

6. Bombas

Ingeniería energética en las instalaciones industriales

Manuel Ruiz de Adana Santiago

Octubre 2018



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR DE CÓRDOBA
Universidad de Córdoba



- 1 Introducción a los sistemas de transporte de fluidos
- 2 Balance energético en bombas
- 3 Curvas características de una bomba. Curva motriz
- 4 Punto de funcionamiento de una instalación hidráulica
- 5 Regulación del punto de funcionamiento
- 6 Equilibrado hidráulico de un circuito



Introducción a los sistemas de transporte de fluidos



Introducción a bombas. Ideas básicas

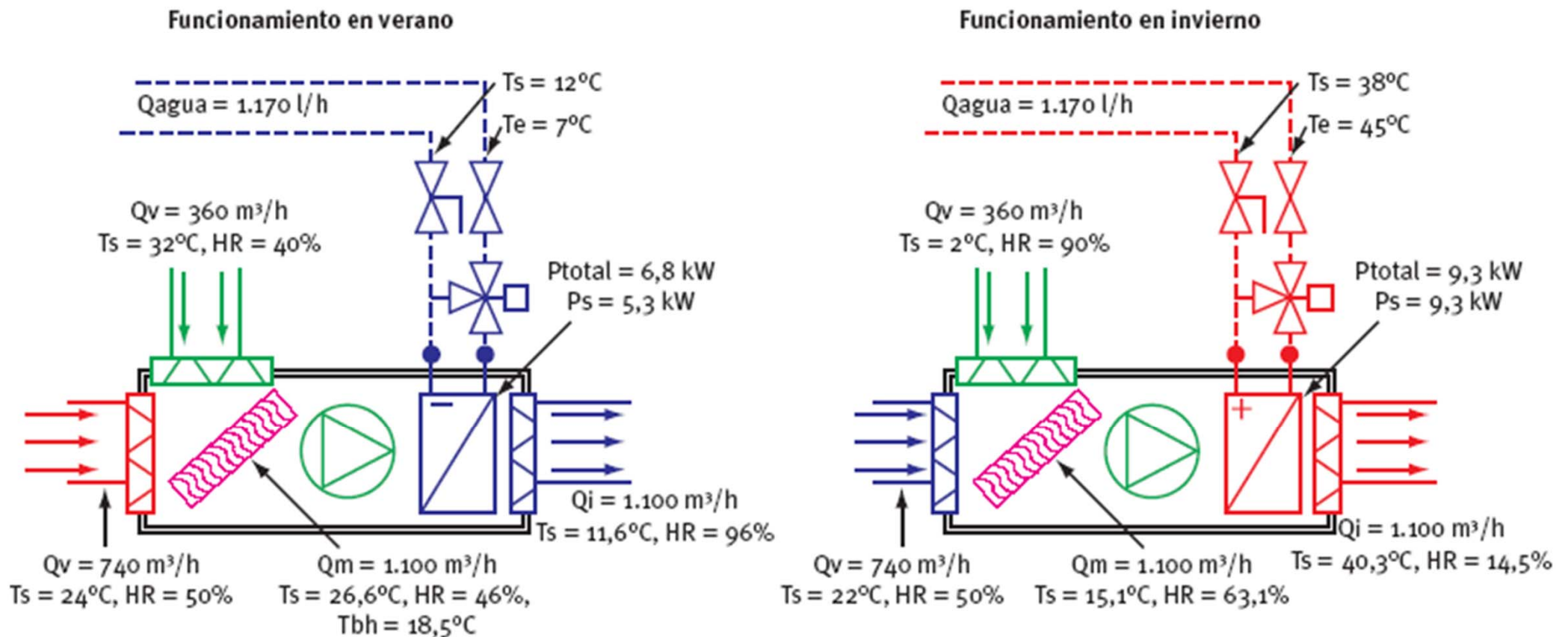
- El transporte del fluido en estas instalaciones se realiza con el objeto de transportar energía entre distintos elementos de la instalación. Se trata de aplicaciones donde lo que se pretende es transportar energía y no transportar agua (como ocurre en instalaciones de abastecimiento de agua).
- Bombas:
 - dispositivos mecánicos empleados para el transporte de líquidos por las redes de tuberías.
 - En circuitos cerrados, la energía de bombeo se emplea únicamente para vencer pérdidas hidráulicas. Ejemplos: instalaciones de calefacción, refrigeración, climatización, energía solar y agua caliente sanitaria.
- El correcto diseño de los circuitos, así como la selección de la bomba más adecuada afecta de forma muy importante al consumo energético de las instalaciones de transporte de energía térmica.

Ejercicio 6.1. Ejemplo de dimensionado básico. Fancoil

- Determinar el caudal de agua, en l/min, que debe circular por el fancoil: 1) en verano; y 2) en invierno.

Datos: 1) $c_p = 4,188 \text{ kJ/kg K}$; $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; $P = 1,5 \text{ bar}$;

2) $c_p = 4,182 \text{ kJ/kg K}$; $\rho = 991,6 \text{ kg/m}^3$; $P = 1,5 \text{ bar}$



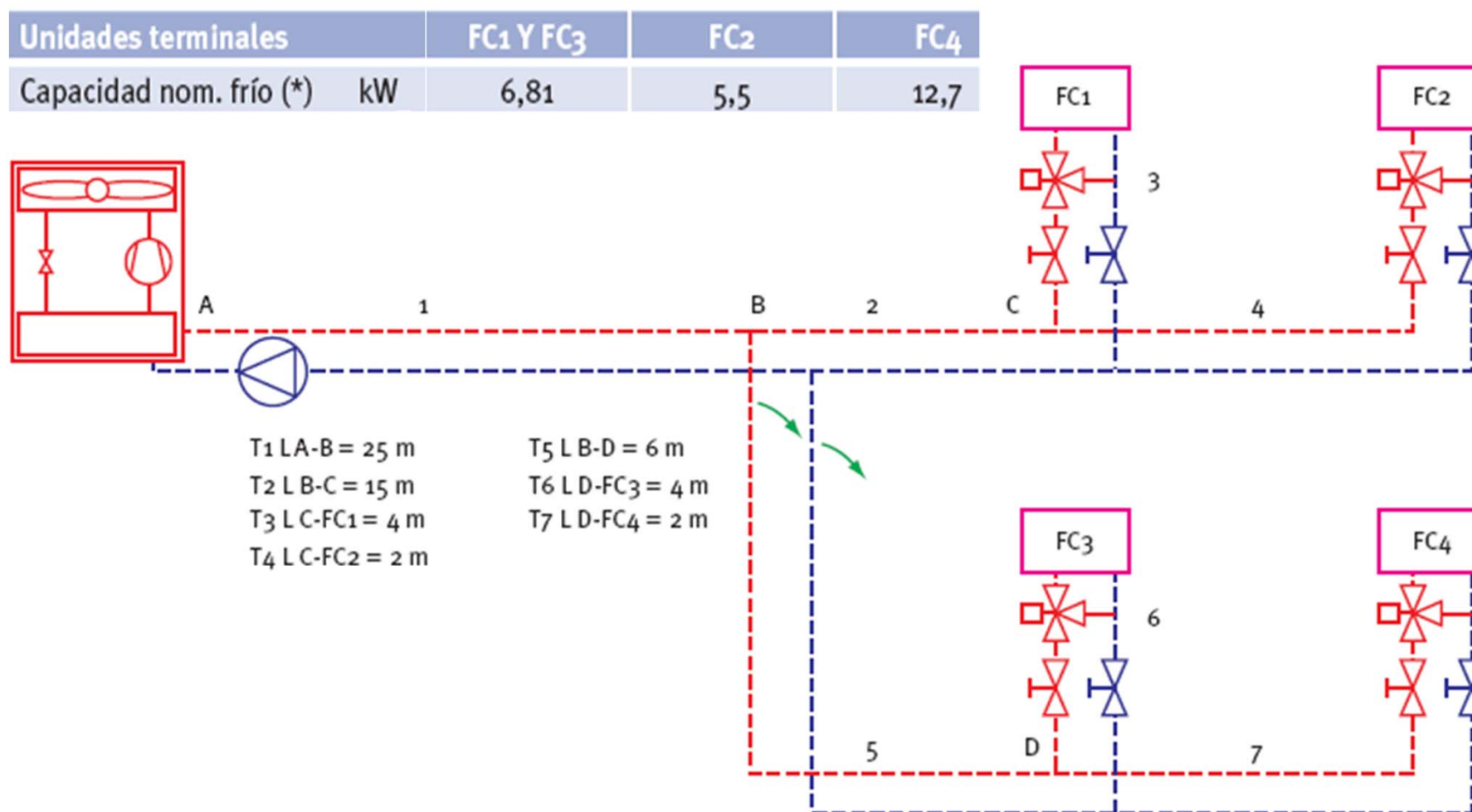
Solución: 1) 19,49 l/min; 2) 19,22 l/min



Ejercicio 6.2. Ejemplo de dimensionado básico. Red de fancoils

- Determinar el caudal de agua de cada tramo así como el caudal de agua que debe impulsar la bomba de la instalación.

Datos: $T_{imp}=7^{\circ}\text{C}$; $T_{ret}=12^{\circ}\text{C}$; $P=1,5$ bar; $c_p=4,188$ kJ/kg K; $\rho=1000$ kg/m³



Solución: $V_{dot_FC1}=19,52$ l/min; $V_{dot_FC2}=15,76$ l/min; $V_{dot_FC3}=19,52$ l/min; $V_{dot_FC4}=36,39$ l/min; $V_{dot_C_FC2}=15,76$ l/min; $V_{dot_B_C}=35,28$ l/min; $V_{dot_D_FC4}=36,39$ l/min; $V_{dot_B_D}=55,91$ l/min; $V_{dot_A_B}=99,19$ l/min; $V_{dot_bomba}=99,19$ l/min;

Balance energético en bombas



Recordatorio del balance energético en tuberías

- Flujo real de un fluido en una instalación, incluyendo pérdidas:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L \text{ [m]}$$

- Pérdidas de energía total, h_L : $h_L = h_{L,tuberias} + h_{L,accesorios} + h_{L,equipos} \text{ [m]}$

- Pérdidas energía en tramos rectos de tuberías: $h_{L,tuberias} = f \frac{L V^2}{D 2g} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \text{ [m]}$

- Pérdidas energía en accesorios: $h_{L,accesorios} = K_L \frac{V^2}{2g} \text{ [m]}$





Fundamentos teóricos. Balance energético en bombas

- Altura manométrica de una bomba, H_m :

$$H_m = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + z_2 - z_1 \quad [m]$$

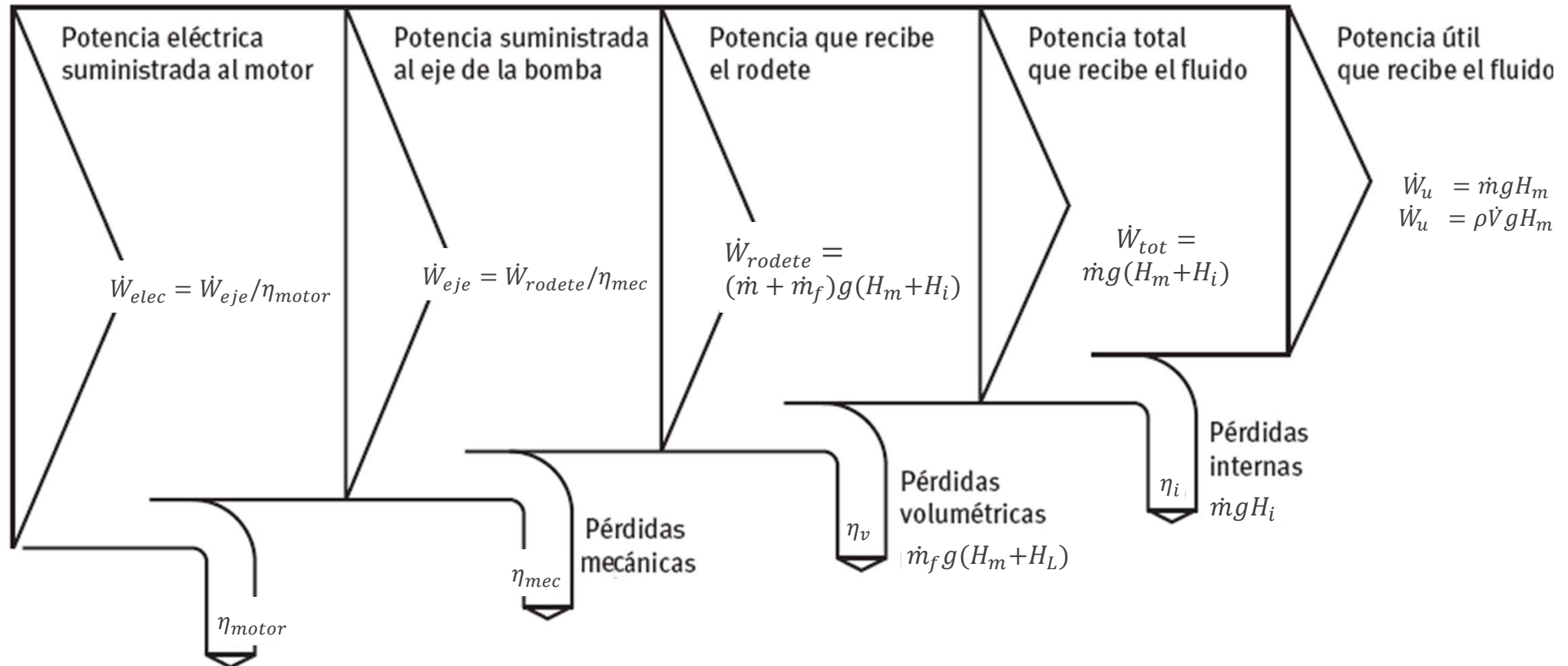
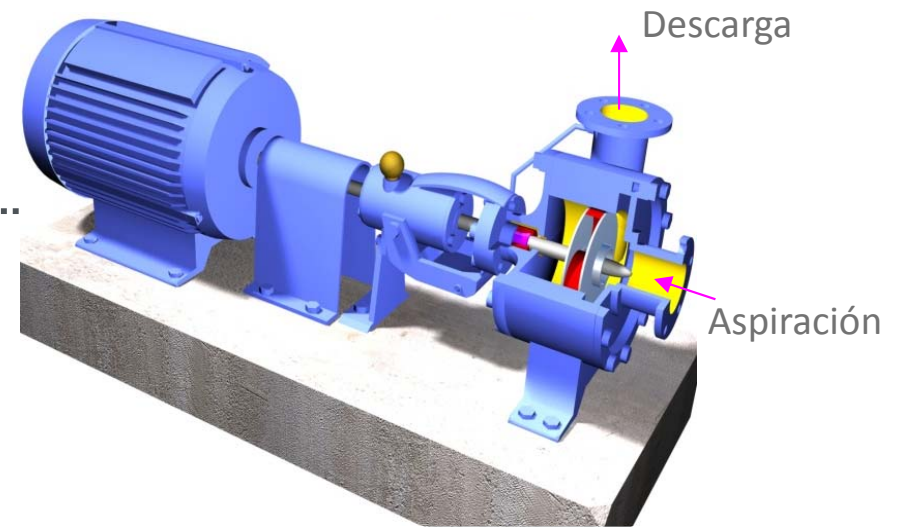
- Potencia útil de una bomba o energía que entrega al fluido, \dot{W}_f :

$$\dot{W}_f = \dot{m} g H_m \rightarrow \dot{W}_f = \rho \dot{V} g H_m \quad [W]$$

