

EQUIPOS PARA PROCESOS

1º parcial

- 29/04/2023

Problema de compresores:

- Gas: etileno
- Caudal: 4000 kg/h
- Presión entrada: atmosférica
- Presión salida: 2,03 MPa (abs)
- Temperatura entrada: 25°C
- Temperatura máxima salida: 150°C
- Relación de compresión de cada etapa se considera constante.
- Velocidad de accionamiento: 300 rpm
- Espacio muerto de cada cilindro: 7%
- Caída de presión en cada enfriador: 50 kPa
- Temperatura del agua de enfriamiento: 20°C
- Eficiencia isentrópica global: 88%
- Eficiencia mecánica de la transmisión: 90%

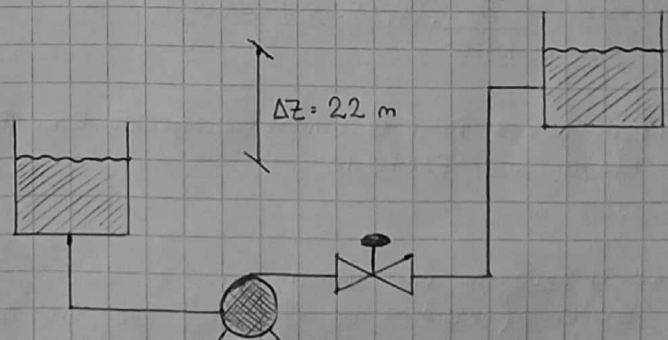
- Número de etapas conveniente para el proceso.
- Temperatura de descarga final de la compresión
- Potencia requerida en el eje
- Volumen de desplazamiento requerido para cada cilindro

Problema de bombas:

- Fluido: agua
- Caudal: 60 L/s
- Diferencia de altura entre tanques: 22 m
- Dos bombas posibles, trabajando individualmente: A, B, pertenecientes a la misma familia
- Diámetro del impulsor de la bomba B 67% mayor al de A.
- Potencia máxima de los motores de las bombas: 50 kW
- Válvula de control de comportamiento lineal.
- Pérdidas de carga en el sistema, incluyendo la válvula completamente abierta: 8 m ($h_v = 1\text{ m}$)

- Si se usa la bomba A con la válvula completamente abierta:
 - ¿sirve el motor?
 - ¿a qué rpm debe trabajar?
 - Consumo de potencia si se usa la bomba B trabajando a 1700 rpm.
Caída de presión extra que debe agregarse al sistema para lograr el caudal deseado.
 - La caída de presión calculada corresponde a la de la válvula? Porcentaje de apertura?
 - Con qué bomba conviene trabajar? Justificar
- Datos de la bomba A trabajando a 1700 rpm:

Q [L/s]	H [m]	η %
6	30	39
12	28,5	61
18	26	75,5
24	23	83
30	19,5	75
36	14,5	60
42	8,5	38



Problema compresores:

- $\dot{m} = 4000 \text{ kg/h} = 1,11 \text{ kg/s}$
- $P_0 = 101330 \text{ Pa}$ - $T_0 = 298 \text{ K}$
- $P_F = 2030000 \text{ Pa}$ - $T_{F \text{ max}} = 423 \text{ K}$
- etileno $\rightarrow k = 1,24$; $\tilde{M} = 28,05 \text{ g/mol}$
- $N = 300 \text{ rpm}$
- $V_m = 0,07$
- $\Delta P_{\text{enf}} = 50000 \text{ Pa}$
- $T_{\text{agua}} = 293 \text{ K}$
- $\eta_{\text{adG}} = 0,88$
- $\eta_{\text{mec}} = 0,9$
- $\Gamma_{pi} = \text{cte}$
- asumo $Z = 1$

* Relación de compresión global $\rightarrow \Gamma_G = \frac{P_F}{P_0} = \frac{2030000 \text{ Pa}}{101330 \text{ Pa}} \Rightarrow \Gamma_G = 20,03$

* Relación de compresión constante $\rightarrow \Gamma_{p1} = \Gamma_{p2} = \Gamma_{p3} = \Gamma_{pi}$

