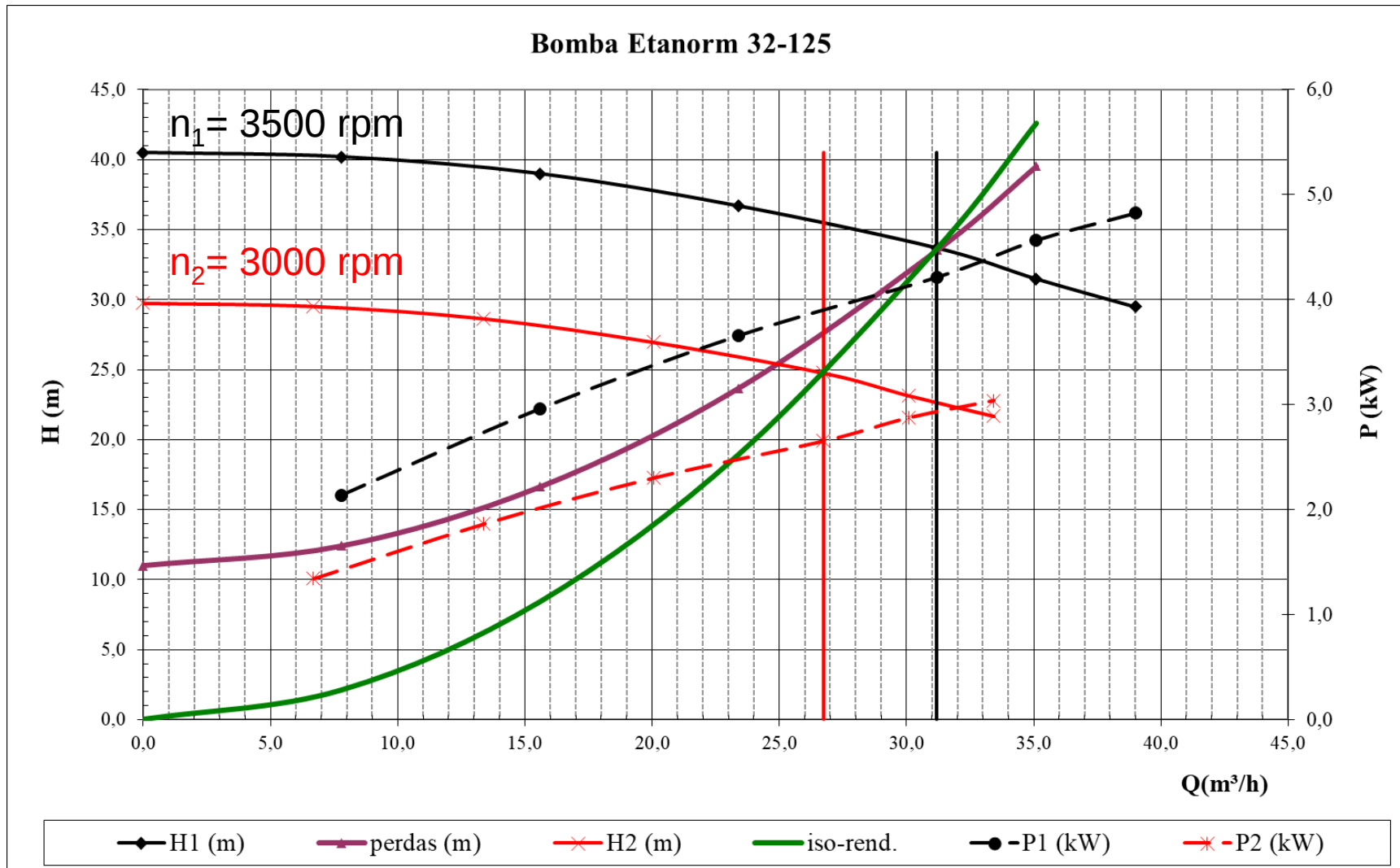
em pontos
análogos de
operação



Regulagem por variação de rotação



Bomba Etanorm 32-125



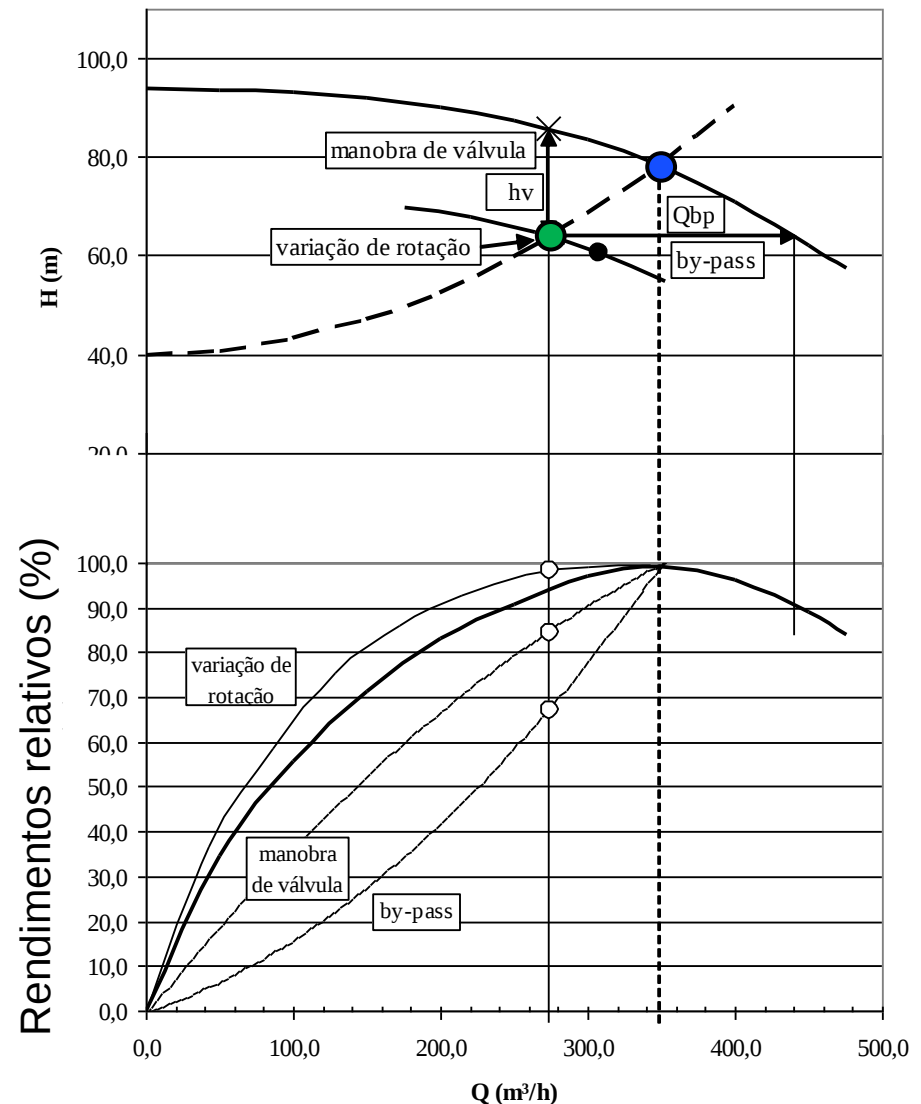
Comparação entre regulagens



By-pass: parte do fluido recalcado retorna ao reservatório de sucção $\Rightarrow$ perdas volumétricas.

Válvula: manobra altera o ponto de funcionamento e o rendimento da bomba.