Balance energético en bombas

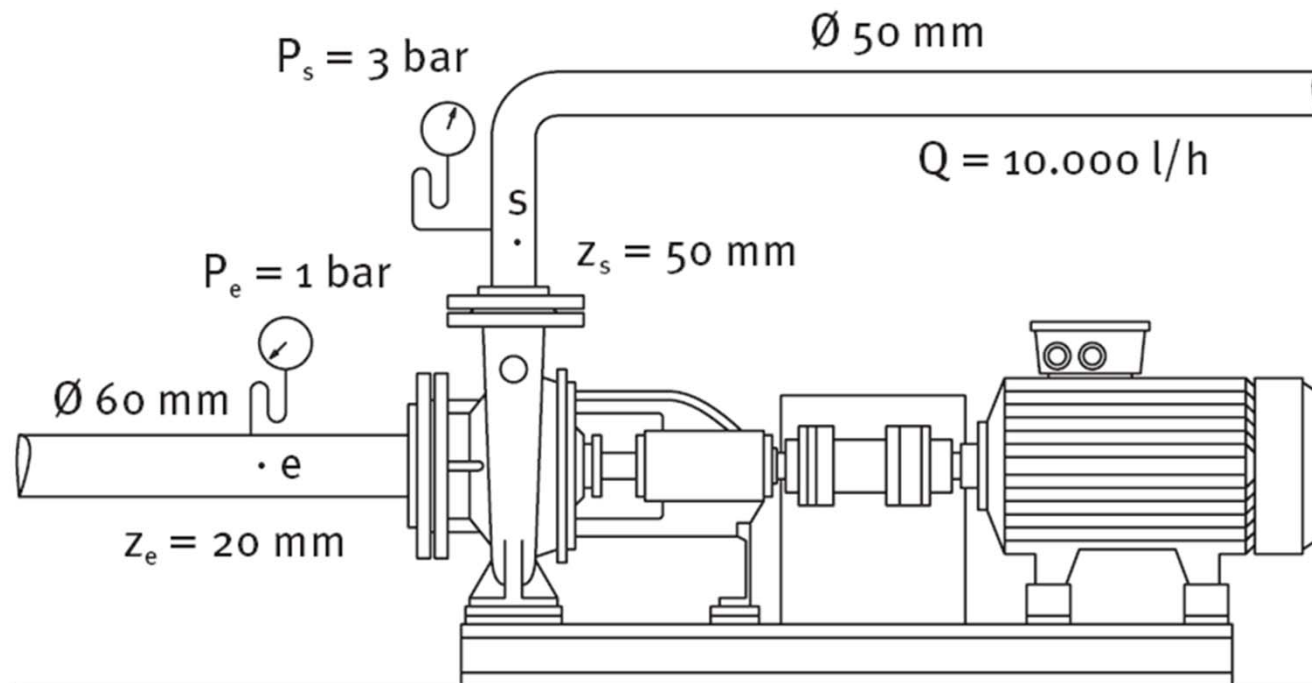
- Diagrama de Sankey de una bomba centrífuga:

$$\eta = \frac{\dot{W}_u}{\dot{W}_{elec}} = \frac{\rho \dot{V} g H_m}{\dot{W}_{elec}}$$



Ejercicio 6.3. Altura manométrica

- Una bomba impulsa agua a 7°C. Considerando los datos de la figura, determinar:
 1. la altura manométrica, en mca, y
 2. la potencia que recibe el fluido, en W

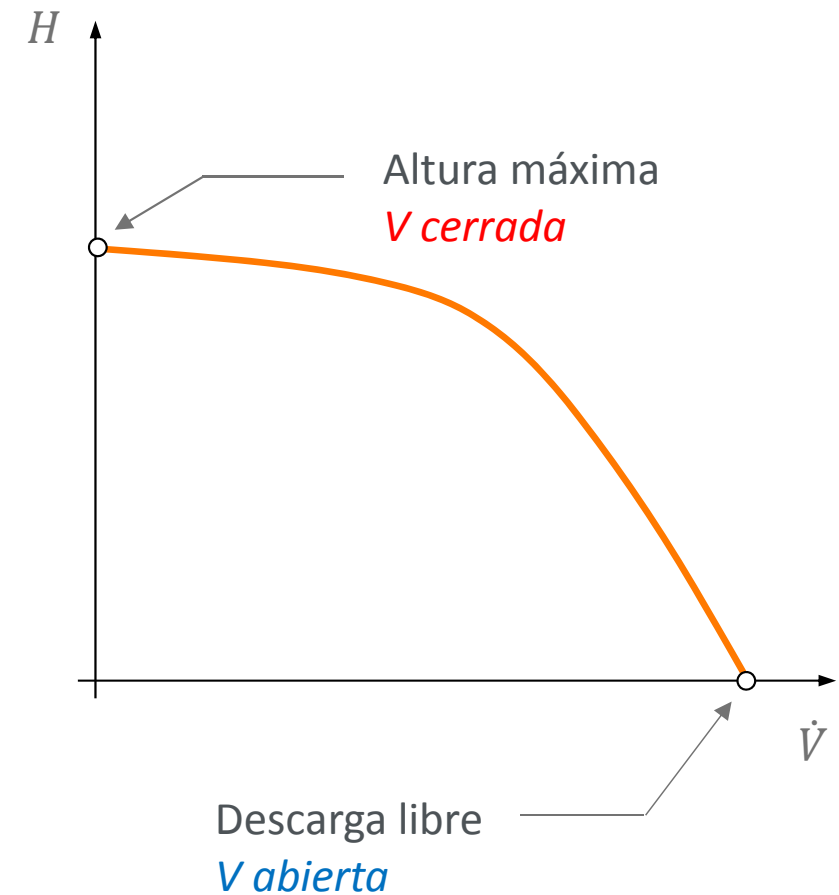
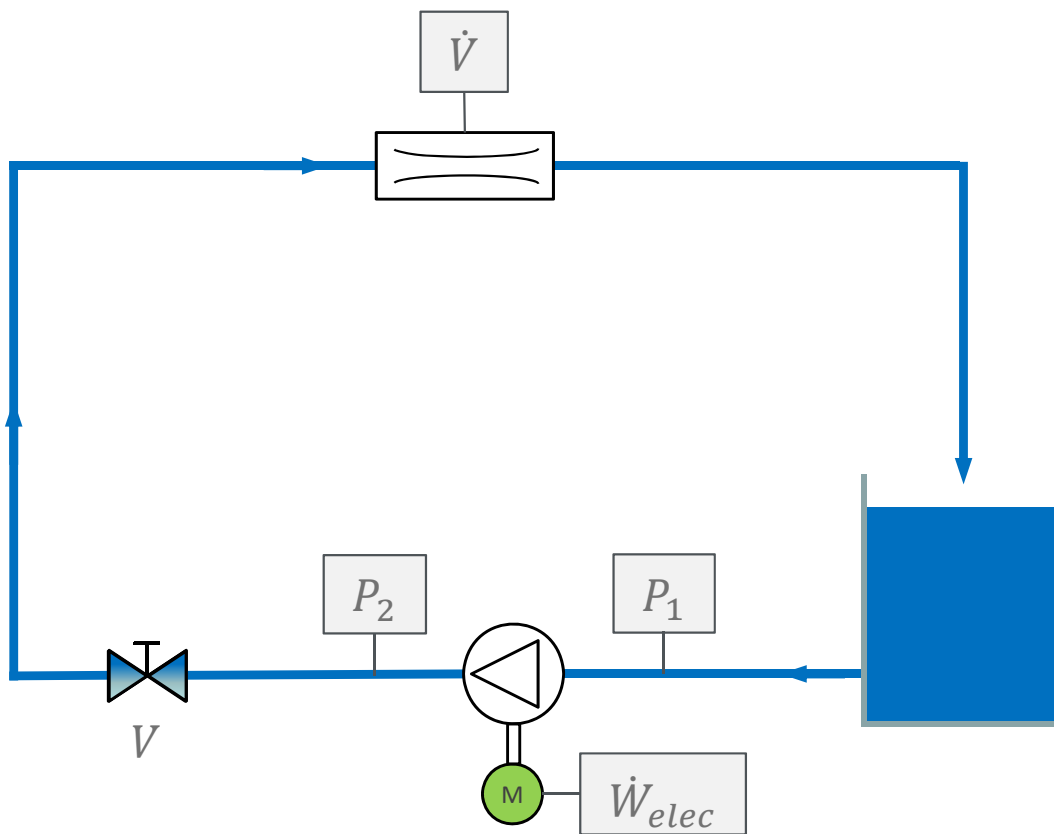


Solución: 1) $H_m = 20,46 \text{ mca}$; 2) $\dot{W}_u = 557,8 \text{ W}$

Curvas características de una bomba. Curva motriz

Curva motriz de una bomba: relación altura-caudal

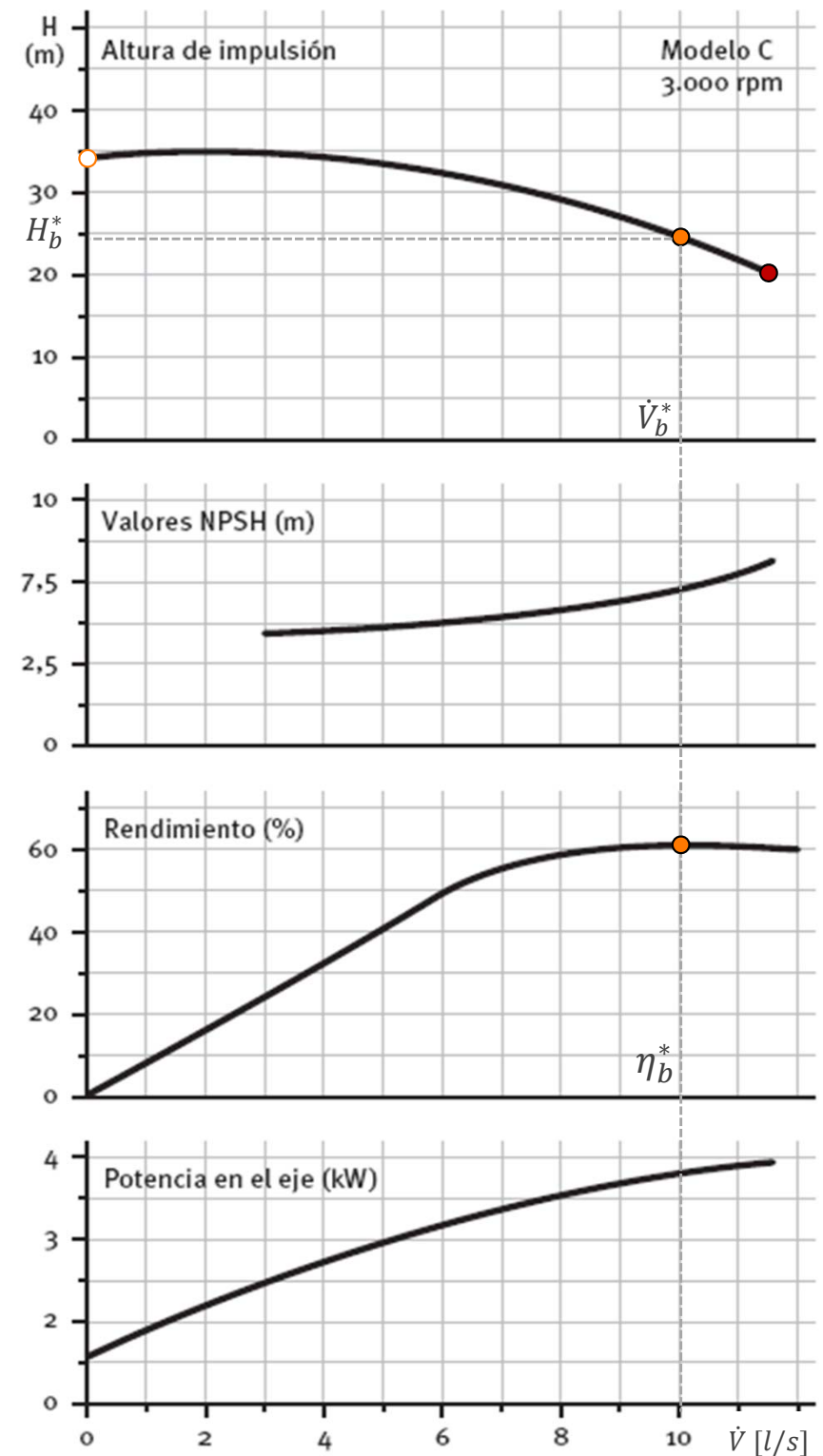
- Cuando el caudal es cero la altura proporcionada por la bomba es máxima
- Cuando la bomba descarga libre la altura es cero y el caudal es máximo



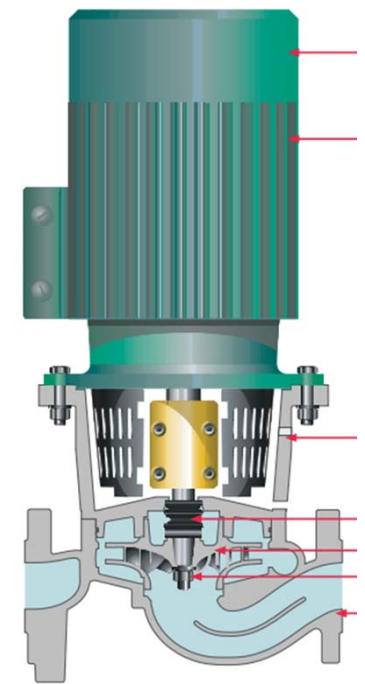
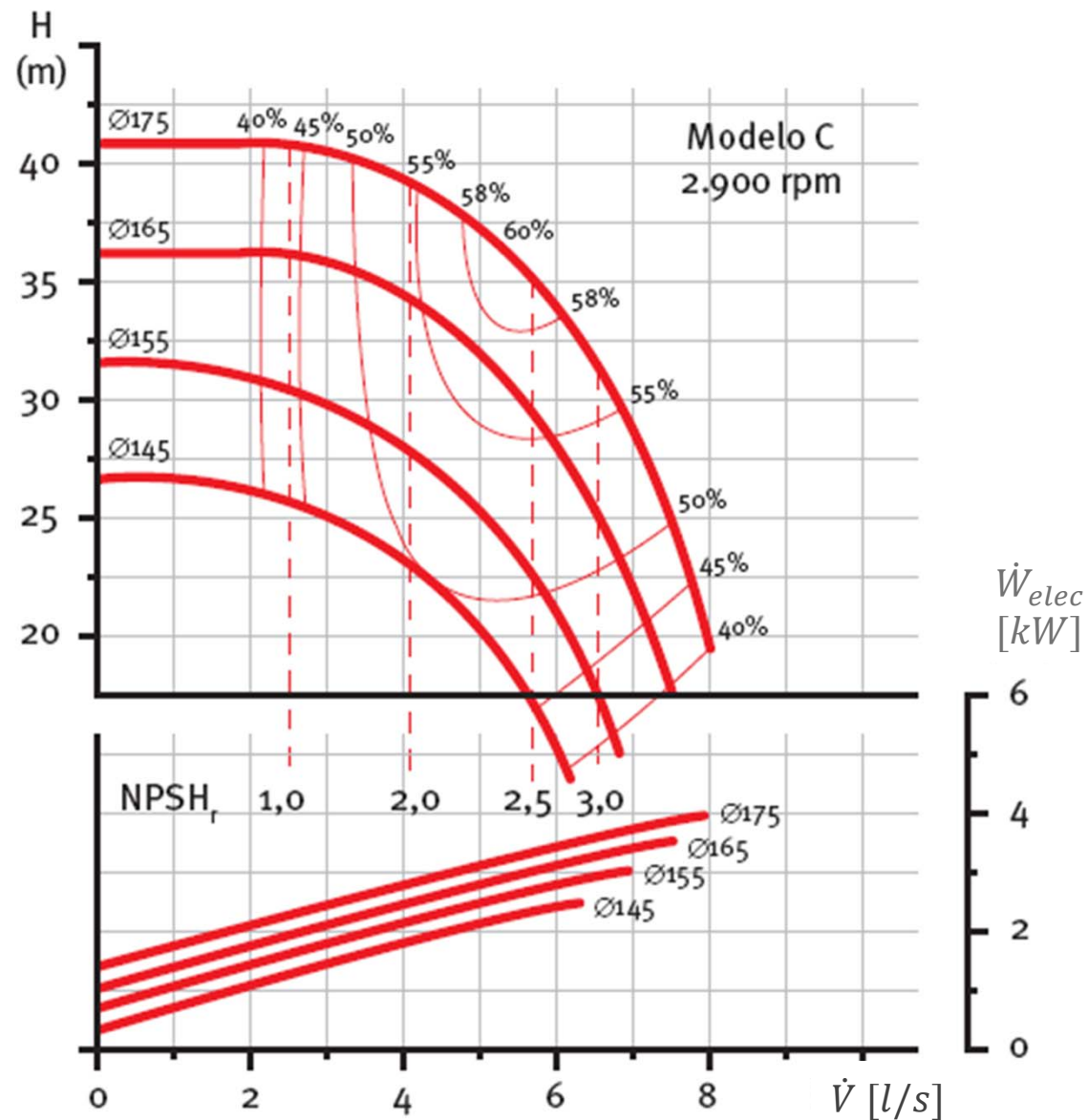
$$\Delta P = \rho g H \rightarrow H = \Delta P / \rho g$$