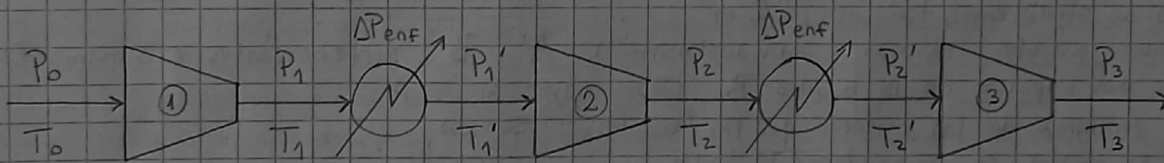
* Hay pérdida de carga entre etapas $\rightarrow \Gamma_{pi} \neq \Gamma_G^{1/i}$

* Relación de compresión máxima recomendada $\rightarrow \Gamma_p < 3,5$

\rightarrow 1 etapa $\rightarrow \Gamma_{pi} = \Gamma_G = 20,03 > 3,5 \Rightarrow$ necesito más etapas

\rightarrow Como estimación inicial, calculo la cantidad de etapas como $3,5 = \Gamma_G^{1/i}$ aunque la expresión no sea válida cuando hay pérdidas entre etapas. Luego chequeo.

$3,5 = 20,03^{1/i} \Rightarrow i = 2,39 \rightarrow$ estimación: 3 etapas



* $\Gamma_{p1} = \Gamma_{p2} \Rightarrow \frac{P_1}{P_0} = \frac{P_2}{P_1'} \Rightarrow \frac{P_1}{P_0} = \frac{P_2}{P_1 - \Delta P_{\text{enf}}} \quad \text{I} \rightsquigarrow$ datos: $P_0, \Delta P_{\text{enf}}$
 incógnitas: P_1, P_2

$\Gamma_{p1} = \Gamma_{p3} \Rightarrow \frac{P_1}{P_0} = \frac{P_3}{P_2'} \Rightarrow \frac{P_1}{P_0} = \frac{P_3}{P_2 - \Delta P_{\text{enf}}} \quad \text{II} \rightsquigarrow$ datos: P_0, P_3
 incógnitas: P_1, P_2

sistema de 2 ecu y 2 inc (P_1, P_2)

I $\frac{P_1}{101330} = \frac{P_2}{P_1 - 50000} \Rightarrow P_2 = \frac{P_1}{101330} \cdot (P_1 - 50000) \rightsquigarrow$ reemplazo la expresión en II

II $\frac{P_1}{101330} = \frac{2030000}{\frac{P_1}{101330} \cdot (P_1 - 50000) - 50000} \rightsquigarrow$ despejo: $P_1 = 299417,848 \text{ Pa}$

* Chequeo que la relación de compresión $\rightarrow \Gamma_{pi} = \frac{P_1}{P_0} = \frac{299417,848 \text{ Pa}}{101330 \text{ Pa}} = 2,95 < 3,5 \checkmark$
 por etapa sea factible

* Como el agua de enfriamiento está a 20°C , puedo enfriar el gas hasta una temperatura de 30°C (considero un $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ ya que no existe un enfriamiento ideal).
 Entonces las temperaturas de entrada a los compresores 2 y 3 será esta ($30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$)

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$T_1' = 303 \text{ K}$$

$$T_2' = 303 \text{ K}$$

Por lo tanto NO tengo enfriamiento perfecto ($T_1' \neq T_0$ y $T_2' \neq T_0$)

$$\textcircled{*} \text{ Eficiencia adiabática global } \rightarrow \eta_{\text{adg}} = \frac{W_{\text{ad TOTAL}}}{W_{\text{real TOTAL}}} = 0,88 \quad \textcircled{III}$$

$$\textcircled{*} \text{ Trabajo adiabático total } \rightarrow W_{\text{ad TOTAL}} = \frac{R \cdot T_0}{\tilde{M}} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{P_3}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$W_{\text{ad TOTAL}} = \frac{8,314 \text{ J} \cdot 298 \text{ K} \cdot \text{mol}^{-1}}{\text{mol} \cdot 28,05 \text{ g}} \cdot \frac{1,24}{1,24-1} \cdot \left[\left(\frac{2030000 \text{ Pa}}{101330 \text{ Pa}} \right)^{\frac{1,24-1}{1,24}} - 1 \right] \Rightarrow W_{\text{ad TOTAL}} = 358,83 \frac{\text{J}}{\text{g}}$$