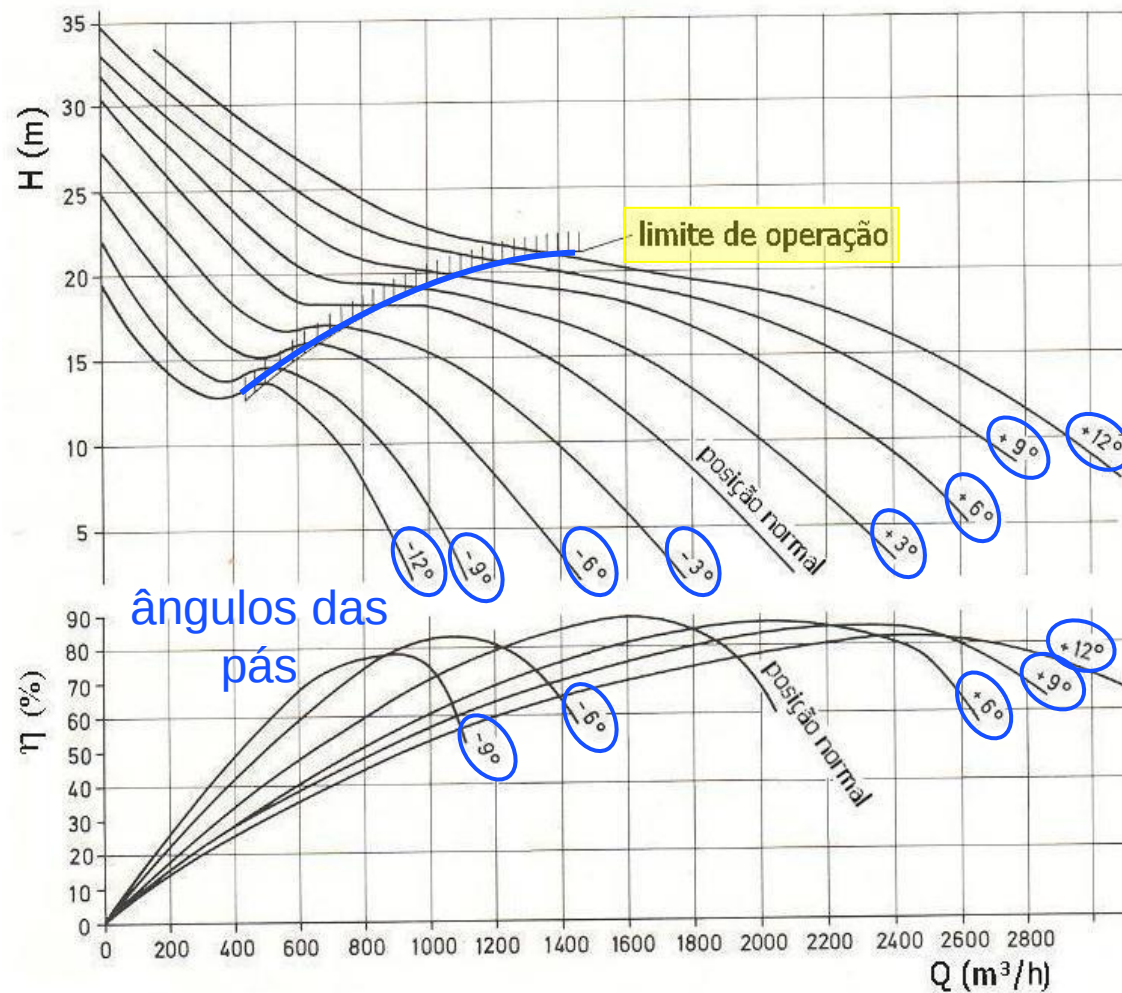
rotação: altera a curva característica da bomba $\Rightarrow$ pequena variação de rendimento



Regulagem por manobra de pás do rotor



Restrita a bombas axiais de grande porte.





Adequação das curvas da bomba à operação

Por usinagem do diâmetro externo

Altera a geometria da seção de saída do rotor e suas condições operacionais.

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad ; \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1^3}{D_2^3} \quad ; \quad \frac{P_{u_1}}{P_{u_2}} = \frac{D_1^5}{D_2^5} \quad \text{em pontos análogos de operação}$$

A redução do diâmetro externo quebra a condição de semelhança geométrica entre o rotor original e o usinado.

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{D_1^n}{D_2^n} \quad ; \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1^n}{D_2^n} \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} n=2 \Rightarrow \Delta D \geq 6\% \\ n=3 \Rightarrow \Delta D \leq 1\% \end{array} \right\} \quad \text{Sulzer, 1986}$$

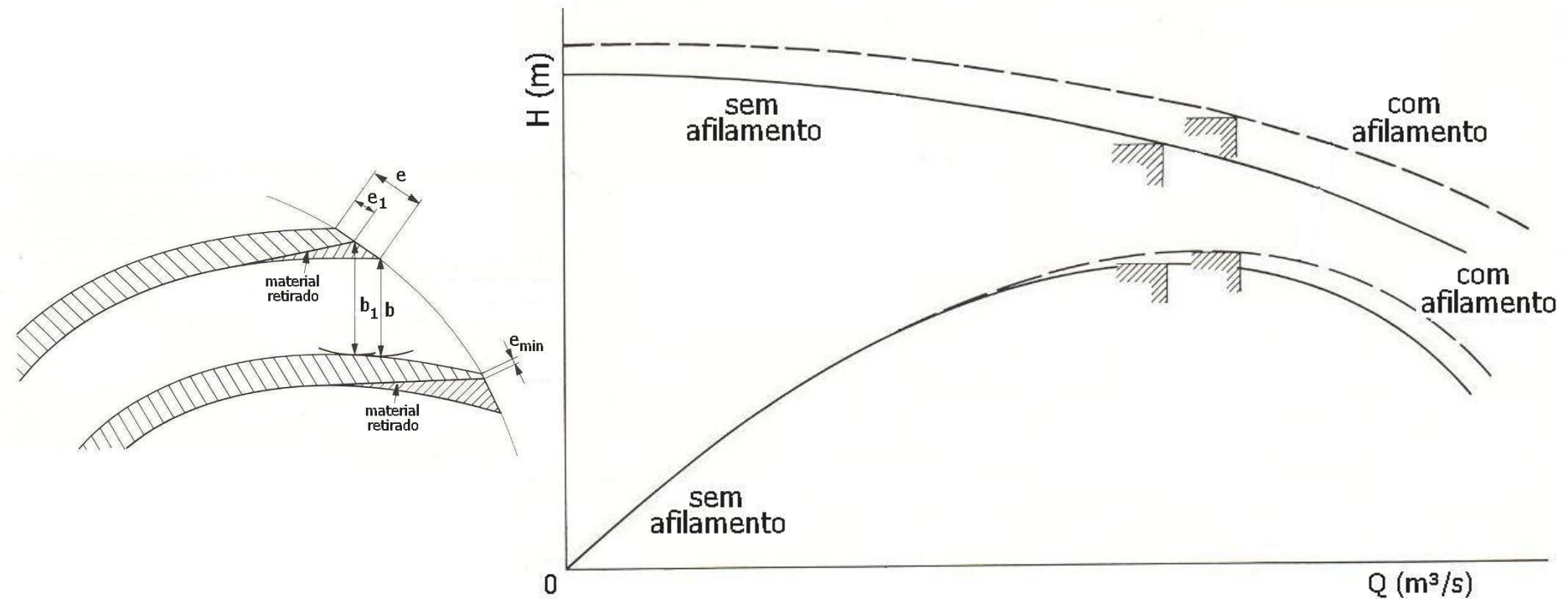
A alternativa ao uso de equações para a determinação da curva é o ensaio da máquina.



Adequação das curvas da bomba à operação

Por afilamento da saída das pás

O procedimento eleva a carga e o rendimento da máquina.



O procedimento altera o projeto original do fabricante da bomba e a garantia dada pelo fabricante é perdida.