Curvas características de bombas

- Curvas características:
 - caudal-altura (**curva motriz**)
 - caudal-NPSH (altura neta succión positiva)
 - caudal-rendimiento
 - caudal-potencia en el eje
- Punto de caudal nulo: H, \dot{V}, η
- Punto de caudal máximo: H, \dot{V}, η
- Punto nominal (máx. rendimiento): $H_b^*, \dot{V}_b^*, \eta_b^*$



Familia de bombas. Curvas isorendimiento



Consultar catálogo de fabricantes de bombas. Por ejemplo:

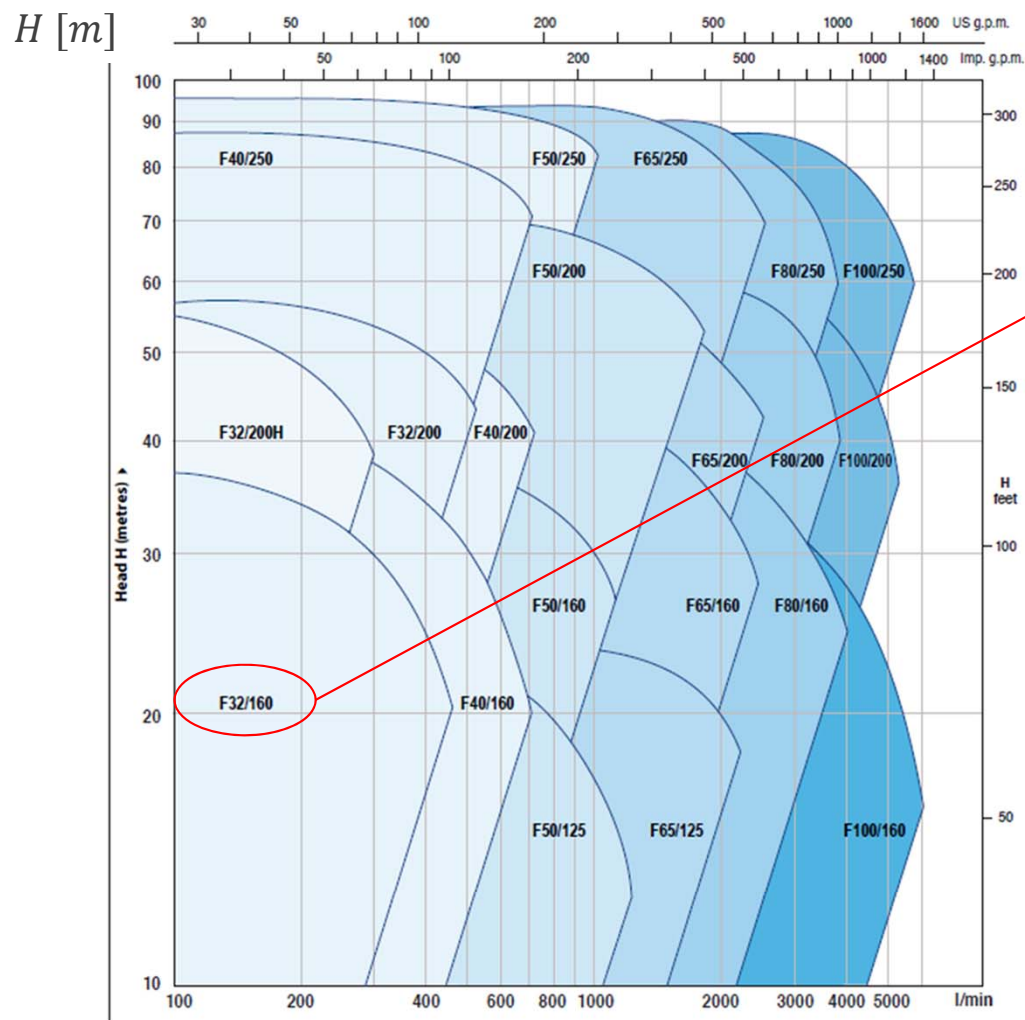
Familia de bombas. Catálogos de fabricantes



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

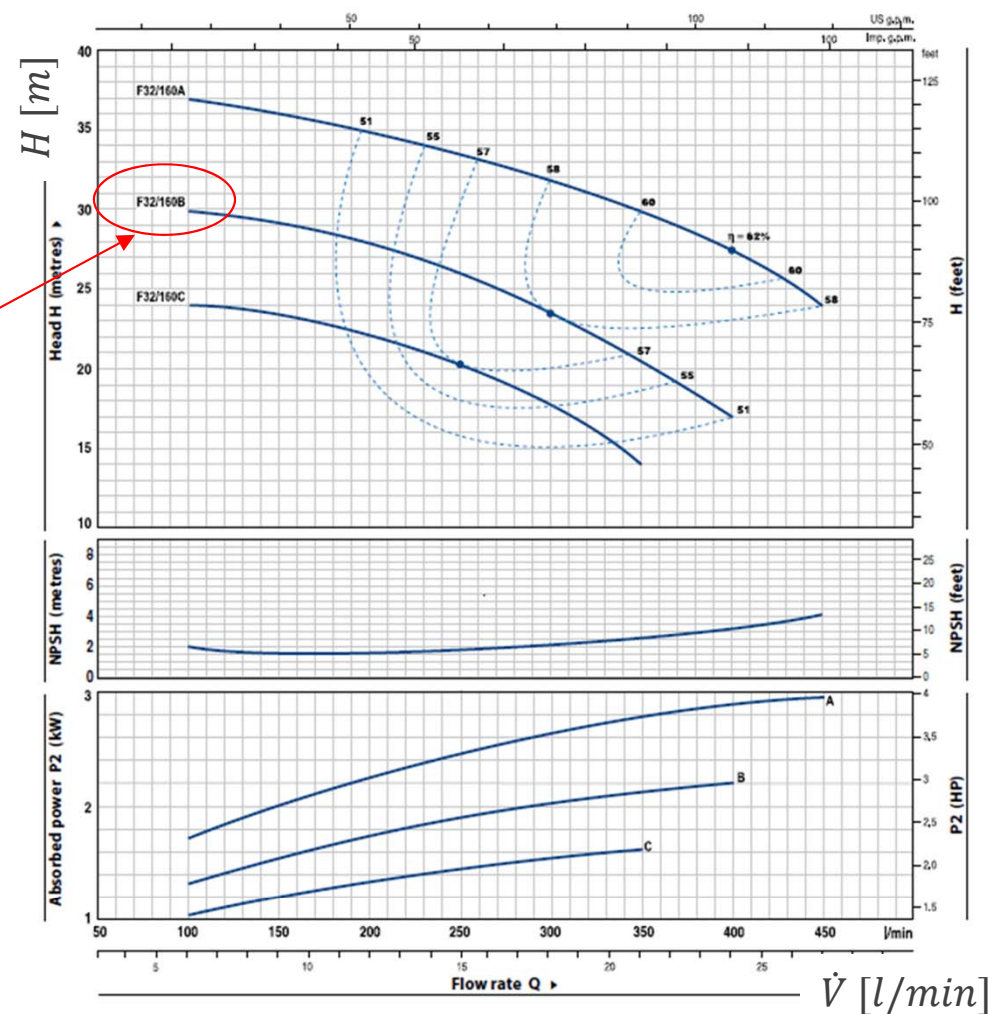
PERFORMANCE RANGE

50 Hz n=2900 1/min HS=



CHARACTERISTIC CURVES AND PERFORMANCE DATA

50 Hz n=2900 1/min HS=0 m



MODEL		POWER		Q m³/h l/min	0	6	9	12	15	18	21	24	27
Single-phase	Three-phase	kW	HP		0	100	150	200	250	300	350	400	450
Fm 32/160C	F 32/160C	1.5	2	H metres	25	24	23.5	22	20.5	18	14		
Fm 32/160B	F 32/160B	2.2	3		31	30	29	28	26	23.5	20.5	17	
—	F 32/160A	3	4		38	37	36	35	33.5	31.5	30	27.5	24

Q = Flow rate H = Total manometric head HS = Suction height

Tolerance of characteristic curves in compliance with EN ISO 9906 Grade 3.

► Consultar catálogo de fabricantes de bombas. Por ejemplo:

http://www.wilo.es/fileadmin/es/Downloads/pdf_entero.pdf http://www.pedrollo.com/en/default_t1 <http://www.lowara.com/lowdata/doc/ES/eng-low-slutlig-ed-es.pdf>



Ejercicio 6.4. Ajuste de la curva motriz de una bomba en EES

- Considerando la bomba marca Pedrollo modelo F32/160B:
 1. Obtener y representar la curva de rendimiento de la bomba
 2. Representar la curva motriz de la bomba
 3. Ajustar la curva motriz a ecuación del tipo: $H = a + b \dot{V}^2$ donde H [m] y \dot{V} [m^3/h]

MODEL		POWER		\dot{V} [m^3/h]	0	6	9	12	15	18	21	24
Single-phase	Three-phase	kW	HP	\dot{V} [l/min]	0	100	150	200	250	300	350	400
Fm 32/160C	F 32/160C	1.5	2	H [m]	25	24	23.5	22	20.5	18	14	
Fm 32/160B	F 32/160B	2.2	3		31	30	29	28	26	23.5	20.5	17
–	F 32/160A	3	4		38	37	36	35	33.5	31.5	30	27.5

http://www.pedrollo.com/en/default_t1

Ver tutorial de ayuda en Moodle

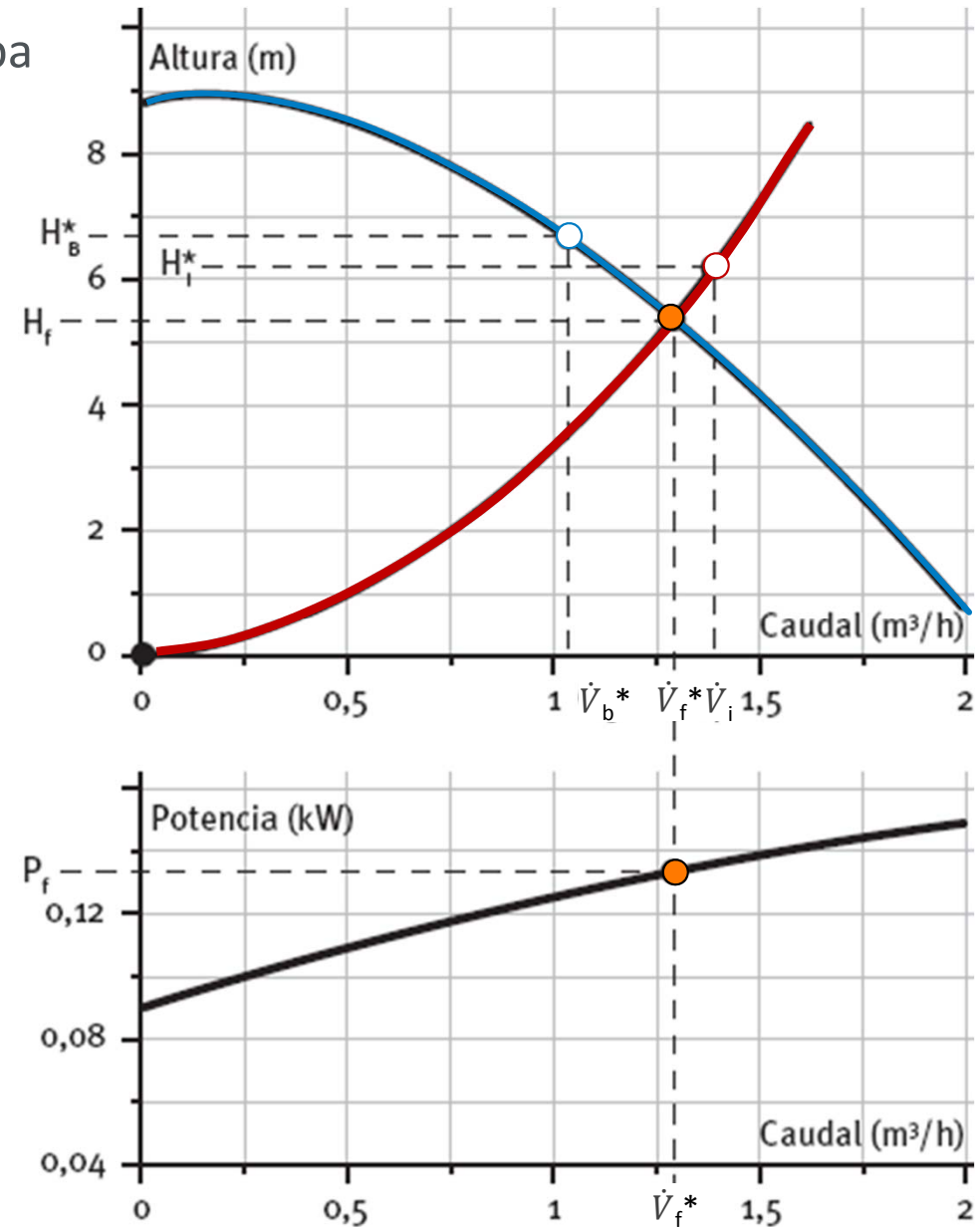
Solución: 3) $H = 31,1234 - 0,02407 \dot{V}^2$

Punto de funcionamiento de una instalación hidráulica



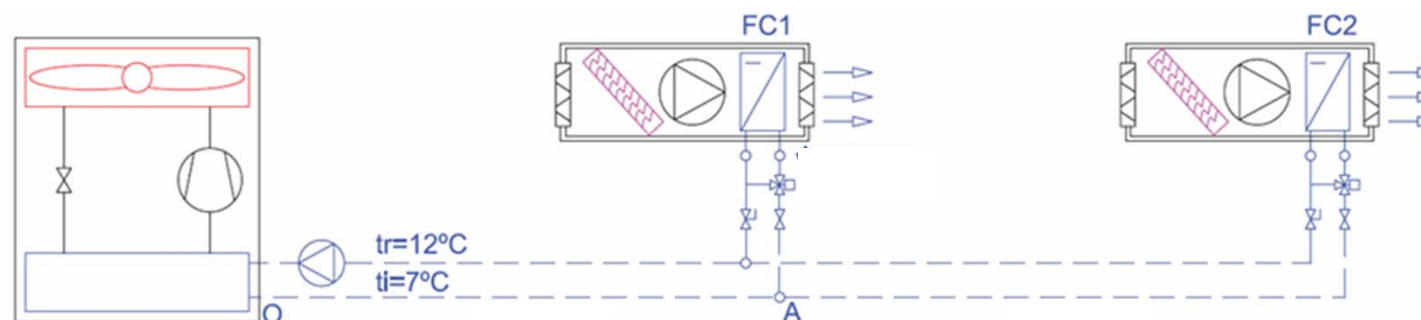
Punto de funcionamiento de la instalación