Reemplazo en \textcircled{III} y despejo $W_{\text{real TOTAL}}$:

$$\frac{358,83 \text{ J/g}}{W_{\text{real TOTAL}}} = 0,88 \Rightarrow W_{\text{real TOTAL}} = 407,76 \frac{\text{J}}{\text{g}}$$

$$\textcircled{*} \text{ Trabajo real total } \rightarrow W_{\text{real TOTAL}} = W_{\text{real1}} + W_{\text{real2}} + W_{\text{real3}}$$

$$\begin{aligned} \bullet W_{\text{real1}} &= \frac{R \cdot T_0}{\tilde{M}} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\ \bullet W_{\text{real2}} &= \frac{R \cdot T_1'}{\tilde{M}} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1'} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\ \bullet W_{\text{real3}} &= \frac{R \cdot T_2'}{\tilde{M}} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{P_3}{P_2'} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Hago la sumatoria:} \\ (T_0 + T_1' + T_2') \cdot \frac{R}{\tilde{M}} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{P_3}{P_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \end{array} \right\}$$

Conozco todo, puedo despejar n .

En lo que te pasé lo planteé directamente con la eficiencia, entonces hice más despeje pero es lo mismo

$$407,76 \frac{\text{J}}{\text{g}} = (298 + 303 + 303) \text{ K} \cdot \frac{8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}}{28,05 \text{ mol} \cdot \text{K} \cdot \text{g}} \cdot \frac{1,24}{1,24-1} \cdot \left[2,95^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \Rightarrow n = 1,31$$

$$\textcircled{*} \text{ Temperatura de descarga final } \rightarrow \text{relación entre } T, P \text{ para compresión politrópica}$$

$$\frac{T_3}{T_2'} = \left(\frac{P_3}{P_2'} \right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow \frac{T_3}{303 \text{ K}} = (2,95)^{(1,31-1)/1,31} \Rightarrow T_3 = 391,4 \text{ K} < 423 \text{ K} \quad (T_{\text{max}}) \quad \checkmark$$

$$\textcircled{*} \text{ Potencia termodinámica (fluido) } \rightarrow \dot{W}_{\text{real, fluido}} = W_{\text{real}} \cdot \dot{m}$$

$$\dot{W}_{\text{real, fluido}} = 407,76 \frac{\text{J}}{\text{g}} \cdot 1,11 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \Rightarrow \dot{W}_{\text{real, fluido}} = 452,613,6 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

⊛ Potencia real requerida en el eje $\rightarrow \dot{W}_{real} = \frac{\dot{W}_{real, fluido}}{\eta_{mec}}$

$\dot{W}_{real} = \frac{452613,6 \text{ J/s}}{0,9} \Rightarrow \boxed{\dot{W}_{real} = 502904 \text{ J/s}}$

⊛ Volumen muerto $\rightarrow V_m = 0,07 \cdot V_T$

⊛ Volumen total $\rightarrow V_T = V_s + V_m \Rightarrow V_T = V_s + (0,07 \cdot V_T) \Rightarrow \boxed{V_s = 0,93 \cdot V_T}$

⊛ Espaciado cilindro-pistón $\rightarrow C = \frac{V_m}{V_s} \Rightarrow C = \frac{0,07 \cdot V_T}{0,93 \cdot V_T} \Rightarrow \boxed{C = 0,075}$

⊛ Eficiencia volumétrica $\rightarrow E_v = 1 + C - C \cdot (\Gamma_{pi})^{1/n} \rightsquigarrow$ uso n en vez de k

$E_v = 1 + 0,075 - 0,075 \cdot (2,95)^{(1/1,31)} \Rightarrow \boxed{E_v = 0,904}$

⊛ Volumen desplazado $\rightarrow V_{a1} = V_{s1} \cdot E_v \rightsquigarrow$ como el volumen admitido varía con la densidad, lo calculo por etapa (entrada)

• $P_0 = \frac{P_0 \cdot \tilde{M}}{R \cdot T_0} = \frac{101330 \text{ Pa} \cdot 28,05 \text{ g/mol} \cdot \text{K}}{8,314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol} \cdot 298 \text{ K}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \Rightarrow \boxed{P_0 = 1,147 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$

• $V_{a1} [\text{m}^3] = \dot{m}_0 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \times \frac{1 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]}{P_0} \times \frac{1 \left[\frac{\text{min}}{\text{rev}} \right]}{N} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \rightsquigarrow$ calculo el volumen siguiendo las unidades necesarias

$V_{a1} = 1,11 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1,147 \text{ kg}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{300} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \Rightarrow \boxed{V_{a1} = 0,194 \text{ m}^3}$