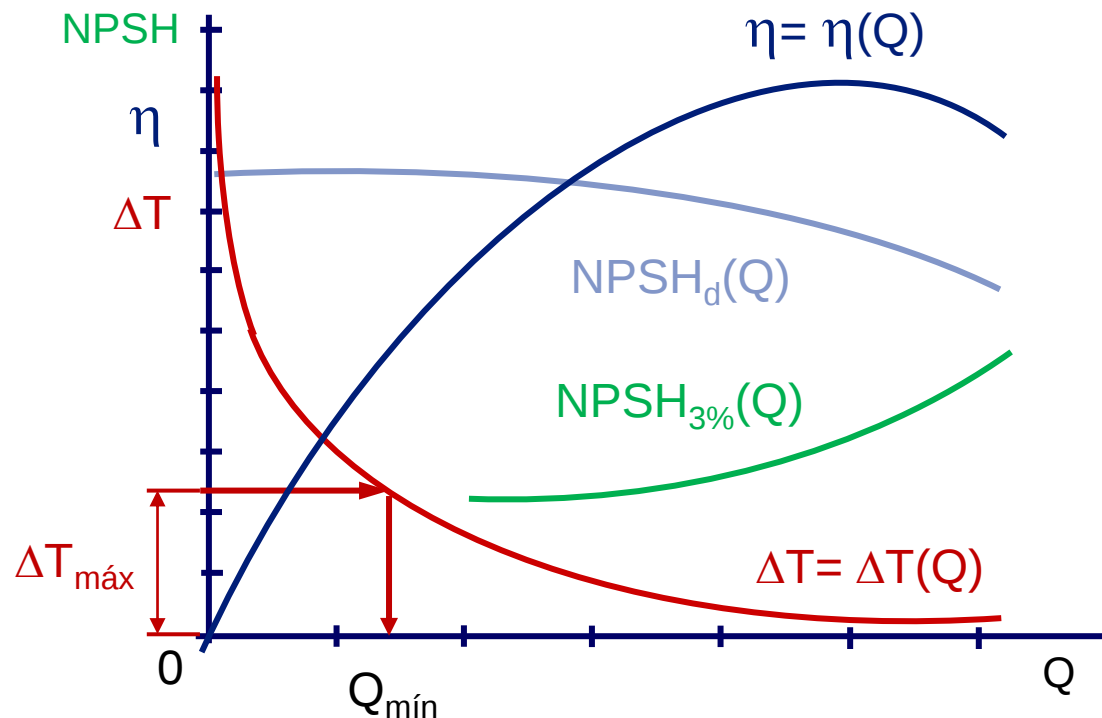


Condições limite de operação

Vazão mínima: elevação de temperatura

Carga parcial $\Rightarrow$ vibrações e pulsações de pressão inconvenientes para a operação adequada da bomba.

Carga parcial: menor vazão $\Rightarrow$ menor rendimento $\Rightarrow$ elevação de temperatura $\Rightarrow$ maior pressão de vapor do líquido



$$\Delta T_{\max} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (Sulzer)}$$

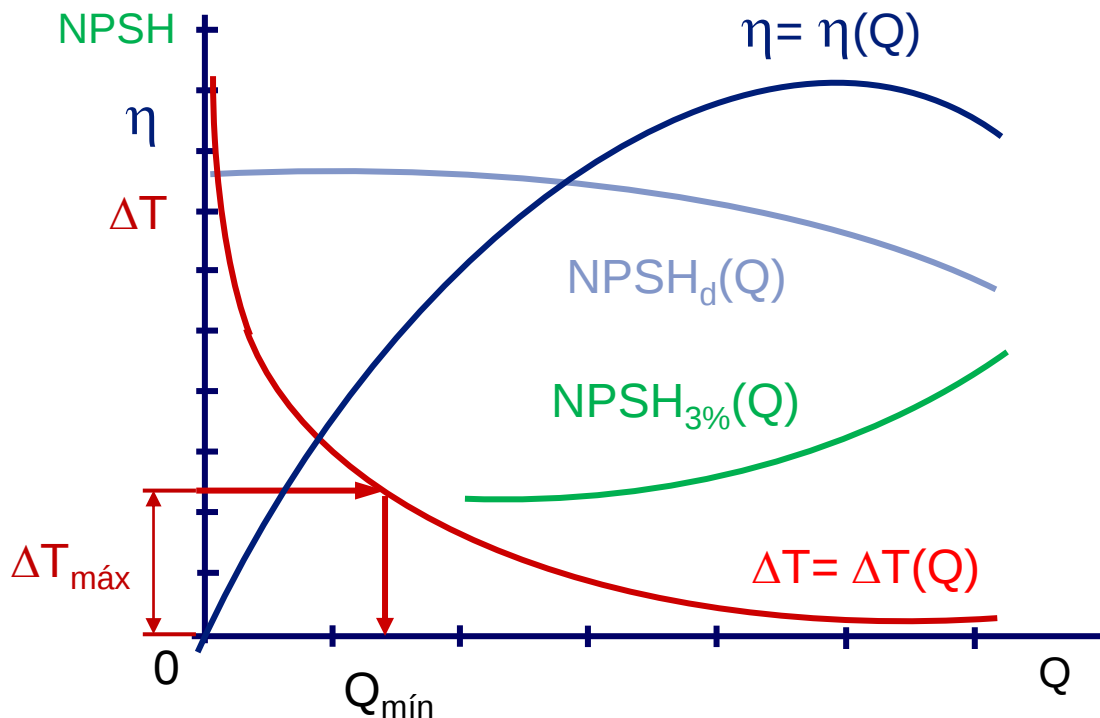


Condições limite de operação

Vazão mínima: elevação de temperatura

Carga parcial $\Rightarrow$ vibrações e pulsações de pressão inconvenientes para a operação adequada da bomba.

Carga parcial: menor vazão $\Rightarrow$ menor rendimento $\Rightarrow$ elevação de temperatura $\Rightarrow$ maior pressão de vapor do líquido



$$\Delta T_B = \frac{9,81 \times 10^{-3}}{c} H \left(\frac{2}{\eta} - 1 \right)$$