- Es la intersección entre la curva de la bomba y la curva resistente de la instalación
- Debe asegurarse:
 - Que la bomba proporcione el caudal deseado, es decir, que esté próximo al **punto nominal de la instalación** (\dot{V}_i, H_i)
 - Que se sitúe lo más próximo al punto de rendimiento máximo de la bomba, es decir al **punto nominal de la bomba** (\dot{V}_b^*, H_b^*)
 - Que ambos puntos se sitúen lo más próximos posible al **punto de funcionamiento de la instalación**, (\dot{V}_f, H_f)



Ejercicio 6.5. Punto de funcionamiento

- Se ha determinado que el punto nominal de la instalación de la figura es, $\dot{V}_{nominal}$ 1.719 l/h y $H_{nominal}$ 4,52 mca. Determinar:
1. curva característica o curva resistente de la red hidráulica
 2. curva motriz de la bomba modelo A 2800rpm (ver gráfica y tabla adjunta)
 3. punto de funcionamiento de la instalación



TRAMO	POTENCIA kW	CAUDAL litros/hora	LONGITUD m	DIÁMETRO mm	Δ Presión unit. mm c.a. / ml	Δ Presión tramo mm c.a.
1 O - A	10	1720	14	28 x 1,5	51,4	720,0
2 A - FC1	5	860	6	22 x 1,0	44,2	265,1
3 A - FC2	5	860	10	22 x 1,0	44,2	441,8

Elemento	Tramos	Elementos	Δ P elem. mm c.a.	Δ P tubos* mm c.a.	Δ presión total mm c.a.	Desequilibrio mm c.a.
FC1	1 2	FC1 + ENF	1500	2561	4061	460
FC2	1 3	FC2 + ENF	1500	3021	4521	0

La pérdida de presión en los tubos es 2 veces (impulsión + retorno) de 1,3 la DP en los tramos (se considera 30% de pérdidas en accesorios)

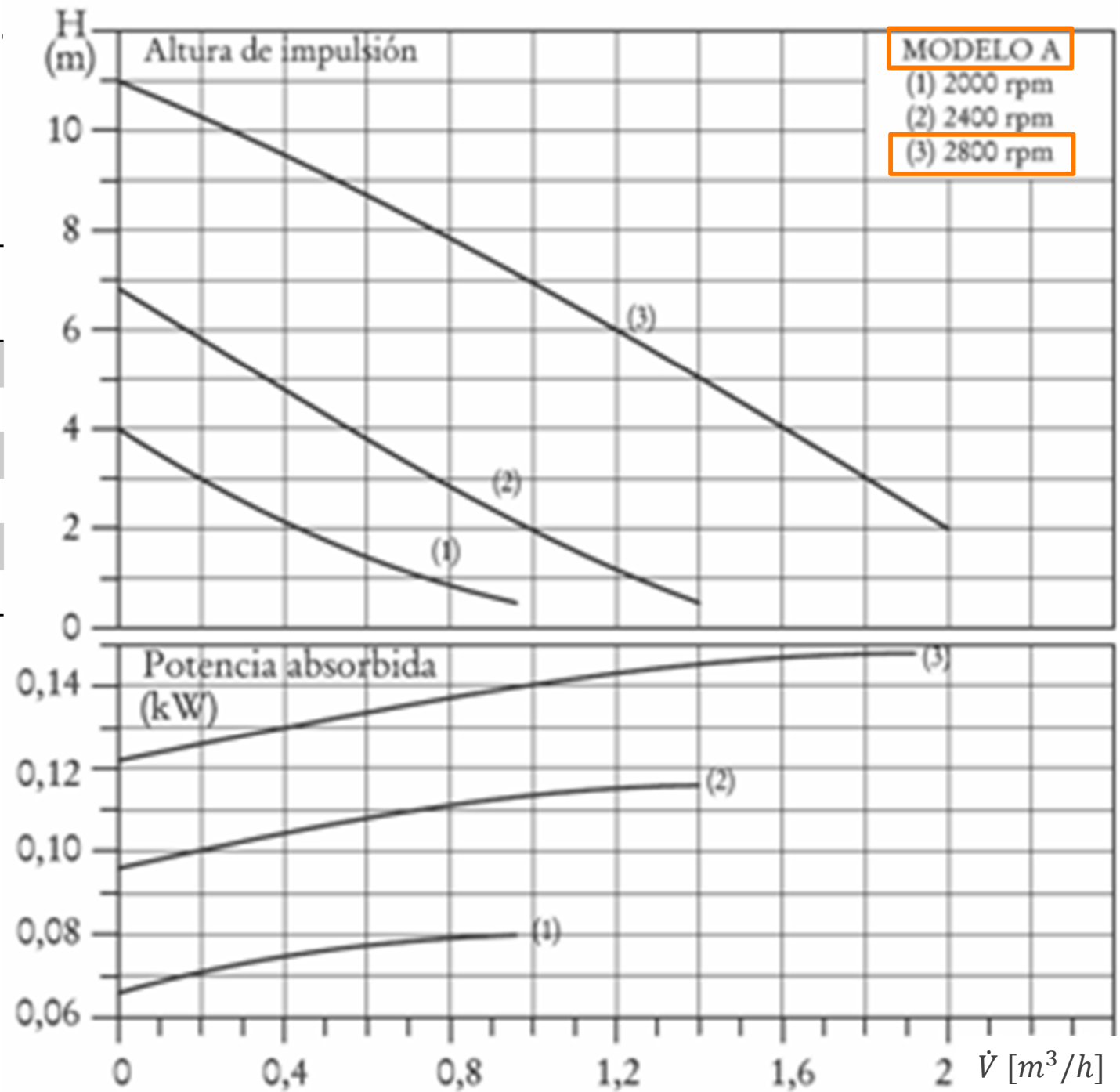
Solución: 3) $H_f = 3,98 \text{ mca}$; $\dot{V}_f = 1,61 \text{ m}^3/\text{h}$; $\dot{W} = 148 \text{ W}$



Ejercicio 6.5. Punto de funcionamiento

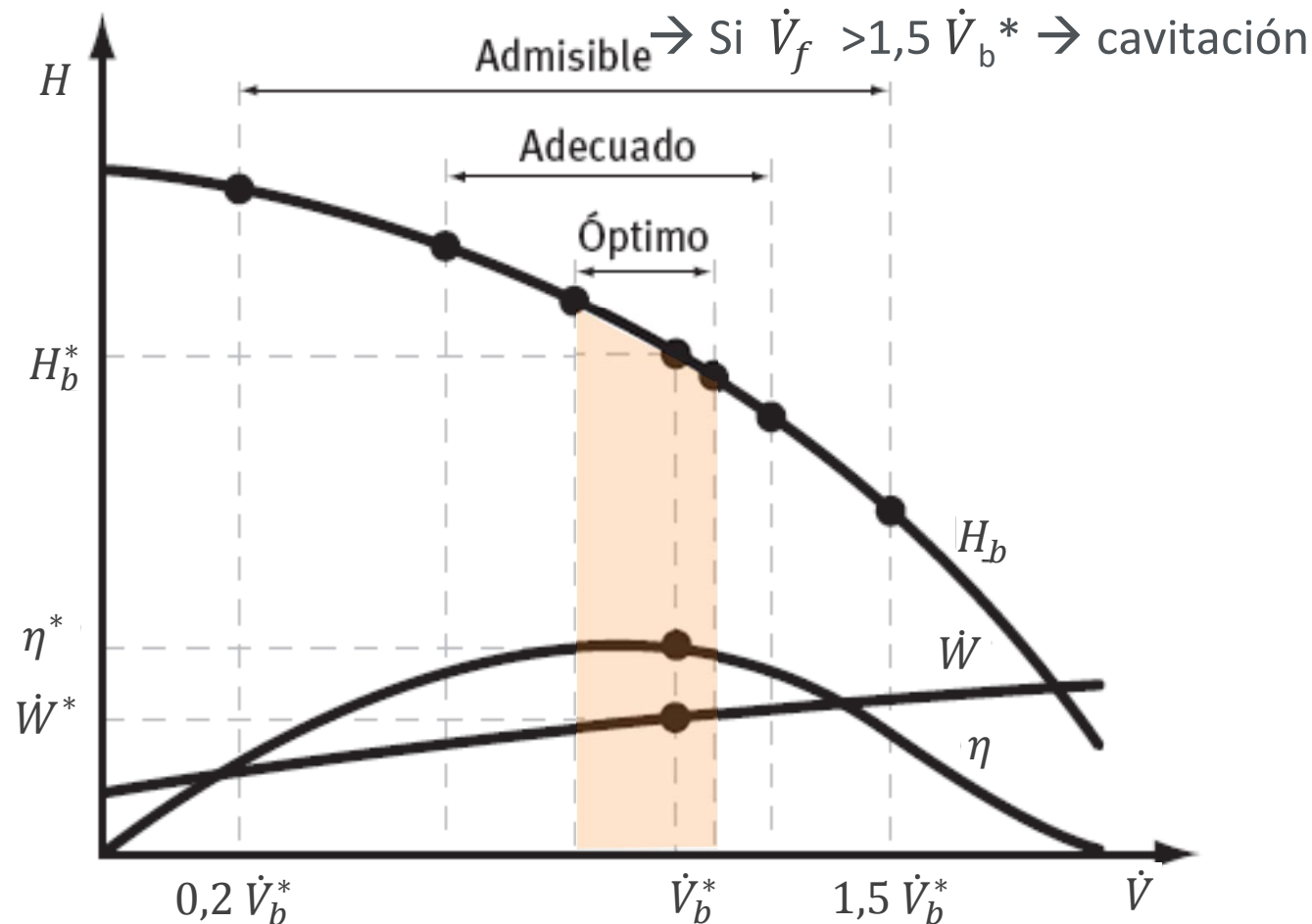
- Datos de la bomba
modeloA2800rpm:

\dot{V} [m ³ /h]	H [m]	\dot{W} [kW]	η [%]
0	11	0,121	0
0,4	9,5	0,13	7,96
0,8	7,8	0,138	12,32
1,2	6	0,143	13,72
1,6	4	0,148	11,78
2	2	0,149	7,31



Punto de funcionamiento de la instalación. Rangos posibles

- **Óptimo:** $0,85 \dot{V}_b^* < \dot{V}_f < 1,05 \dot{V}_b^*$ → Rendimiento próximo al máximo
- **Adecuado:** $0,66 \dot{V}_b^* < \dot{V}_f < 1,15 \dot{V}_b^*$ → Rendimiento adecuado
- **Admisible:** $0,20 \dot{V}_b^* < \dot{V}_f < 1,50 \dot{V}_b^*$ → Si $\dot{V}_f < 0,2 \dot{V}_b^* \rightarrow$ choques rodete





Punto funcionamiento instalación. Caudal distinto al nominal

- Si el caudal de funcionamiento es inferior al caudal nominal, $\dot{V}_f < \dot{V}_i$:
 - Para un mismo ΔT , la potencia transportada por el fluido es menor que la requerida en la instalación
 - La potencia de bombeo es menor a la requerida
 - Si el caudal volumétrico que circula por el equipo de producción térmica es menor al requerido, el ΔT en la caldera o evaporador es mayor
- Si el caudal de funcionamiento es superior al nominal, $\dot{V}_f > \dot{V}_i$:
 - Para un mismo ΔT , la potencia transportada por el fluido es menor que la requerida en la instalación
 - La potencia de bombeo es mayor a la requerida → como la potencia es proporcional al cubo del caudal → un 15% mas de caudal implica un 50% mas de potencia
 - Si el caudal volumétrico que circula por el equipo de producción térmica es mayor al requerido, el ΔT en la caldera o evaporador es menor

Regulación del punto de funcionamiento



Regulación del punto de funcionamiento

- Es habitual que el punto de funcionamiento no coincida con el deseado. En este caso se realiza una regulación que consiste a ajustar el caudal al valor deseado.
- Circuitos a caudal constante. La regulación se realiza de forma que el caudal impulsado sea el nominal. Este caudal permanecerá constante siempre. Ejemplo: circuitos de energía solar térmica
- Circuitos a caudal variable. La regulación se diseña de forma que al maniobrar de forma manual o automática las válvulas de dos vías de los elementos terminales se realice un ajuste del caudal impulsado, reduciéndose la potencia de bombeo



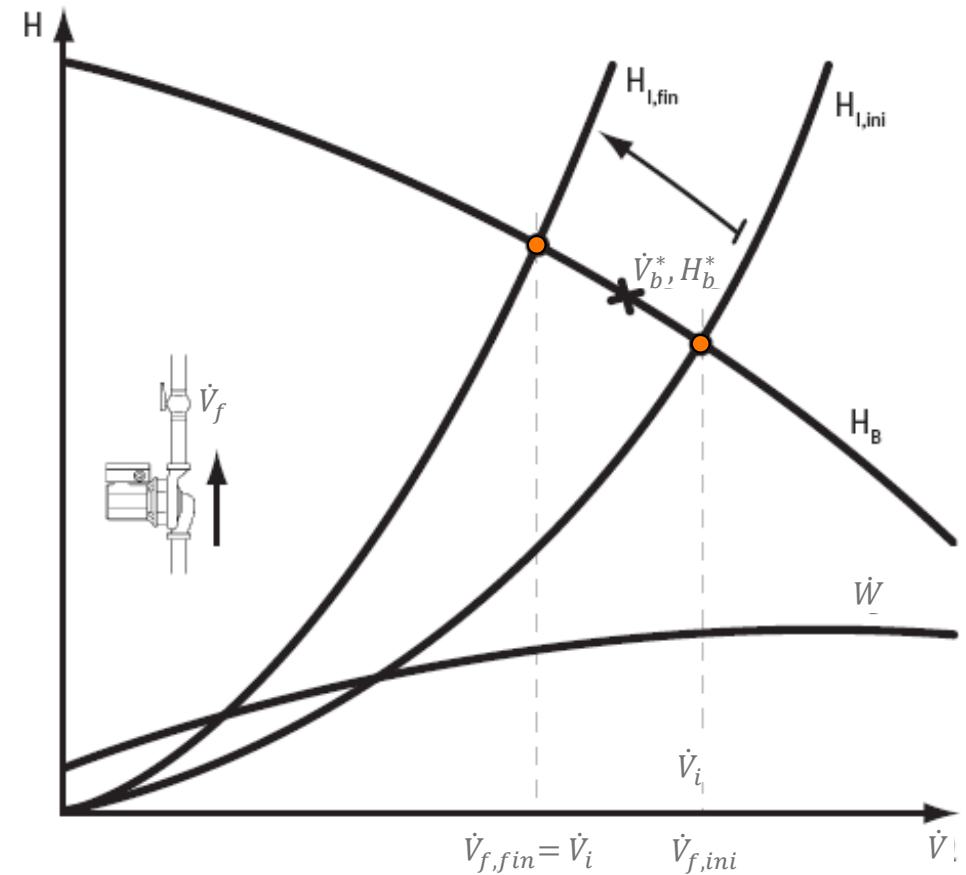
Regulación del punto de funcionamiento. Tipos

- Necesario para ajustar el caudal al valor deseado
- Tipos de regulación:
 - Regulación por válvula en serie
 - Regulación por válvula en paralelo
 - Regulación por variación de régimen de giro

Regulación del punto de funcionamiento. Válvula en serie

■ Regulación por válvula en serie:

- Consiste en modificar la apertura de la válvula situada a la salida de la bomba.
- Con ello, se modifica la curva resistente de la instalación, reduciendo el caudal de impulsión hasta el caudal deseado
- Variará el rendimiento de la bomba
- Método muy empleado pero poco eficiente, aunque se consigue reducir la energía consumida



Ejercicio 6.6. Regulación por válvula en serie

- Determinar la estrangulación a realizar en la instalación del ejemplo 6.5 para ajustar el caudal a $1,22 \text{ m}^3/\text{h}$ mediante una válvula en serie.