• $V_{a1} = V_{s1} \cdot E_v \Rightarrow 0,194 \text{ m}^3 = V_{s1} \cdot 0,904 \Rightarrow \boxed{V_{s1} = 0,215 \text{ m}^3}$

Haciendo lo mismo para las etapas 2 y 3 encuentro: ($\dot{m} = \text{cte}$)

• Etapa 2 $\rightarrow P_1' = 2,777 \text{ kg/m}^3 \rightarrow V_{a2} = 0,08 \text{ m}^3 \rightarrow \boxed{V_{s2} = 0,088 \text{ m}^3}$

• Etapa 3 $\rightarrow P_2' = 7,662 \text{ kg/m}^3 \rightarrow V_{a3} = 0,03 \text{ m}^3 \rightarrow \boxed{V_{s3} = 0,033 \text{ m}^3}$

Respuestas \rightarrow a) 3 etapas ($\Gamma_{pi} < 3,5$ y $T_f < T_{fmax}$)

b) $T_f = 391,4 \text{ K}$

c) $\dot{W} = 502904 \text{ J/s}$

d) $V_{s1} = 0,215 \text{ m}^3$

$V_{s2} = 0,088 \text{ m}^3$

$V_{s3} = 0,033 \text{ m}^3$

Problema bombas

- $Q = 60 \text{ l/s}$
- $A, B \rightarrow$ misma familia
- $\Delta Z = 22 \text{ m}$
- $D_B = 1,67 \cdot D_A$
- $h_f + h_v = 8 \text{ m}$
- motor $\rightarrow 50 \text{ kW}$
- válvula lineal ($h_v = 1 \text{ m}$, 100% ap)
- fluido \rightarrow agua
- tanques abiertos a la atmósfera

a) Bomba A con válvula 100% abierta ($h_f + h_v = 8 \text{ m}$; $Q = 60 \text{ l/s}$)

$$\text{Bce energía} \rightarrow \frac{P_1}{\rho \cdot g} + Z_1 + \frac{8 \cdot Q^2}{D^5 \cdot \pi^2 \cdot g} + H_{\text{bomba}} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + Z_2 + \frac{8 \cdot Q^2}{D^5 \cdot \pi^2 \cdot g} + h_f + h_v$$