ΔT_B = variação de temperatura do fluido no interior da bomba

c = calor específico do fluido

H = carga no ponto em análise

Para bombas de até 100 kW

$$Q_{mín} = \frac{P_u}{\rho c \Delta T}$$

$$\Delta T_{máx} = 20 \text{ } ^\circ\text{C (Sulzer)}$$

Condições limite de operação

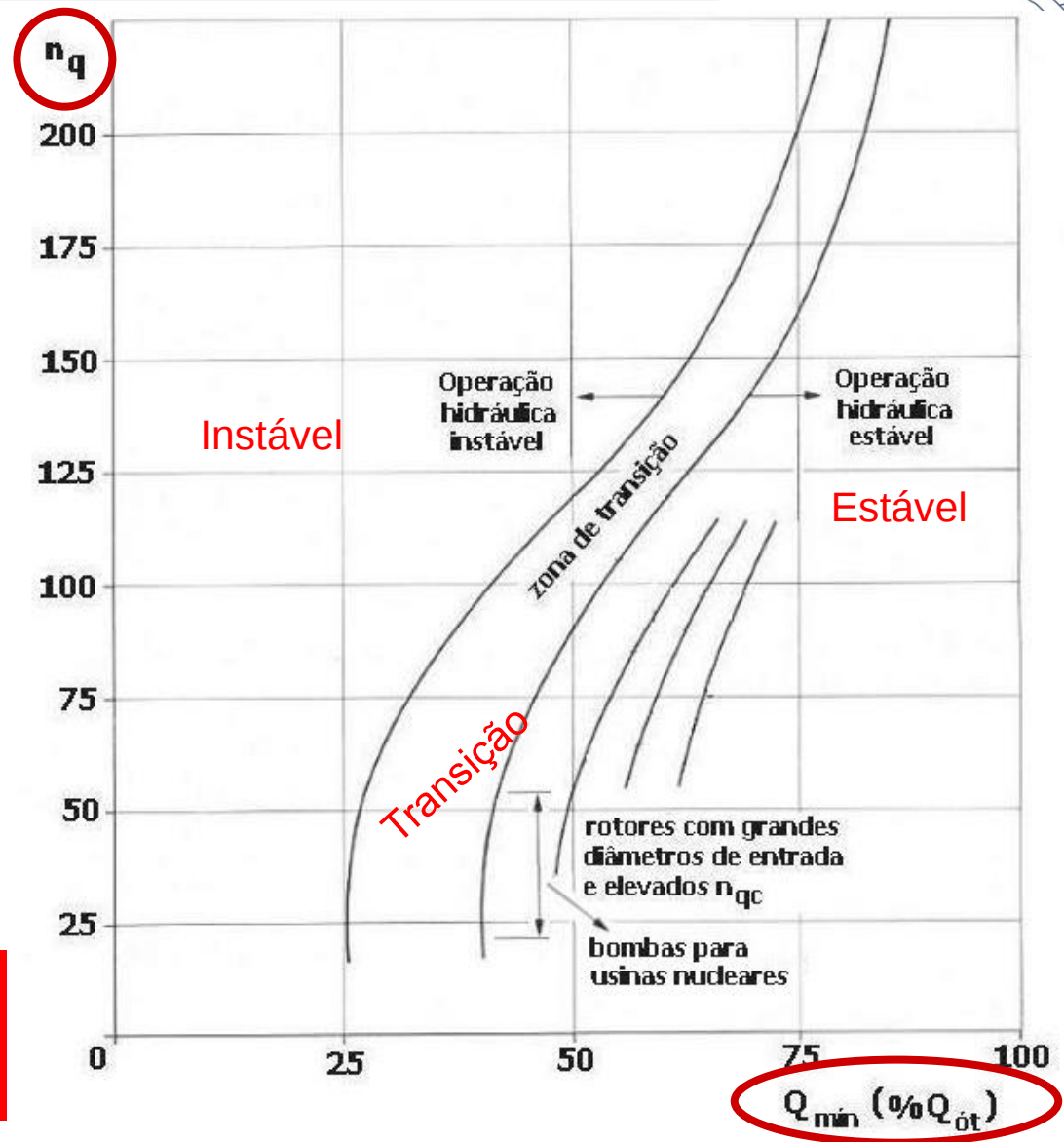


Vazão mínima: comportamento hidráulico inconveniente

Carga parcial $\Rightarrow$ vibrações e pulsações de pressão inconvenientes para a operação adequada da bomba.

Além dos efeitos de temperatura deve-se analisar ainda as consequências hidráulicas da operação de máquinas de grande porte sob carga parcial.

Zona de transição: comportamento da bomba pode ser estável ou instável.



Condições limite de operação

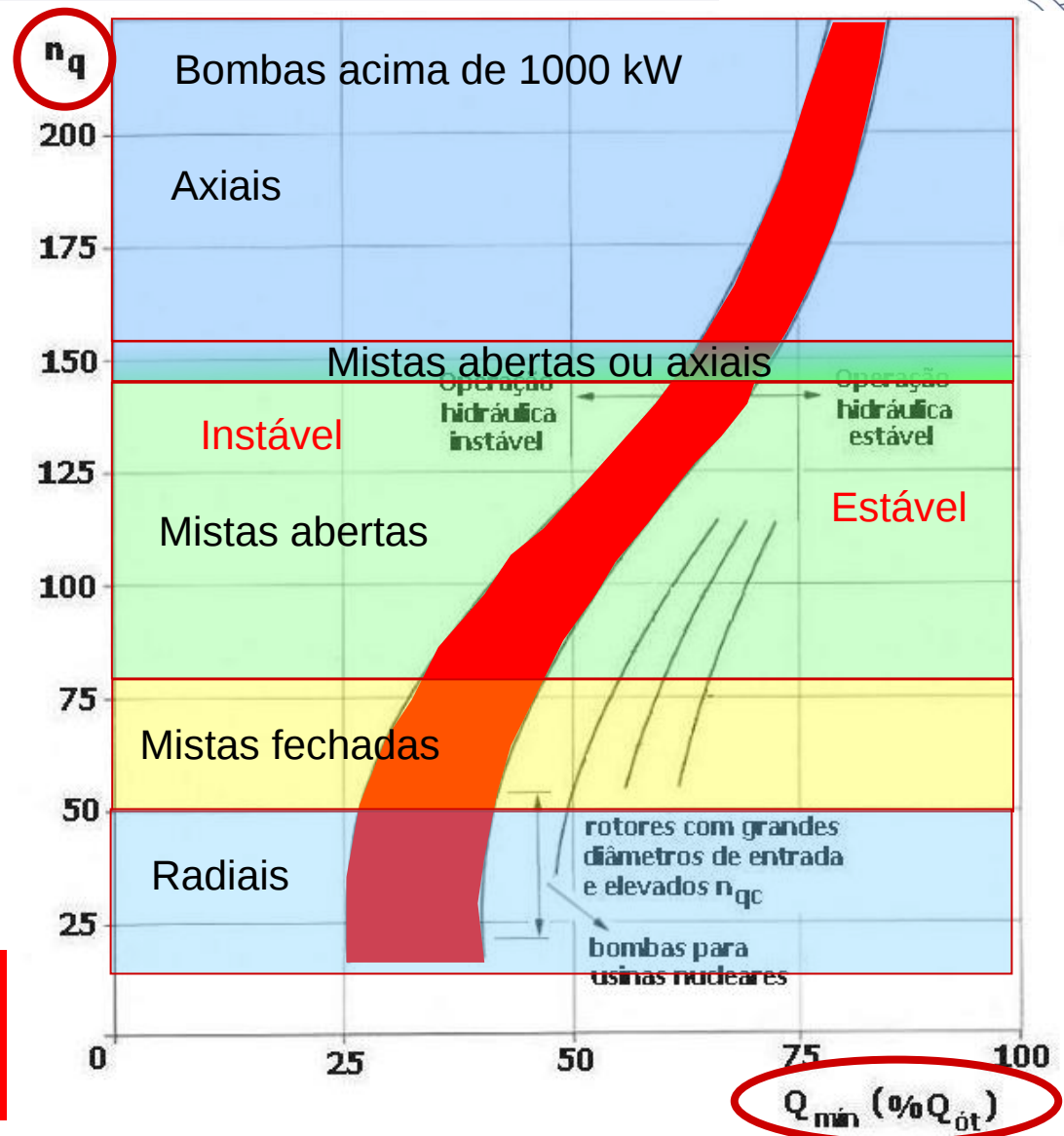


Vazão mínima: comportamento hidráulico inconveniente

Carga parcial $\Rightarrow$ vibrações e pulsações de pressão inconvenientes para a operação adequada da bomba.

Além dos efeitos de temperatura deve-se analisar ainda as consequências hidráulicas da operação de máquinas de grande porte sob carga parcial.

Zona de transição: comportamento da bomba pode ser estável ou instável.