- Punto inicial de funcionamiento:

$$\dot{V}_f = 1,61 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$H_f = 3,98 \text{ mca};$$

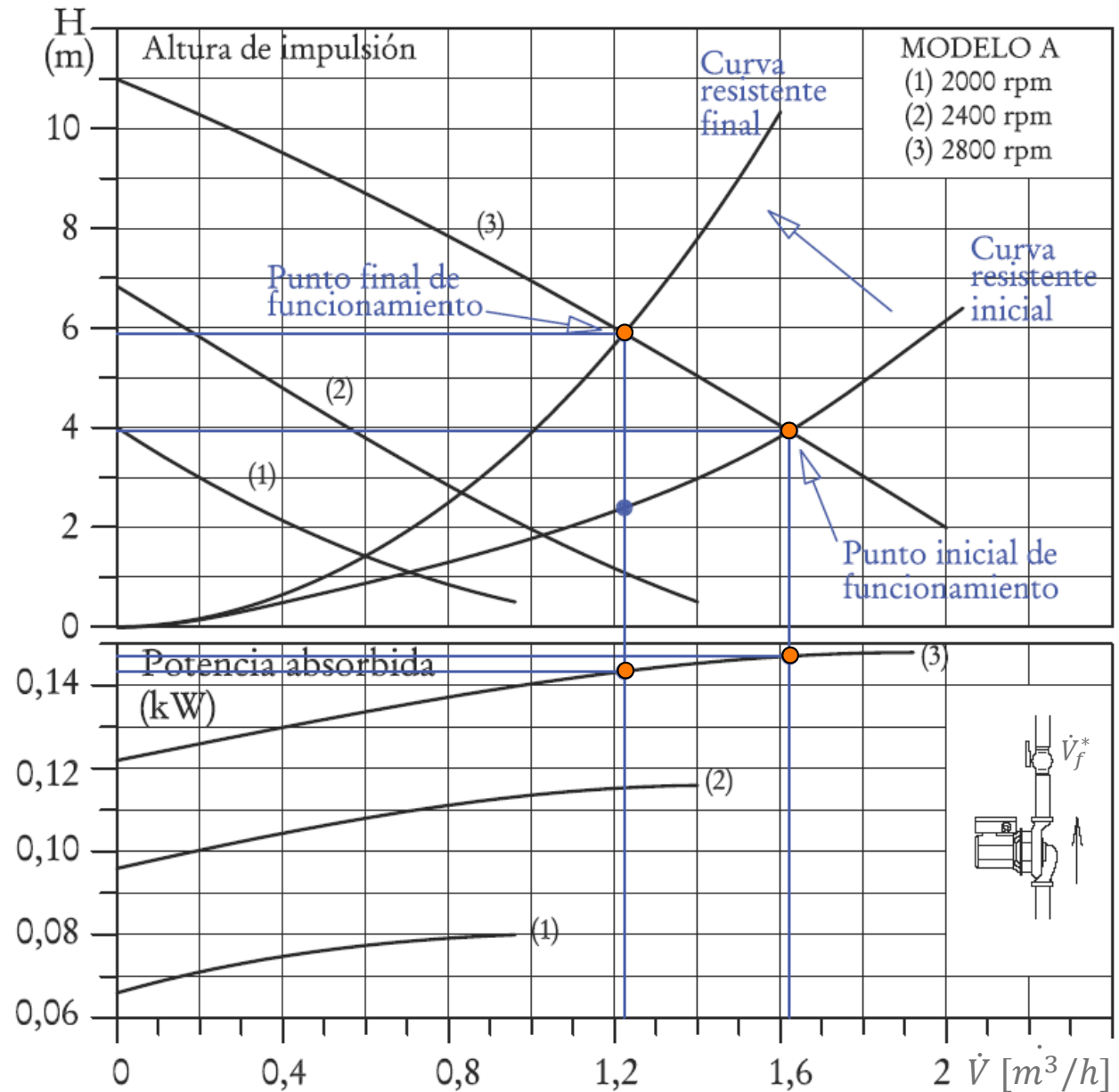
$$\dot{W} = 148 \text{ W}$$

- Punto final de funcionamiento:

$$\Downarrow \dot{V}_f = 1,22 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$\Uparrow H_f = 5,9 \text{ mca};$$

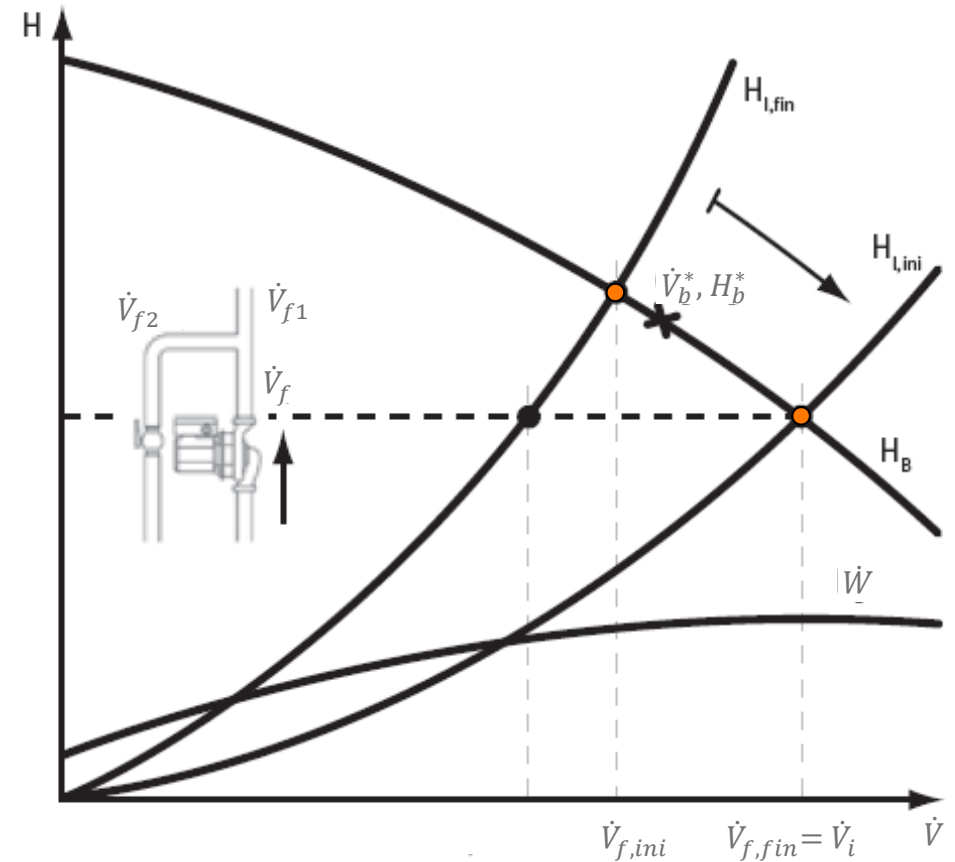
$$\Downarrow \dot{W} = 142,5 \text{ W}$$



Regulación del punto de funcionamiento. Válvula en paralelo

■ Regulación por válvula en paralelo:

- Se instala una válvula en paralelo
- Una fracción del caudal bombeado recircula desde la descarga a la aspiración de la bomba
- Se consiguen evitar sobrepresiones
- Regulación con poca eficiencia energética.
- Consume más energía





Ejercicio 6.7. Regulación por válvula en paralelo

- Determinar la regulación a realizar en la instalación del ejercicio 6.5 para ajustar el caudal a $1,21 \text{ m}^3/\text{h}$ mediante una válvula en paralelo.

- Punto inicial de funcionamiento:

$$\dot{V}_f = 1,61 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$H_f^* = 3,98 \text{ mca};$$

$$\dot{W} = 148 \text{ W}$$

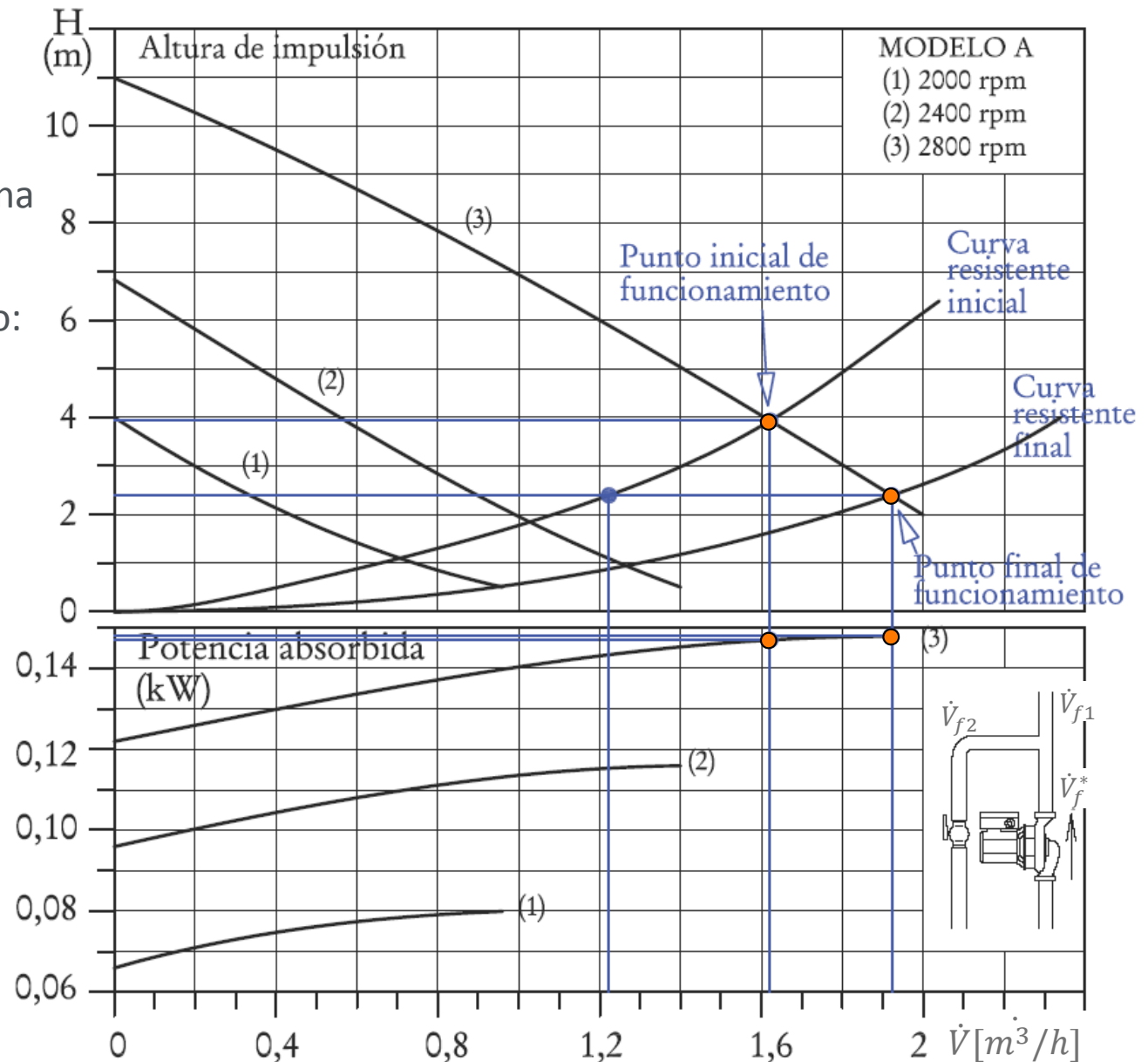
- Punto final de funcionamiento:

$$\uparrow \dot{V}_f = 1,92 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$\downarrow H_f = 2,3 \text{ mca};$$

$$\dot{W} = 148,5 \text{ W}$$

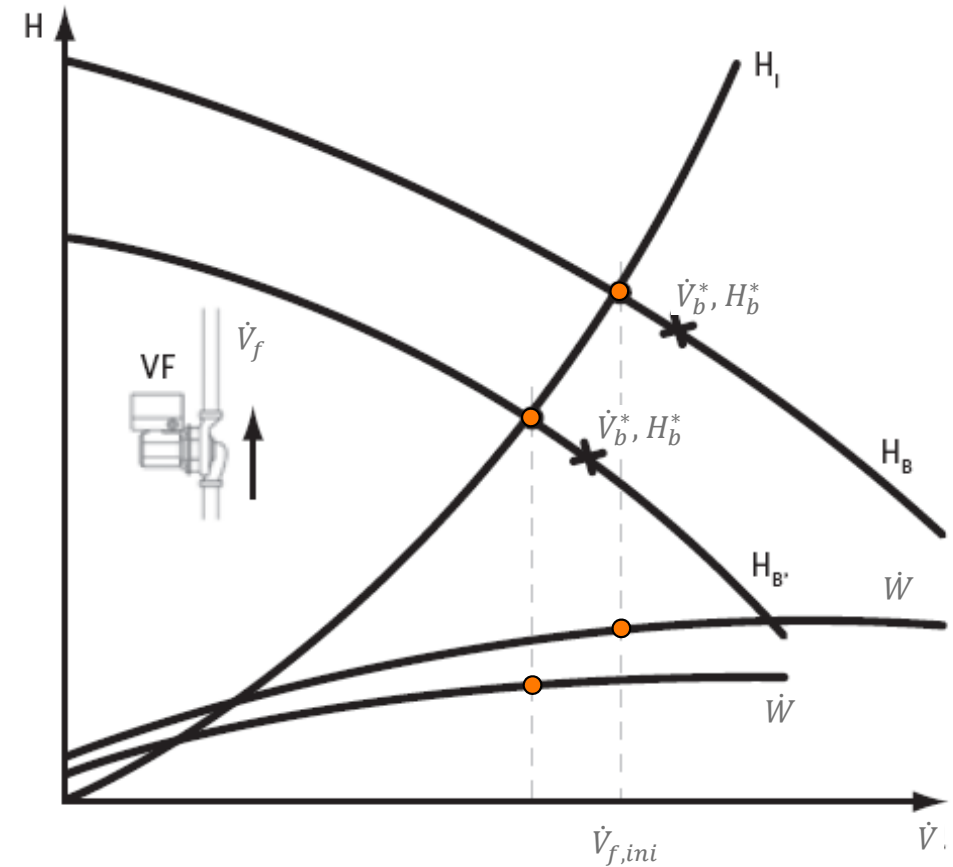
- Es decir, la bomba trasiega $1,92 \text{ m}^3/\text{h}$ de los que $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$ se recirculan para que por la instalación circulen $1,22 \text{ m}^3/\text{h}$



Regulación del punto de funcionamiento. Variación régimen de giro

■ Regulación por variación de régimen de giro:

- Al cambiar el régimen de giro cambio la curva de la bomba.
- Sistema de regulación muy eficiente, pues no introduce pérdidas adicionales
- La regulación por variador de frecuencia
- El variador consume en torno al 10% del consumo de la bomba
- No es recomendable reducir la velocidad de la bomba por debajo del 50% de la velocidad nominal
- Sistema muy interesante para instalaciones de caudal variable con regulación de elementos terminales con válvulas de dos vías





Ejercicio 6.8. Regulación por variación régimen de giro

- Analizar el funcionamiento de la instalación de bomba con variador de frecuencia

- Punto inicial de funcionamiento:

$$\dot{V}_f = 1,61 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$H_f = 3,8 \text{ mca};$$