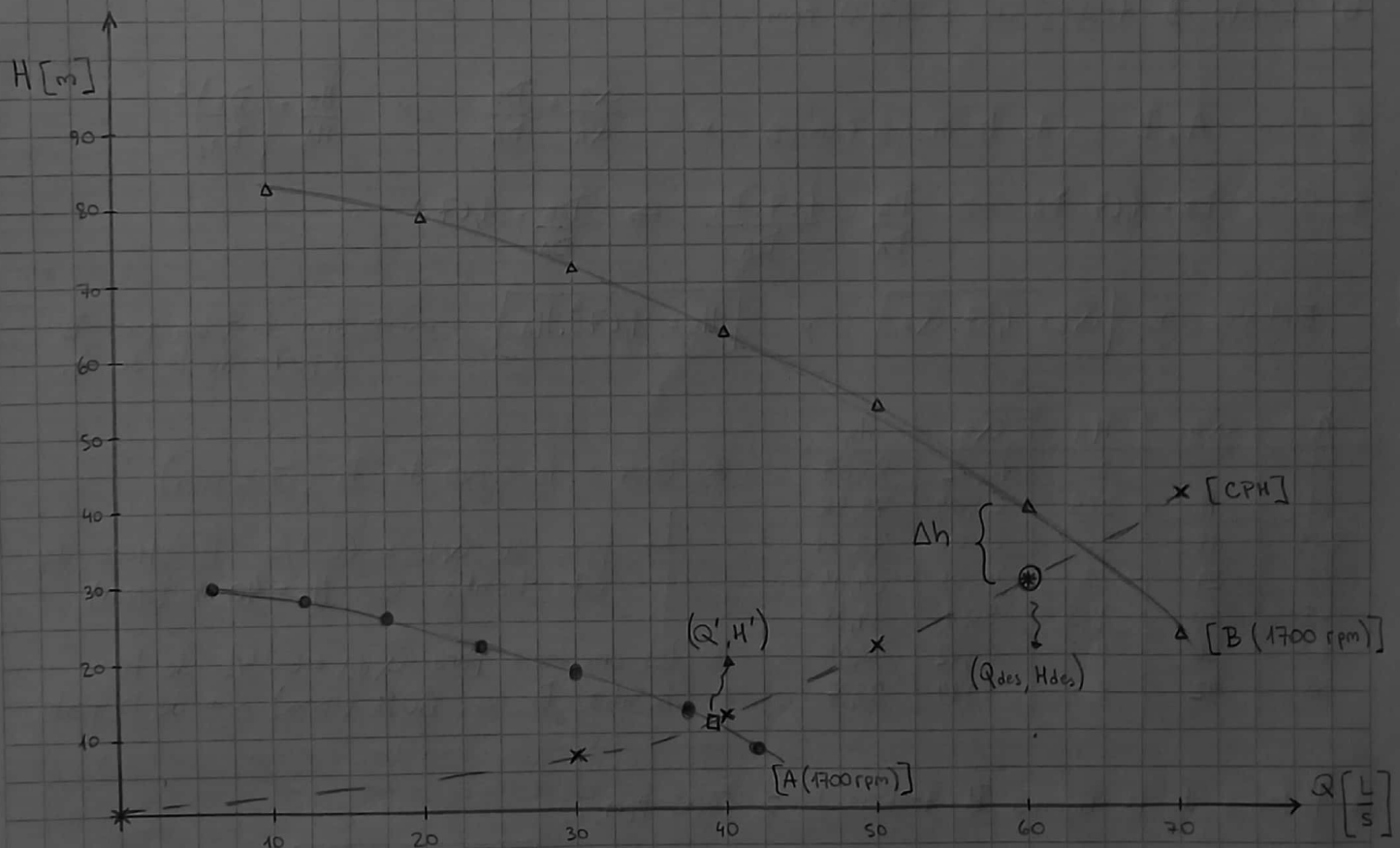
$= H_{\text{sist}}$

$$H_s = \Delta Z + h_f + h_v$$

en el punto operativo requerido ($Q = 60 \text{ l/s}$)

$$H_s = 22 \text{ m} + 8 \text{ m} \Rightarrow H_s = 30 \text{ m}$$

⊕ Grafico la curva de la bomba A (1700 rpm \rightarrow tabla) y el punto deseado ($Q = 60, H = 30$)



⊕ Como la curva de la bomba no pasa por el punto deseado, tengo que ajustar las rpm

$$\text{CPH} \rightarrow H = \frac{H_{\text{des}}}{(Q_{\text{des}})^2} \cdot Q^2 \Rightarrow H = \frac{30 \text{ m}}{(60 \text{ l/s})^2} \cdot Q^2$$

\leadsto dando valores a Q puedo obtener las H

CPH	Q [L/s]	H [m]
	30	7,5
	40	13,33
	50	20,23
	60	30
	70	40,23

La curva de la bomba A intersecta la CPH en aprox.

$$Q' = 38 \text{ L/s} \quad y \quad H' = 12 \text{ m}$$

$$\frac{Q_{des}}{Q'} = \frac{N_{des}}{N'} \Rightarrow \frac{60 \text{ L/s}}{38 \text{ L/s}} = \frac{N_{des}}{1700 \text{ rpm}} \Rightarrow N_{des} = 2684 \text{ rpm}$$

esto creo q me dio igual

⊗ Potencia de la bomba A trabajando a las nuevas rpm.

$$\dot{W}_A = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \rho_{agua} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad g = 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad Q = 60 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 0,06 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad H = 30 \text{ m} \\ \eta \rightarrow \text{leo de la tabla el valor para } Q' = 38 \text{ L/s} \Rightarrow 52,6\% \end{array} \right.$$

$$\dot{W}_A = \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,06 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 30 \text{ m} \right) / \left(\frac{52,6}{100} \right) \Rightarrow \dot{W}_A = 33,54 \text{ kW} < \text{motor (50 kW)} \checkmark$$

b) Bomba B trabajando a 1700 rpm

$$\otimes \text{ Como A, B son de la misma familia} \rightarrow \frac{Q_B}{Q_A} = \frac{D_B}{D_A} \quad y \quad \frac{H_B}{H_A} = \left(\frac{D_B}{D_A} \right)^2$$

$$\otimes \text{ Como } D_B = 1,67 \cdot D_A \Rightarrow \frac{D_B}{D_A} = 1,67 \cdot \frac{D_A}{D_A} \Rightarrow \frac{D_B}{D_A} = 1,67$$

$$\text{Entonces} \rightarrow \boxed{Q_B = 1,67 \cdot Q_A} \quad y \quad \boxed{H_B = 1,67^2 \cdot H_A} \rightarrow \text{armo la tabla para B a partir de la de A.}$$