Condições limite de operação



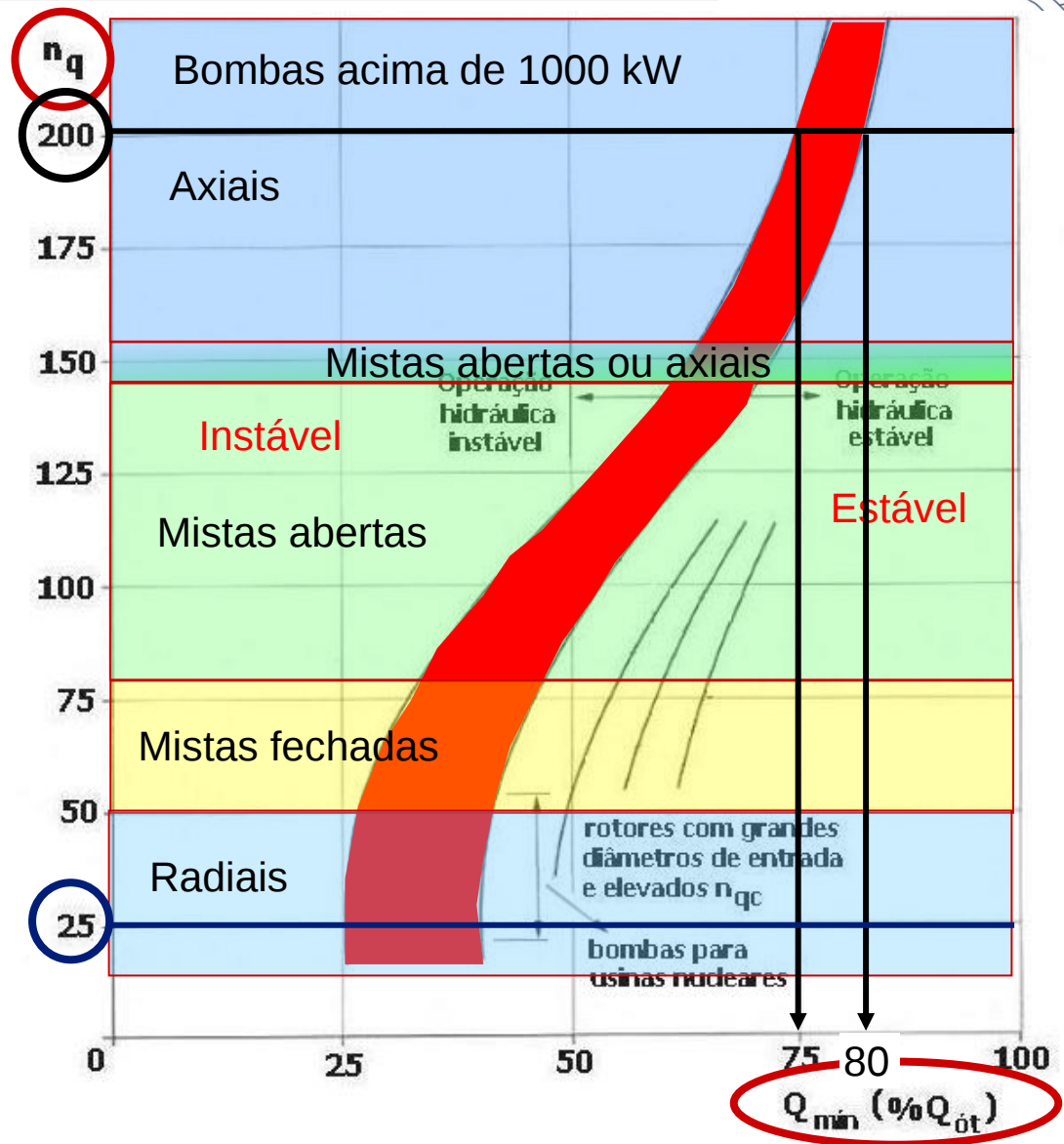
Vazão mínima: comportamento hidráulico inconveniente