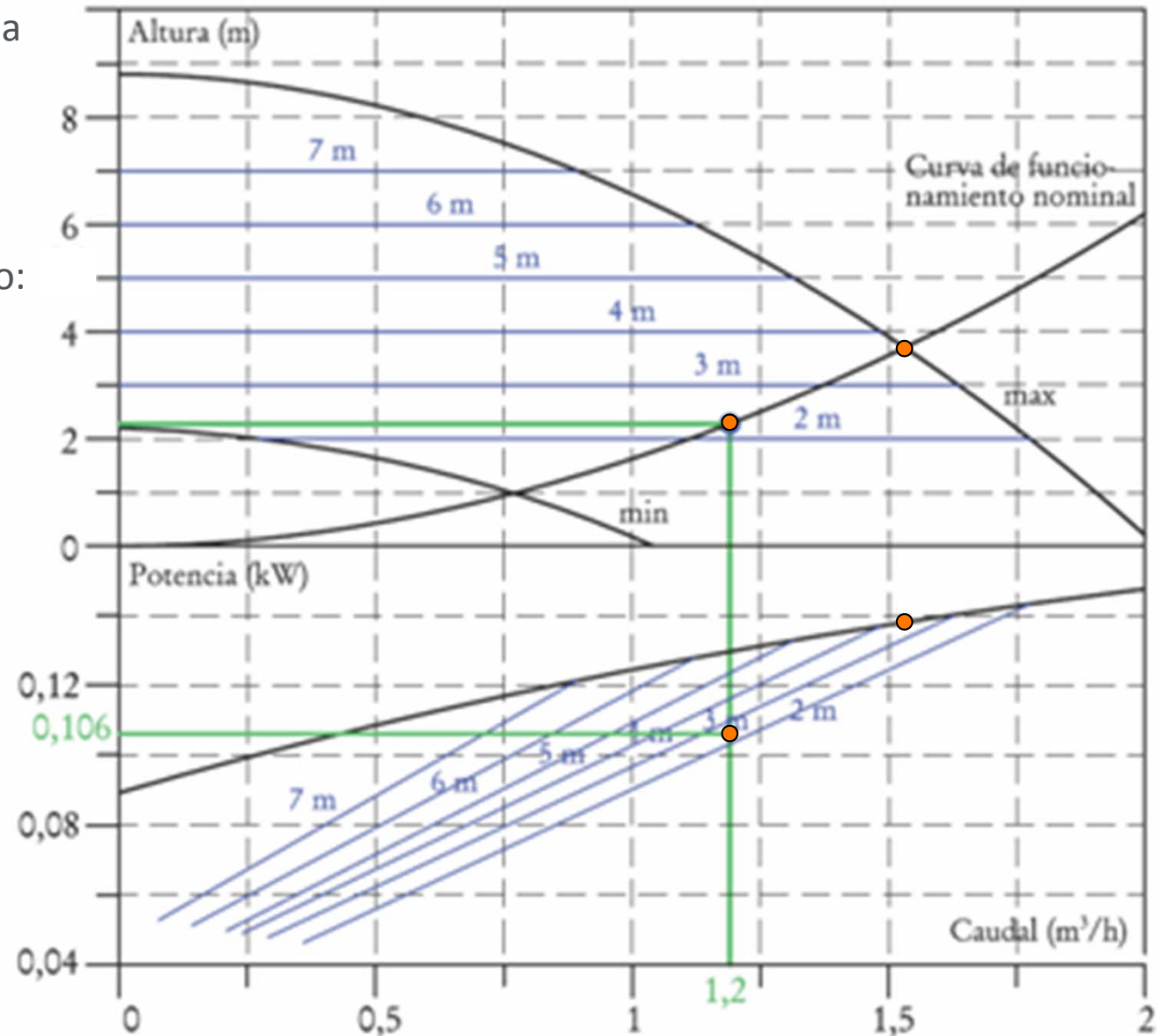
$$\dot{W} = 128 \text{ W}$$

- Punto final de funcionamiento:

$$\Downarrow \dot{V}_f = 1,2 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$\Downarrow H_f = 2,3 \text{ mca};$$

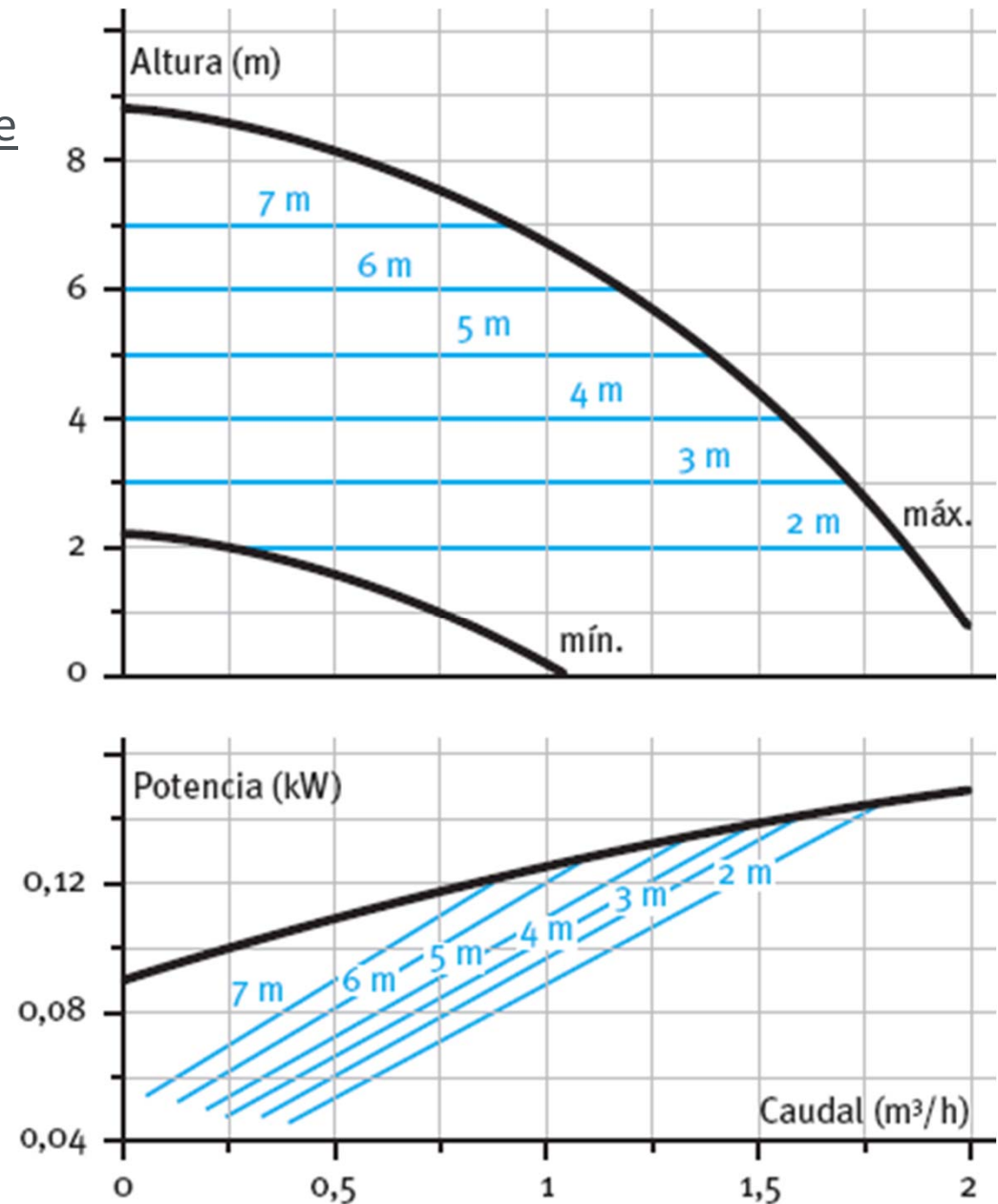
$$\Downarrow \dot{W} = 106 \text{ W}$$





Regulación del punto de funcionamiento. Variación régimen de giro

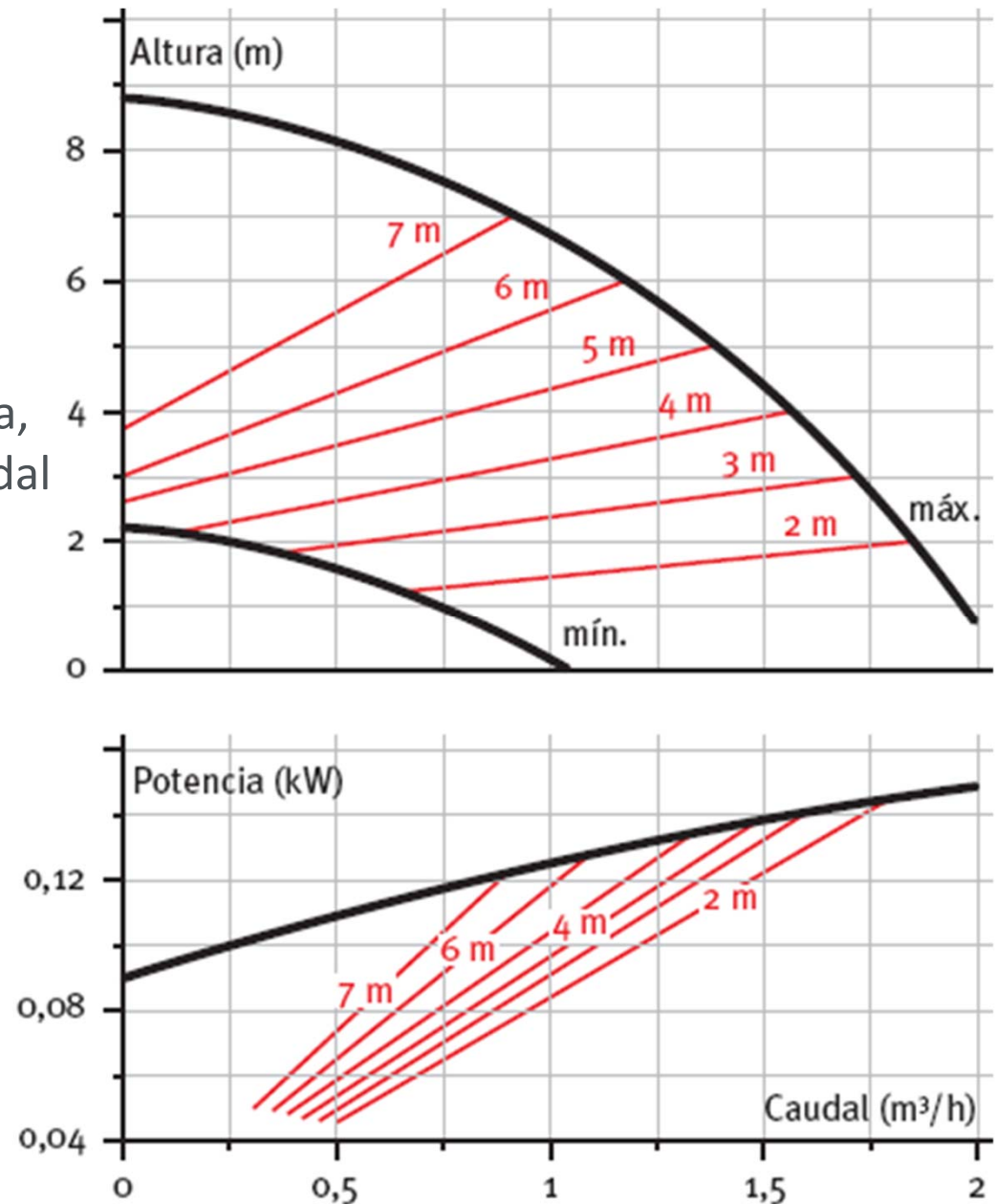
- Regulación por variación de régimen de giro por presión diferencial constante
 - La bomba mantiene la altura independientemente del caudal
 - Se evitan sobrepresiones
 - Se evitan ruidos por exceso de velocidad
 - Disminuye la energía consumida





Regulación del punto de funcionamiento. Variación régimen de giro

- Regulación por variación de régimen de giro por presión diferencial variable:
 - El usuario selecciona una curva correspondiente a la altura manométrica a velocidad máxima
 - Al aumentar la resistencia hidráulica, la bomba responde con menos caudal



Regulación del punto de funcionamiento (8)



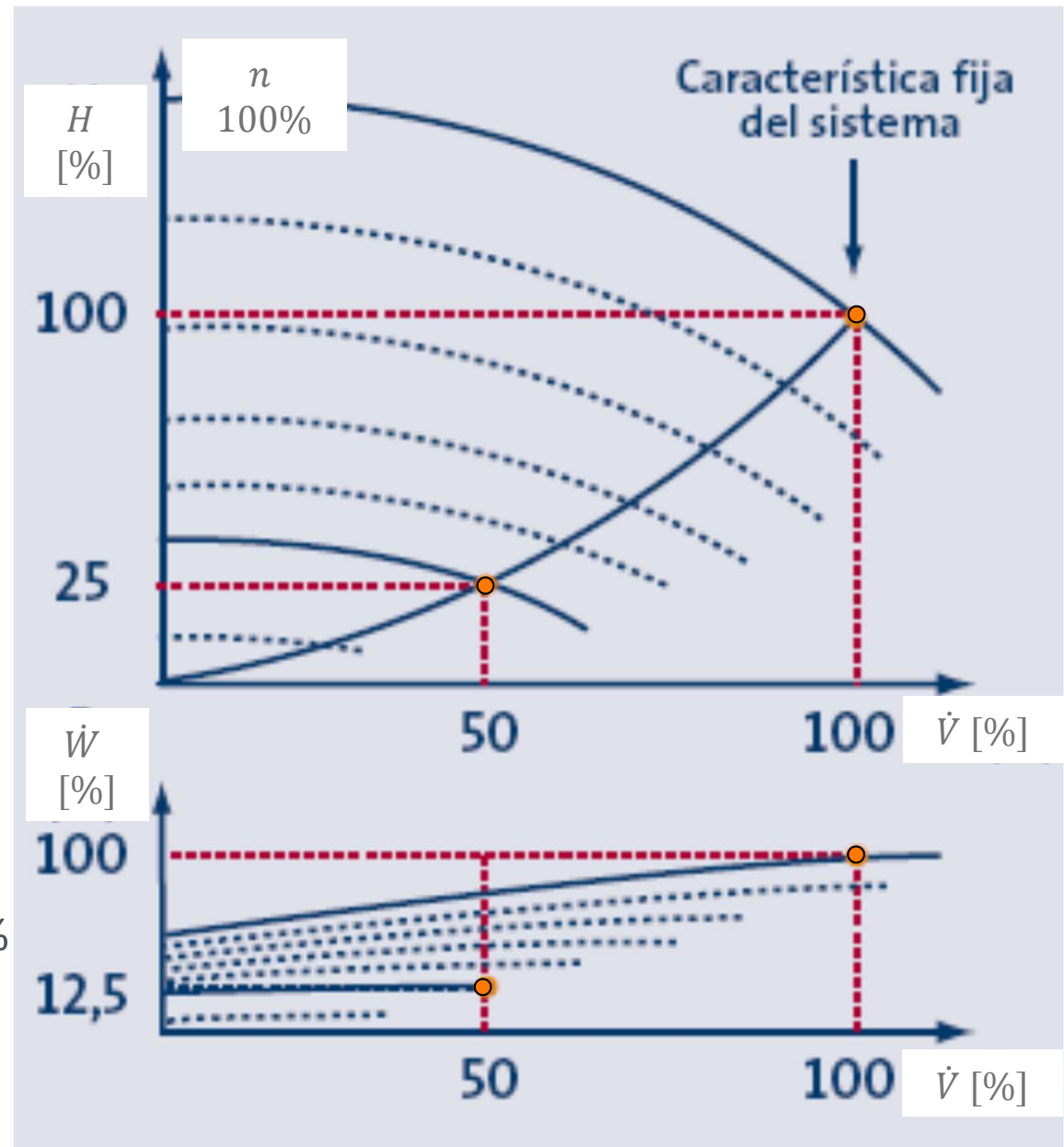
- La ley de afinidad:

$$\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$$

$$\frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

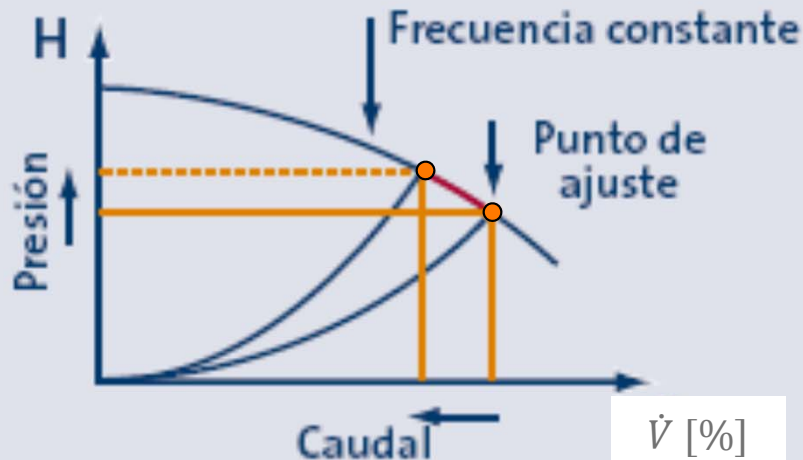
- Si se reducen las rpm, n , al 50%, se reduce el caudal, \dot{V} , 50%, se reduce la altura, H , un 25% y se reduce la potencia, \dot{W} , un 12,5%