$\eta \%$	Q_A	H_A	Q_B	H_B
39	6	30	10,02	83,67
61	12	28,5	20,04	79,48
75,5	18	26	30,06	72,51
83	24	23	40,08	64,14
75	30	19,5	50,1	54,38
60	36	14,5	60,12	40,44
38	42	8,5	70,14	23,7

⊗ Grafico la curva de B (1700 rpm)

↳ para el $Q_{des} = 60 \text{ L/s}$ la altura de esta bomba es $H_B = 40 \text{ m}$ (aprox)

⊗ La eficiencia para $Q_{des} = 60 \text{ L/s}$ de la bomba B es 60% (aprox) \rightarrow de la tabla

⊗ Potencia de la bomba B trabajando a 1700 rpm

$$\dot{W}_B = \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,06 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 40 \text{ m} \right) / \left(\frac{60}{100} \right) \Rightarrow \dot{W}_B = 39,2 \text{ kW} < \text{motor (50 kW)} \checkmark$$

⊗ Como la curva de la bomba B no pasa por el punto deseado ($Q = 60 \text{ L/s}$, $H = 30 \text{ m}$) tengo que agregar una caída de presión extra.
Lo hago cerrando la válvula de control.

• Lea del gráfico la diferencia de altura entre la curva de la bomba B y el punto deseado. También puedo calcularlo $\rightarrow H_b(60 \text{ l/s}) = 40 \text{ m}$ y $H_{des}(60 \text{ l/s}) = 30 \text{ m}$

• Entonces $\Delta h = 10 \text{ m} \rightarrow \Delta P_{extra} = \Delta h \cdot \rho \cdot g = 10 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \Rightarrow \Delta P_{extra} = 98000 \text{ Pa}$

• Como lo corrigo cerrando la válvula, ya tiene un $h_v = 1 \text{ m}$ asociado $\rightarrow h_v = 10 \text{ m} + 1 \text{ m} = 11 \text{ m}$

• Caída de presión en la válvula (requerida):

$$\Delta P_v = h_v \cdot \rho \cdot g = 11 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \Rightarrow \Delta P_v = 107800 \text{ Pa}$$

c) Válvula de control $\rightarrow K_{vx} = Q \cdot \sqrt{\frac{P_{rel}}{\Delta P_v}} \Rightarrow K_{vx} = X \cdot K_{v100} \begin{cases} Q [\text{m}^3/\text{h}] \\ \Delta P_v [\text{bar}] \\ X = \% \text{ ap} \end{cases}$

• $Q = 60 \text{ l/s} = 216 \text{ m}^3/\text{h}$

• $\Delta P_v = 107800 \text{ Pa} = 1,078 \text{ bar}$

• $P_{rel} = 1$

• $K_{vx} = 216 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \sqrt{\frac{1}{1,078 \text{ bar}}} \Rightarrow K_{vx} = 208,04 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \sqrt{\text{bar}}}$

• $K_{v100} \rightarrow$ cuando la válvula está abierta 100%, $h_v = 1 \text{ m} \Rightarrow \Delta P_v = 1 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$$\Delta P_v = 9800 \text{ Pa} = 0,098 \text{ bar}$$

$\rightarrow K_{v100} = 216 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \sqrt{\frac{1}{0,098 \text{ bar}}} \Rightarrow K_{v100} = 689,99 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \sqrt{\text{bar}}}$

• $208,04 = X \cdot 689,99 \Rightarrow X = 0,3015 \rightarrow \% \text{ apertura} = 30,15 \%$

d) Conviene trabajar con la bomba A a 2684 rpm porque consume menos potencia que la bomba B a 1700 rpm. Si el objetivo es ahorrar energía, uso la bomba A. igualmente para usar la bomba A hay que aumentar demasiado las rpm y no es recomendable, mientras que la bomba B puede trabajar con la válvula abierta un 30%. Por lo tanto hay una relación de compromiso entre las variables.

Respuestas \rightarrow a) Sí sirve el motor ($33,54 \text{ kW} < 50 \text{ kW}$). $N = 2684 \text{ rpm}$
 b) $\dot{W}_B = 39,2 \text{ kW}$. $\Delta P_{extra} = 98000 \text{ Pa}$
 c) Apertura de la válvula = 30,15 %
 d) Conviene la bomba A a 2684 rpm (menor consumo de energía)