Bombas acima de 1000 kW

Operação estável

Radiais, $n_q=25$: $> 0,4 Q_{ot}$

Axiais, $n_q=200$: $> 0,8 Q_{ot}$

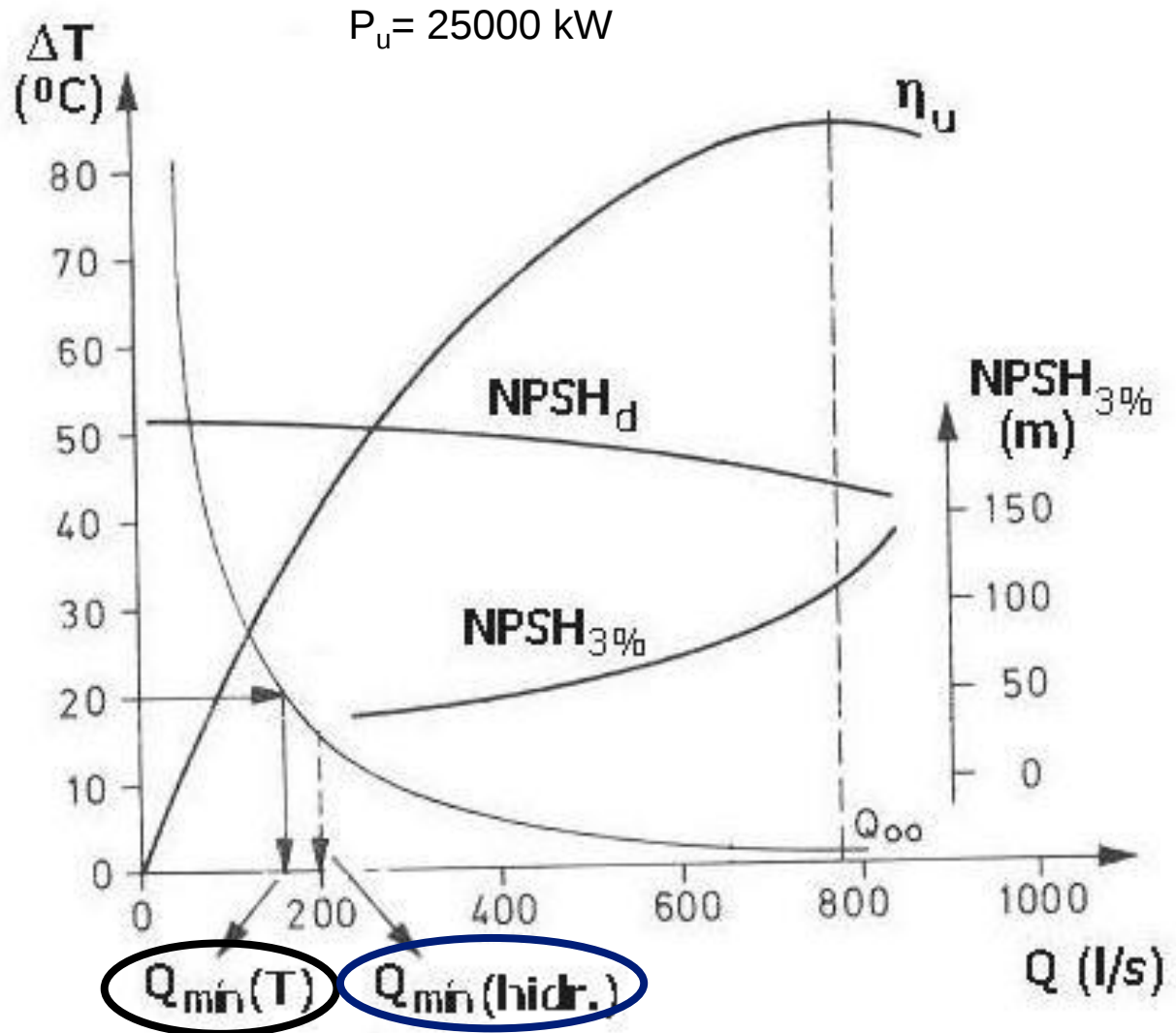


Condições limite de operação



Vazão mínima:
comparação entre critérios

Condição limitante:
comportamento hidráulico



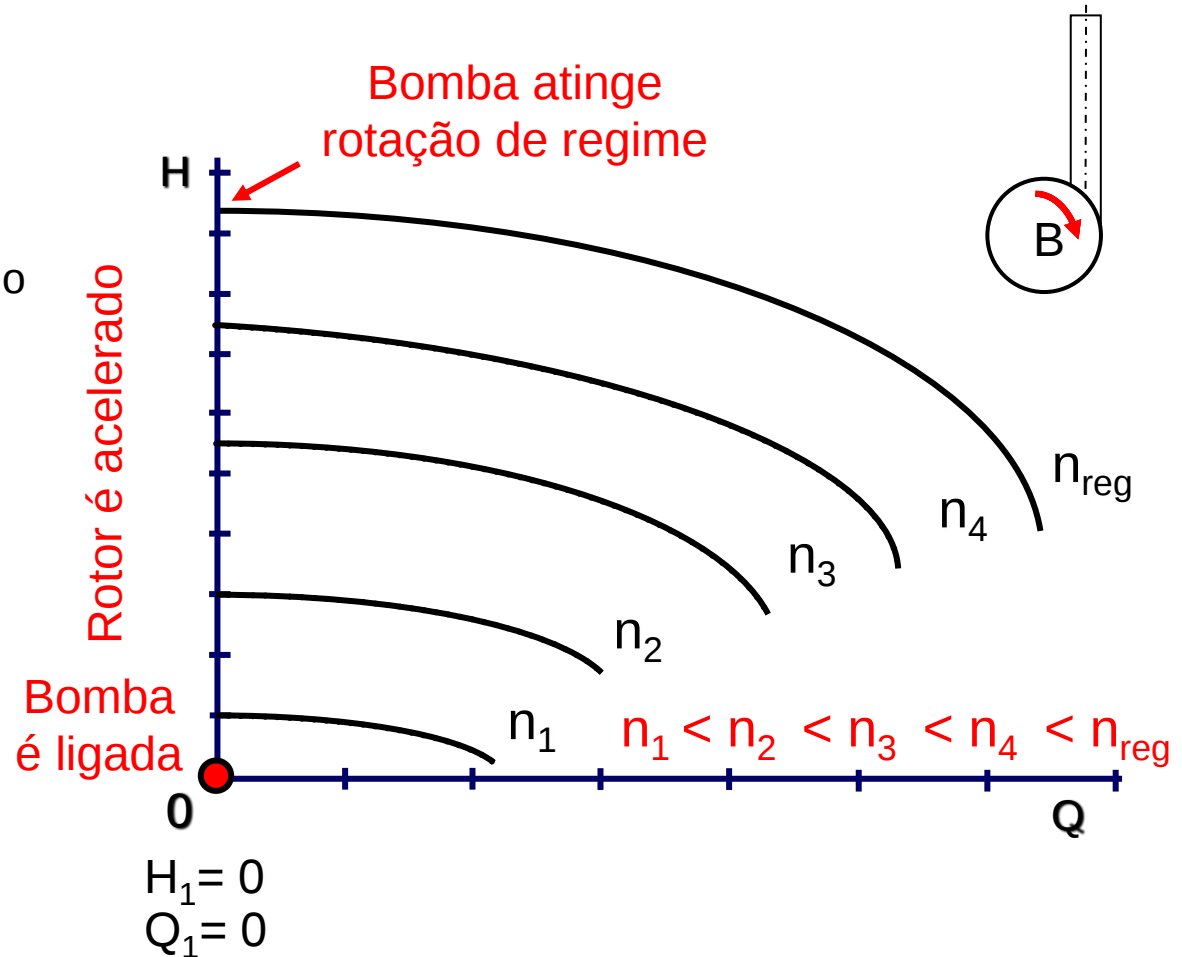
Partida e parada de bombas hidráulicas de fluxo



Partida da bomba em vazio, sem escoamento.

Partes girantes, incluindo o rotor hidráulico, são aceleradas pelo motor elétrico.

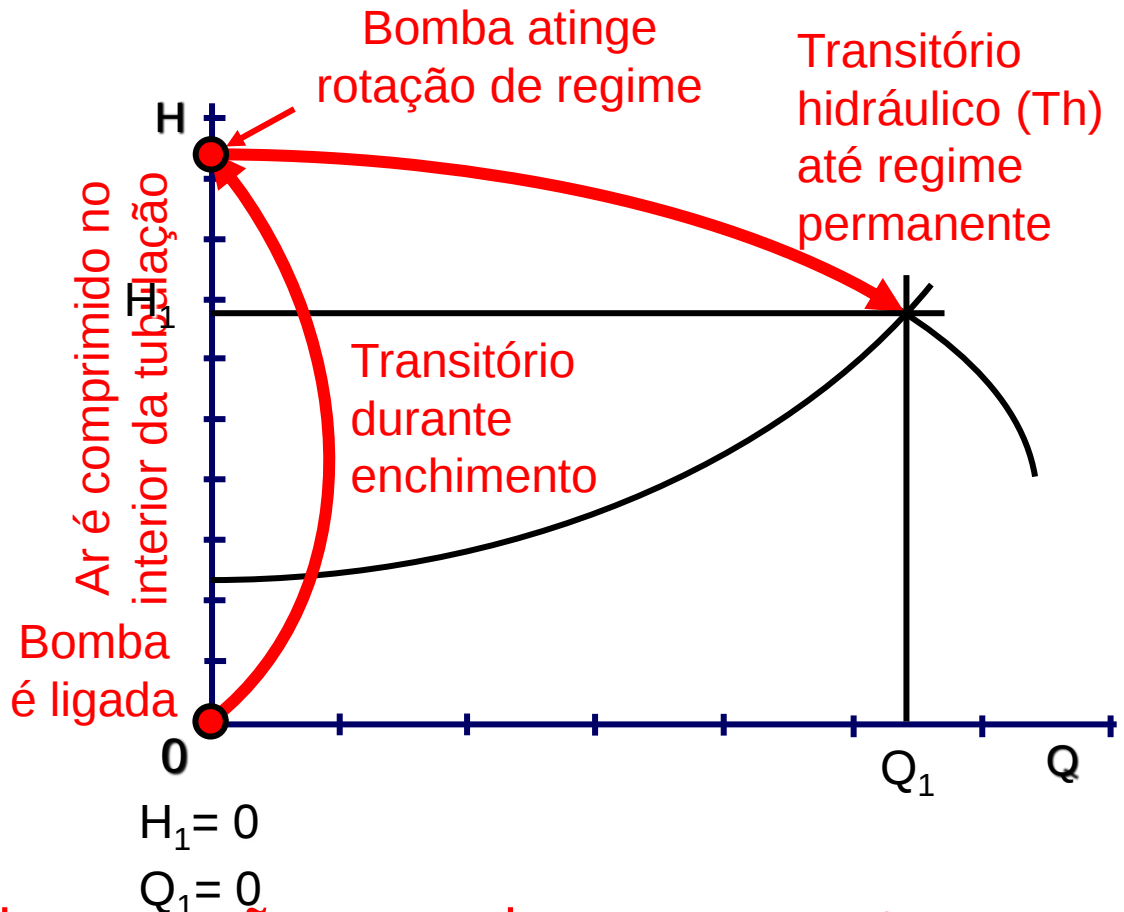
Transitório de partida do motor elétrico (Tel)
Entre $t = 0$ s e $t \approx 5$ s