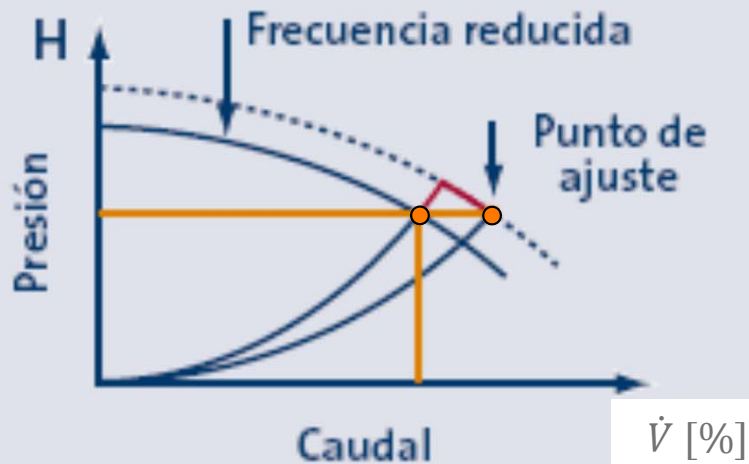
Regulación del punto de funcionamiento (9)



- Funcionamiento del control de la bomba:



1. Cuando el caudal baja, el controlador detectará un aumento de presión.

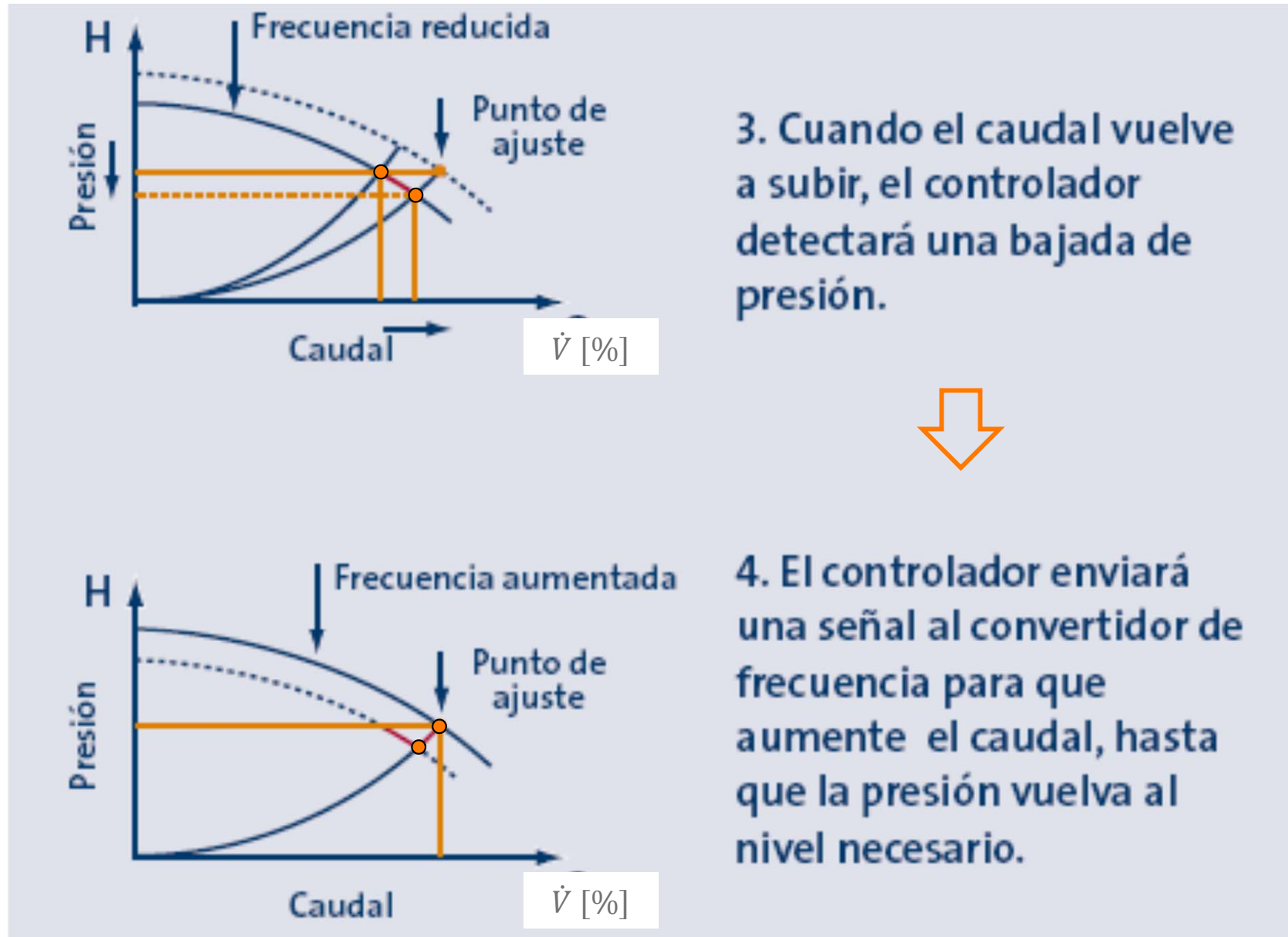


2. El controlador enviará una señal al convertidor de frecuencia para que disminuya el caudal, hasta que la presión vuelva al nivel necesario.

Regulación del punto de funcionamiento (9)



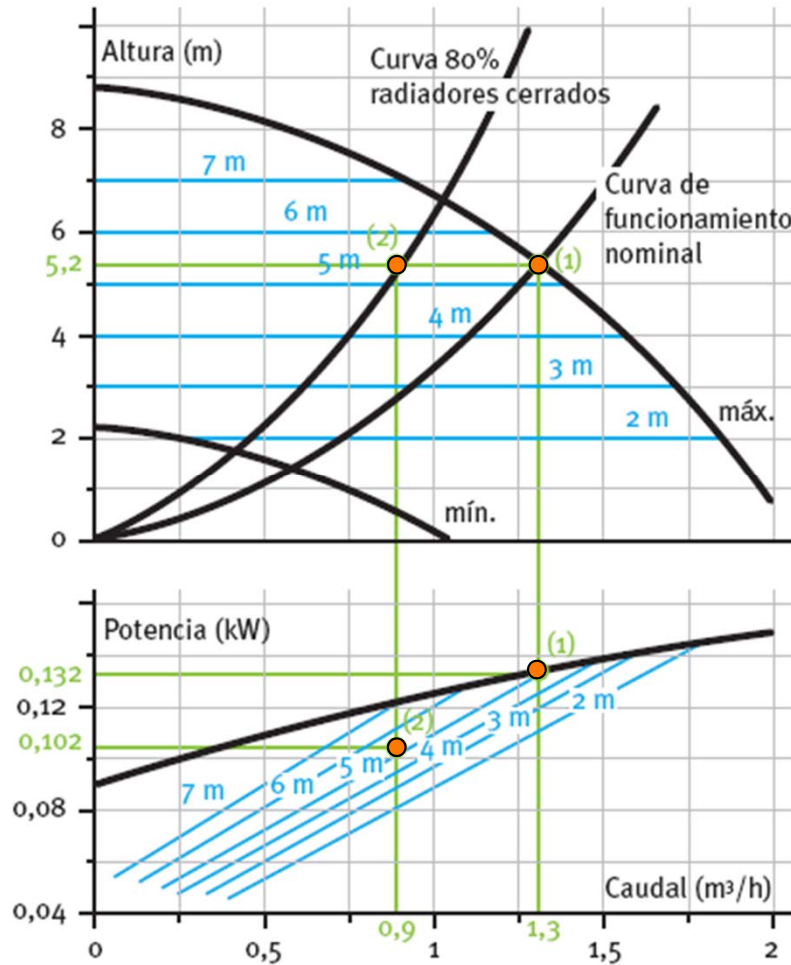
- Funcionamiento del control de la bomba:





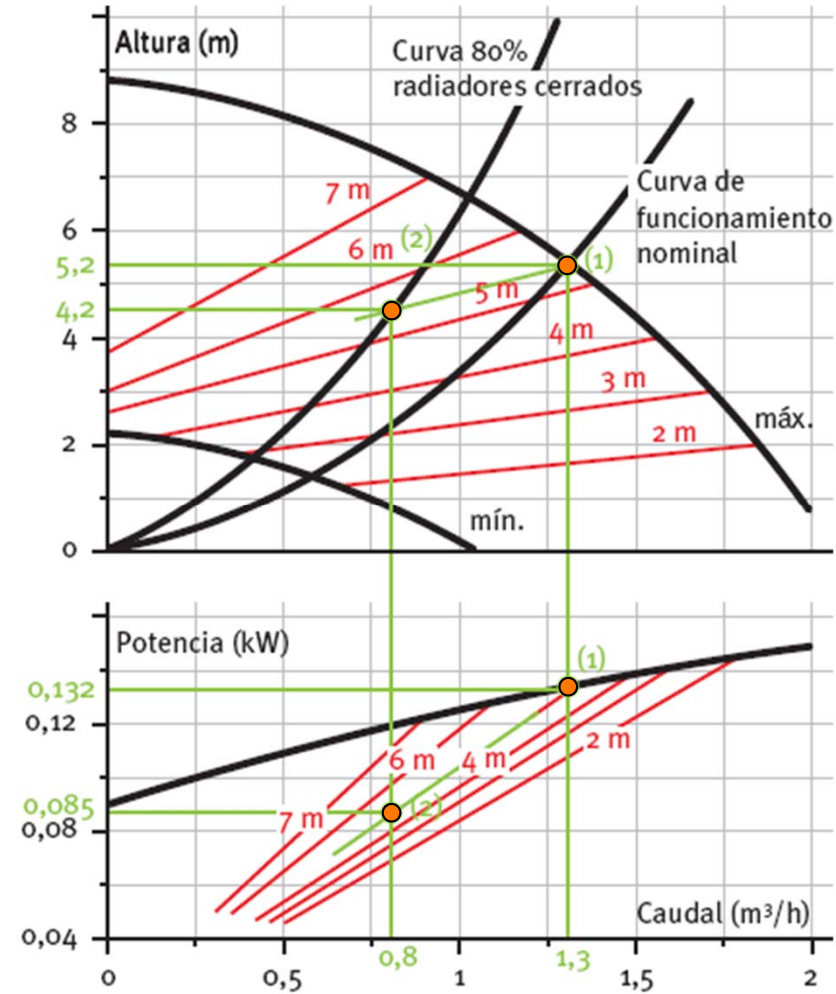
Ejercicio 6.9. Regulación del punto de funcionamiento

Reg. por presión diferencial constante



$$\begin{aligned} H_2 &= 5,2 \text{ mca} & H_1 &= 5,2 \text{ mca} \\ \dot{V}_2 &= 900 \text{ l/h} & \dot{V}_1 &= 1300 \text{ l/h} \\ \dot{W}_2 &= 0,102 \text{ kW} & \dot{W}_1 &= 0,132 \text{ kW} \end{aligned}$$

Reg. por presión diferencial variable



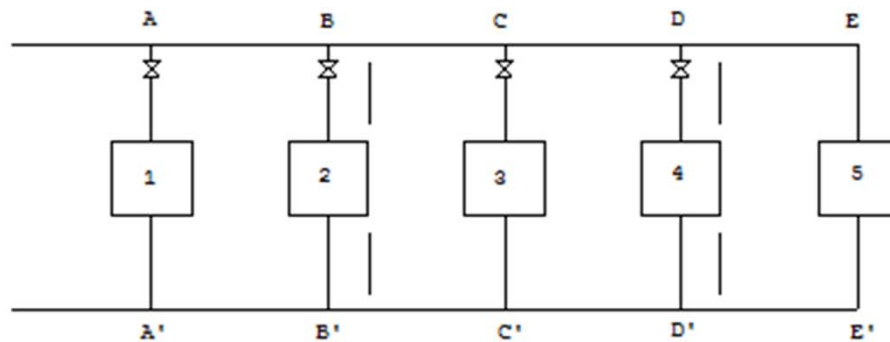
$$\begin{aligned} H_2 &= 4,2 \text{ mca} & H_1 &= 5,2 \text{ mca} \\ \dot{V}_2 &= 800 \text{ l/h} & \dot{V}_1 &= 1300 \text{ l/h} \\ \dot{W}_2 &= 0,085 \text{ kW} & \dot{W}_1 &= 0,132 \text{ kW} \end{aligned}$$

Equilibrado hidráulico de un circuito

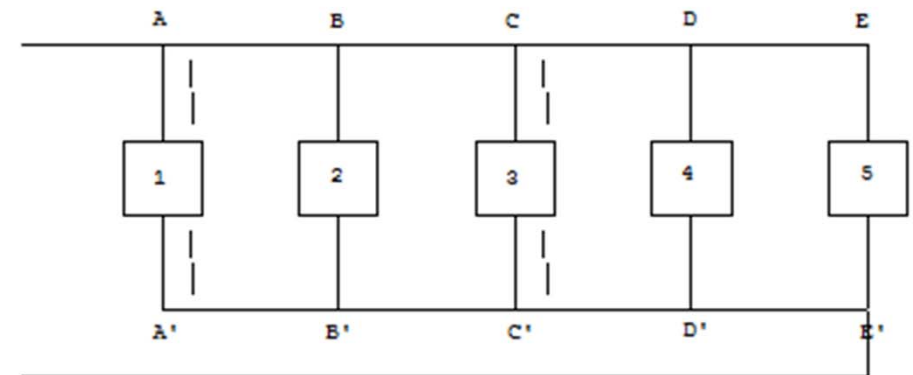


Equilibrado hidráulico

- Se realiza para que todas las unidades terminales reciban el caudal de agua de refrigeración o calefacción necesario.
- Idealmente todas las unidades terminales deberían recibir el mismo caudal de diseño.
- El equilibrado se consigue introduciendo una pérdida de carga adicional en puntos del circuito para que el caudal en cada rama se ajuste al caudal nominal de diseño.