Válvula aberta

Escoamento estabelecido em regime permanente

B



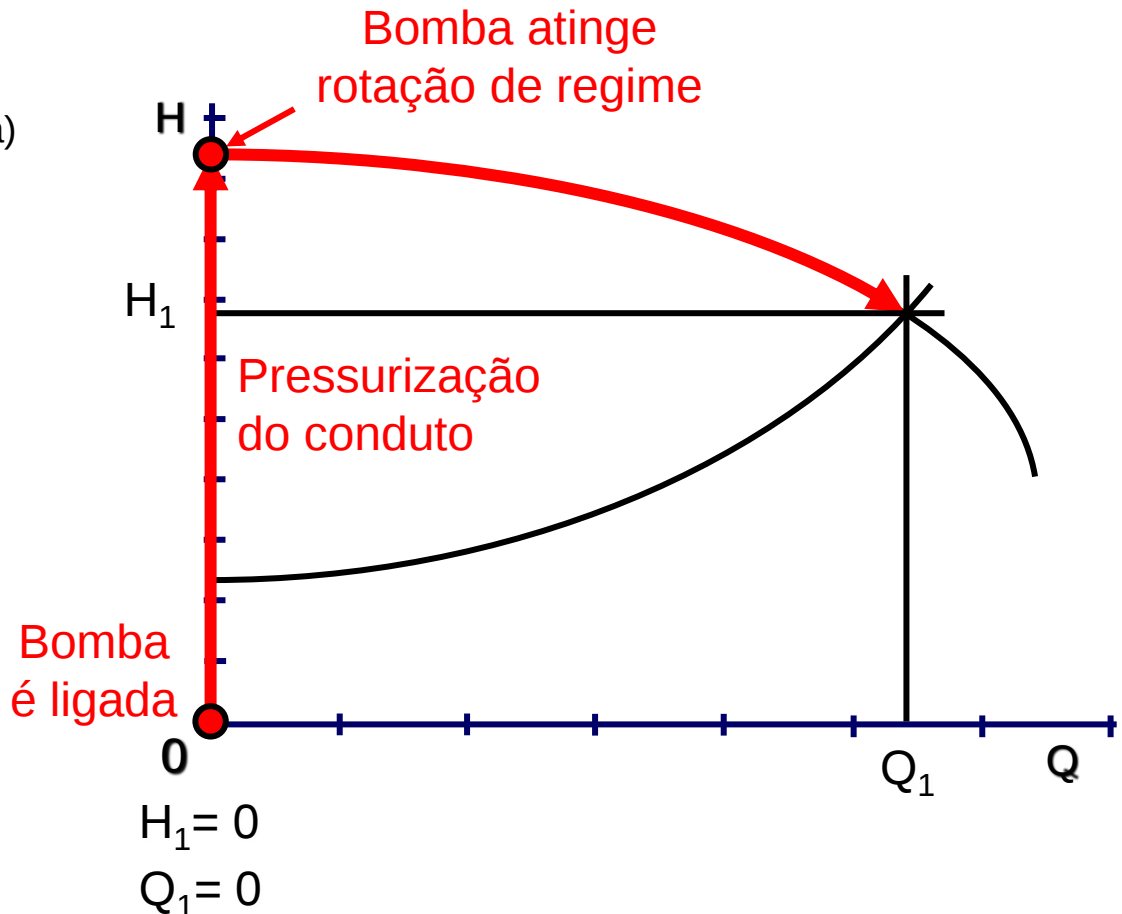
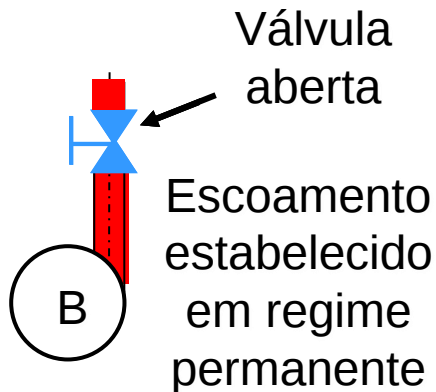
Condição final de operação em regime permanente

Transitório de partida do motor elétrico (Tel) $\neq$ Transitório hidráulico (Th) até regime permanente

Partida e parada de bombas hidráulicas de fluxo



Partida com válvula de controle de vazão fechada
(e tubulação até a bomba preenchida)

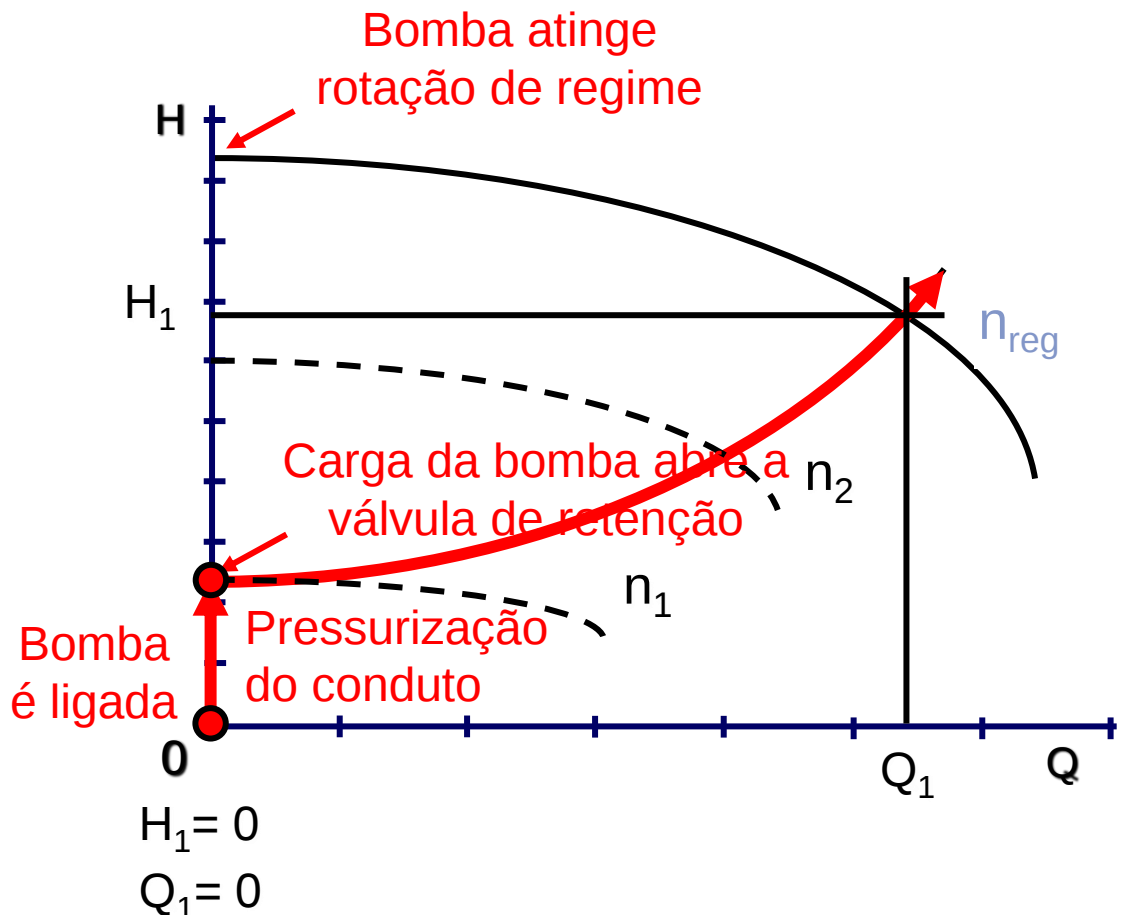
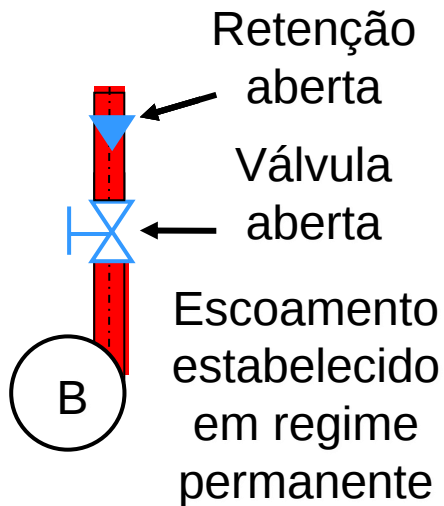