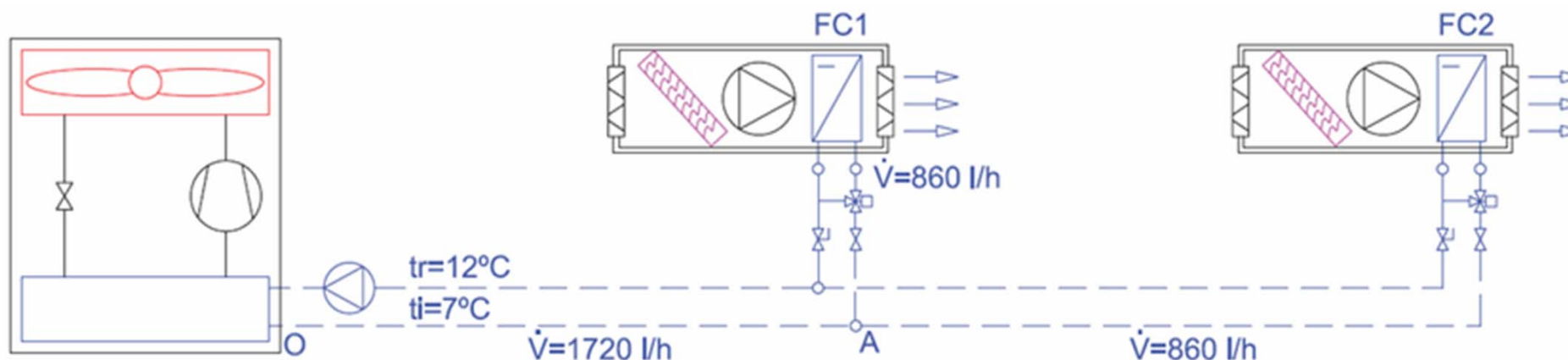
DISTRIBUCION NORMAL



RETORNO INVERTIDO



Ejercicio 6.10. Equilibrado hidráulico



TRAMO	POTENCIA kW	CAUDAL litros/hora	LONGITUD m	DIÁMETRO mm	Δ Presión unit. mm c.a / ml	Δ Presión tramo mm c.a
1 O - A	10	1720	14	28 x 1,5	51,4	720,0
2 A - FC1	5	860	6	22 x 1,0	44,2	265,1
3 A - FC2	5	860	10	22 x 1,0	44,2	441,8

Elemento	Tramos	Elementos	Δ P elem. mm c.a	Δ P tubos* mm c.a	Δ presión total mm c.a	Desequilibrio mm c.a
FC1	1 2	FC1+ EN F	1500	2561	4061	460
FC2	1 3	FC2 +EN F	1500	3021	4521	0

La pérdida de presión en los tubos es 2 veces (impulsión + retorno) de 1,3 la DP en los tramos (se considera 30% de pérdidas en accesorios)

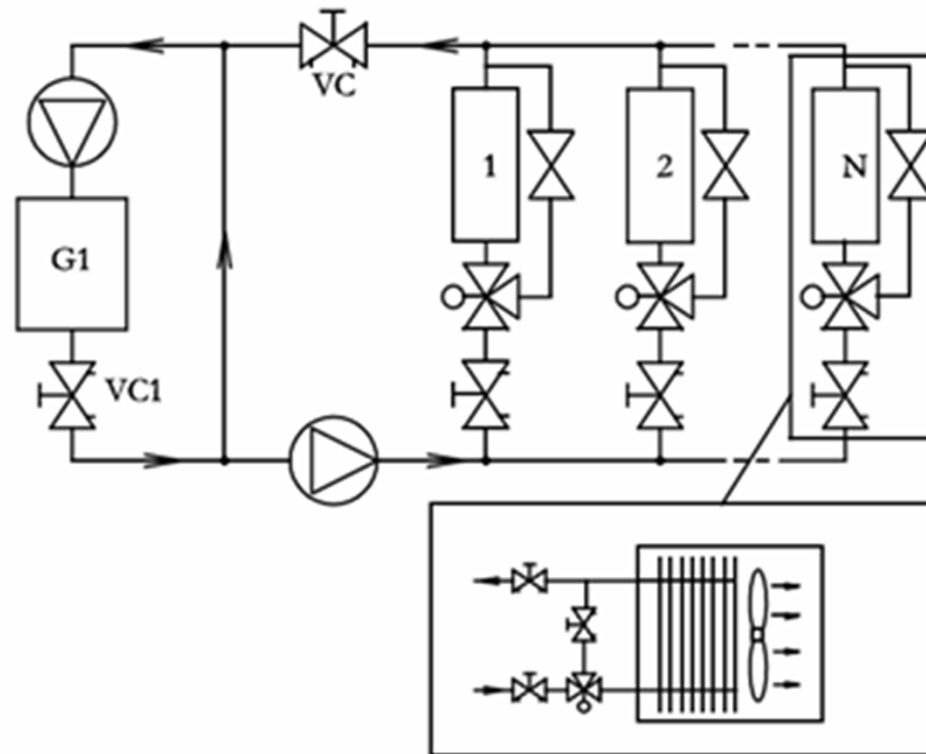


Equilibrado hidráulico

- El equilibrado se realiza mediante válvulas de control manuales o automáticas.
- Una red hidráulica equilibrada se consigue:
 - En la fase de diseño: ajustando la instalación para que sea lo más simétrica y equilibrada posible
 - En la fase de ejecución y puesta en marcha: instalando mediante válvulas de control manuales o automáticas y regulando el equilibrado de los ramales de la instalación
- El equilibrado debe realizarse:
 - Con todas las válvulas de control abiertas, caudal nominal
 - En condiciones de válvulas parcialmente abiertas. En este último caso asegurar:
 - un caudal de agua mínimo por equipos de producción térmica
 - que no se produzcan caudales elevados en ningún tramo

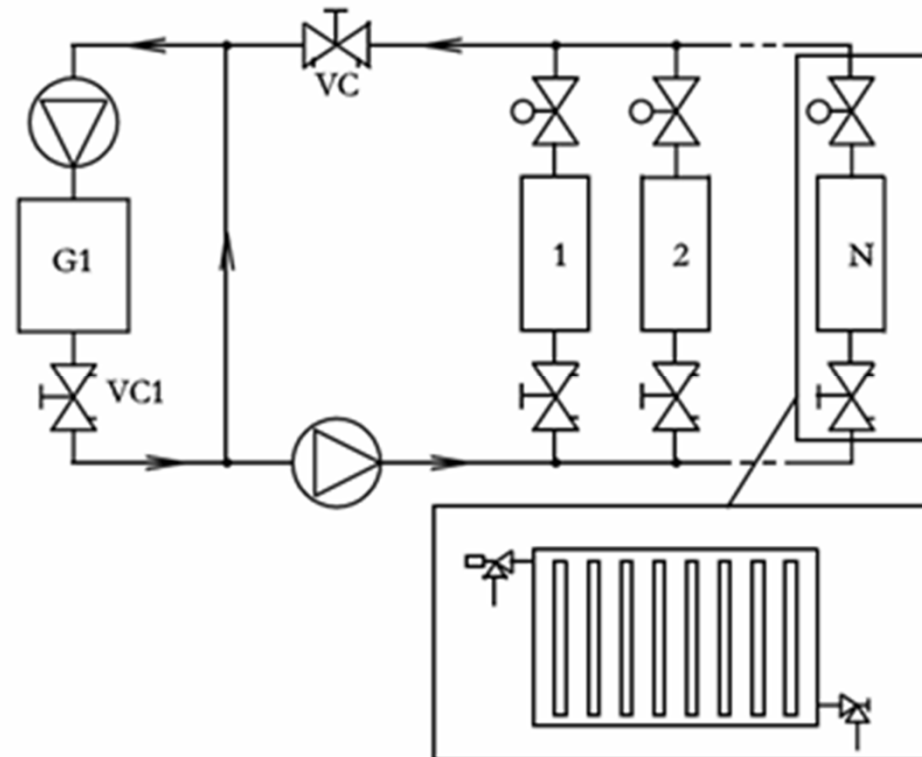
Equilibrado hidráulico. Distribución a caudal constante

- En circuitos de agua de caudal constante:
 - La válvula de control está situada antes del equipo, por ejemplo fancoil
 - El equilibrado hidráulico puede realizarse regulando la válvula de entrada a cada fancoil



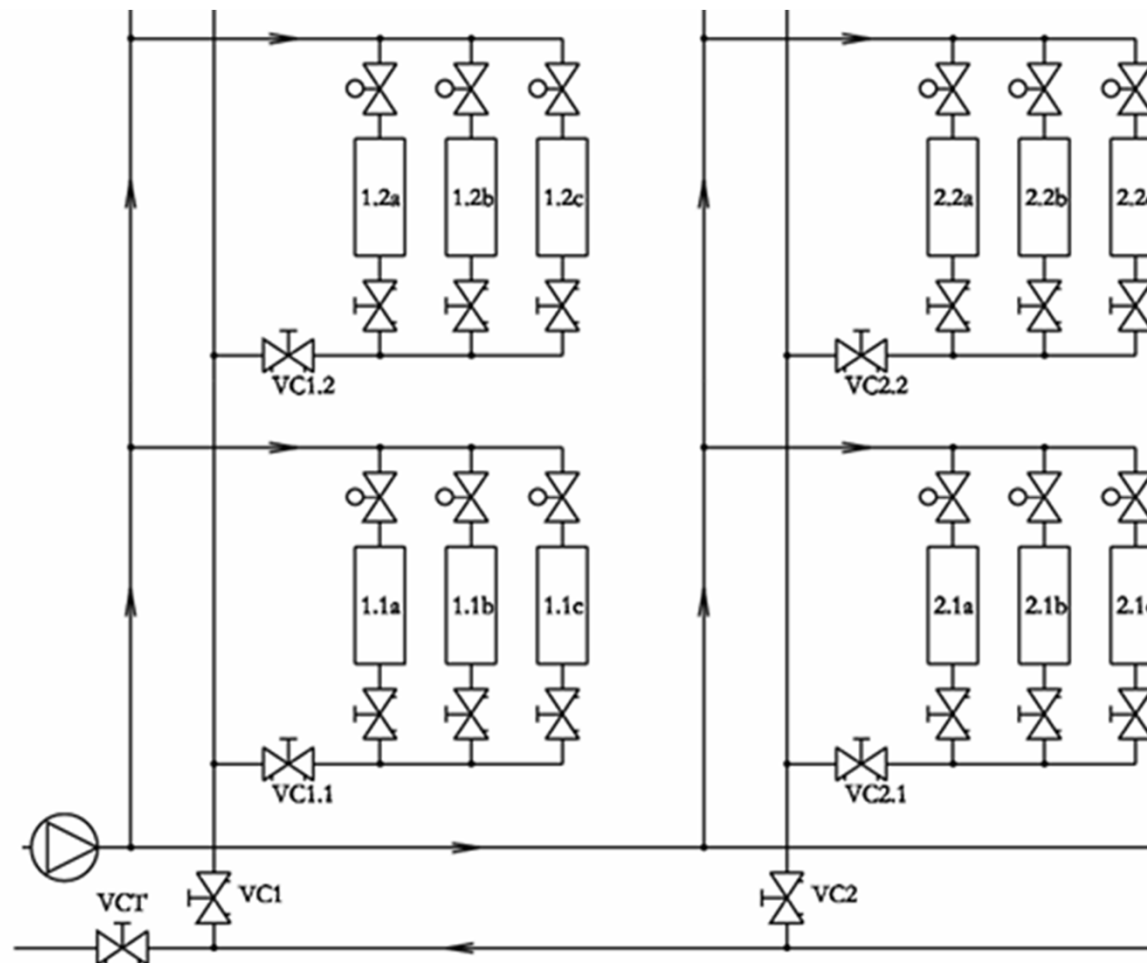
Equilibrado hidráulico. Distribución a caudal variable

- En circuitos de agua de caudal variable:
 - La válvula de control está a la salida del fancoil o radiador
 - El equilibrado hidráulico puede realizarse regulando la válvula de entrada



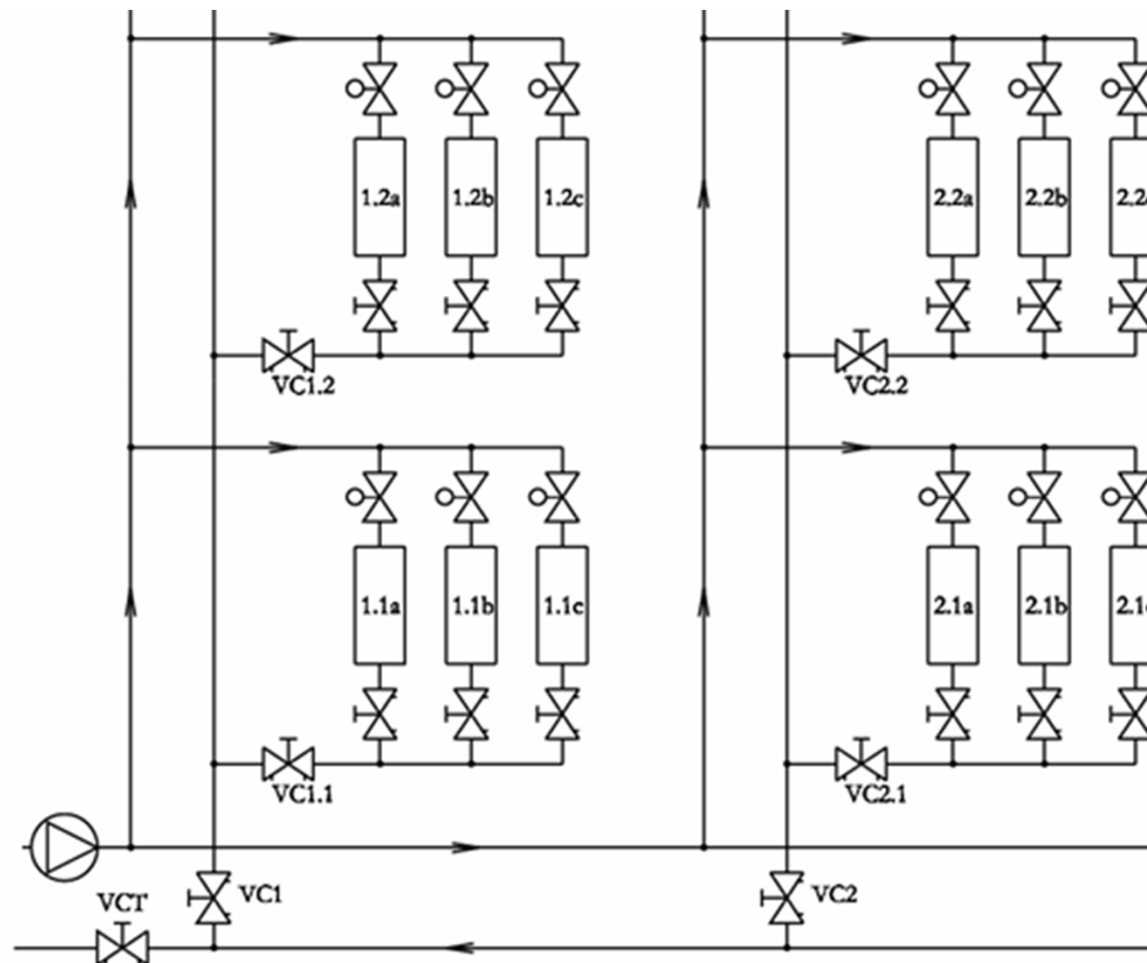
Equilibrado hidráulico. Distribución a caudal variable

- En circuitos de agua de caudal variable:
 - El caudal varía al modificarse la posición de las válvulas de control
 - Válvula de 3 vías, válvula paralelo y válvula equilibrado en serie



Equilibrado hidráulico. Distribución a caudal variable

- En circuitos de agua de caudal constante:
 - Caudal, pérdida presión y potencia de bombeo son constantes
 - En fase de regulación conlleva consumos de energías por bombeo importantes



Referencias



Referencias

- Mayoristas equipos transporte de fluidos :
 - Sedical: <http://www.sedical.com>
 - Salvador Escoda: <http://www.salvadorescoda.com>

- Fabricantes de bombas:
 - Bombas Pedrollo: <http://www.pedrollo.it/>
 - Bombas lowara <http://www.lowara.com/lowdata/doc/ES/eng-low-slutlig-ed-es.pdf>
 - Bombas Wilo: http://www.wilo.es/fileadmin/es/Downloads/pdf_entero.pdf
 - Bombas Grunfos: <http://www.grundfos.es>

- RITE. Documentos reconocidos. Guías Técnicas de instalaciones de Climatización:
 - <http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/eficienciaenergetica/rite/reconocidos/>
- Guía Técnica Nº10: Selección de equipos de transporte de fluidos:
 - http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10_Guia_tecnica_seleccion_de_equipos_de_transporte_de_fluidos_Bombas_y_ventiladores_758f070c.pdf

manuel.ruiz@uco.es