Condição final de operação em regime permanente

Partida e parada de bombas hidráulicas de fluxo



Partida com retenção
fechada e válvula de
controle aberta

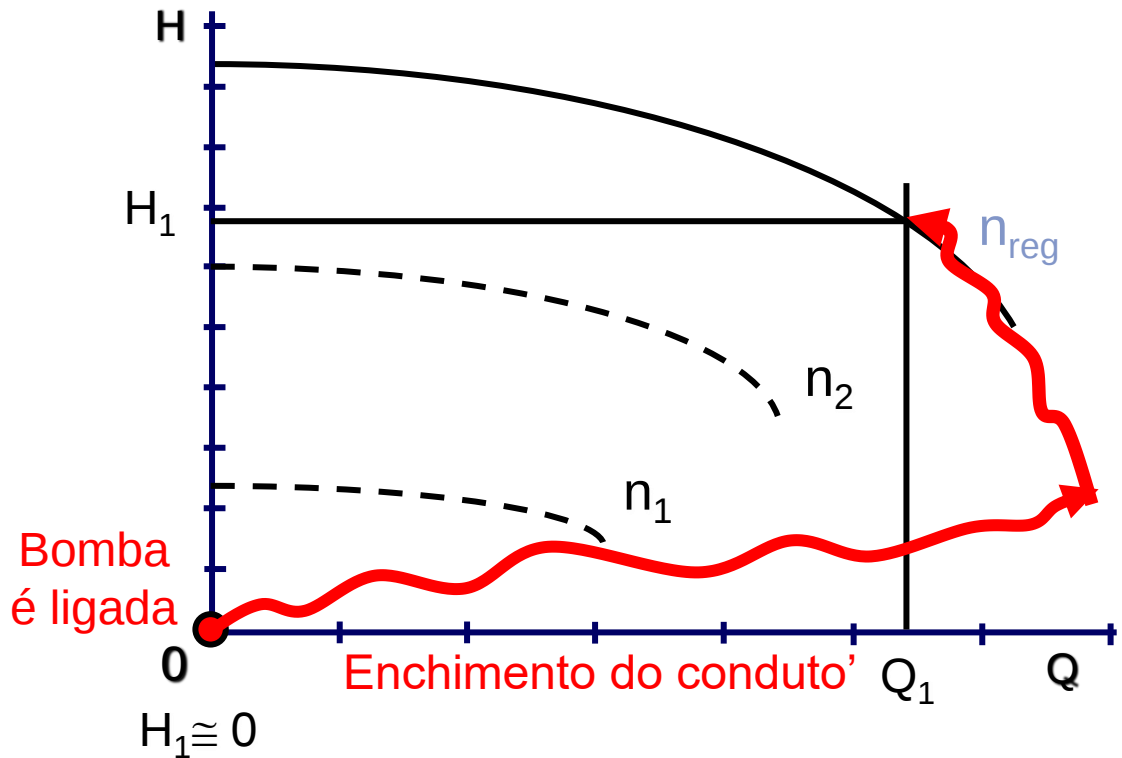
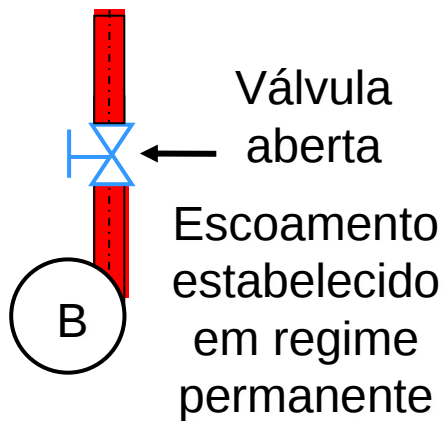


Condição final de operação em regime permanente

Partida e parada de bombas hidráulicas de fluxo



Partida com válvula de controle aberta e tubulação vazia



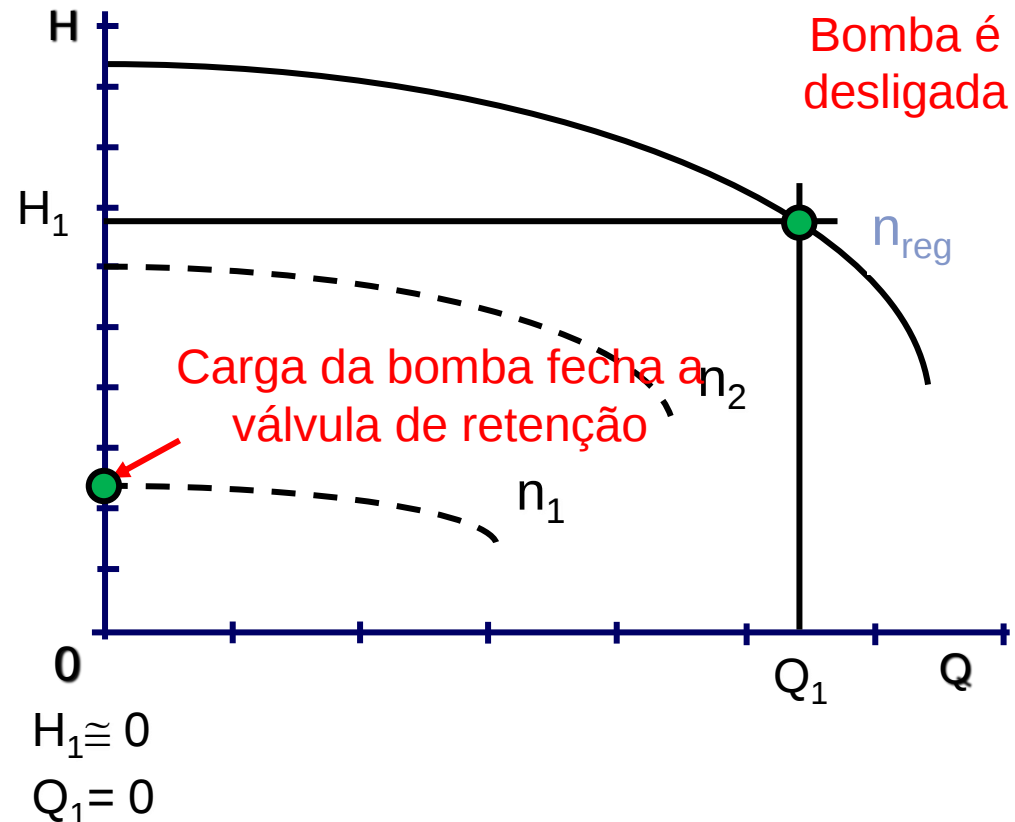
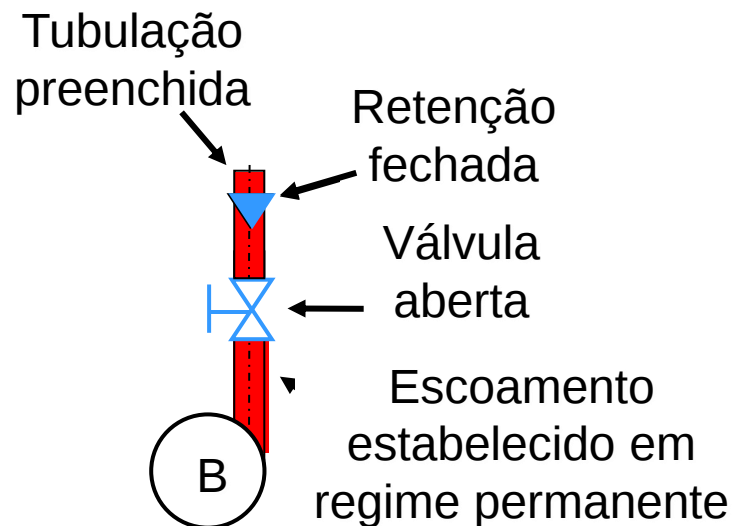
Condição final de operação em regime permanente

Partida desaconselhada por poder gerar esforços excessivos nas fixações e ancoragens do conduto e na própria bomba.

Partida e parada de bombas hidráulicas de fluxo



Parada de bomba com retenção instalada



Condição final com retenção fechada e bomba parada

Dúvidas?

Obrigado.



ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO