



# SISTEMAS DE REGULACIÓN. EN ESTACIONES DE BOMBEO

Jorge García-Serra  
Instituto Tecnológico del Agua  
Universidad Politécnica de Valencia

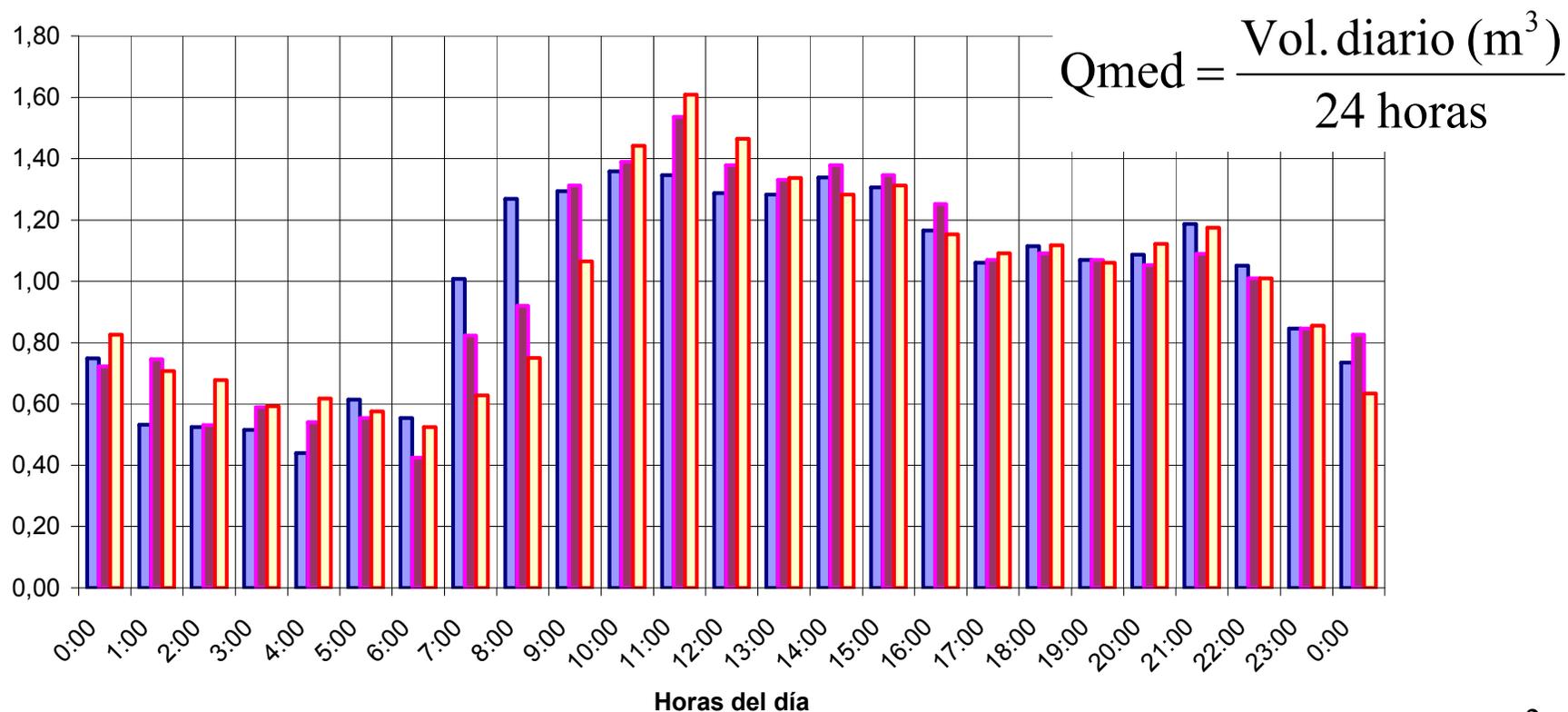
Mayo 2010

# NECESIDAD DE REGULACIÓN Y CONTROL EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA (RDA)

En una RDA las condiciones de funcionamiento son variables a lo largo del día

**Coeficientes de modulación  
media horaria  $CM(t) = Q(t)/Q_{med}$**

- Coef.modul.laborable
- Coef.modul.Sábado
- Coef.modul.Domingo

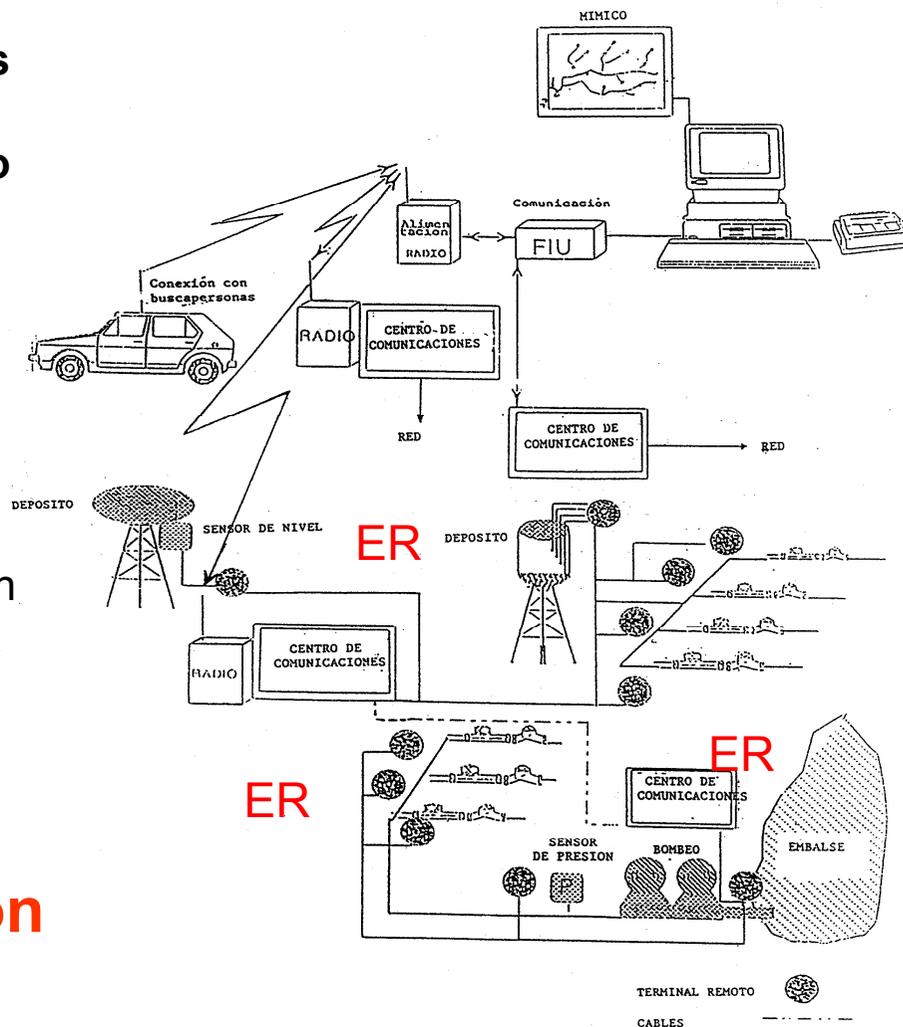


# NECESIDAD DE REGULACIÓN Y CONTROL EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA (RDA)

Mantener las variables hidráulicas (Presión, Nivel depósitos, etc, ) y de calidad (Cloro, Nitratos, etc.) dentro de unos márgenes aceptables y Minimizar los Costes Energéticos

Estación Remota  
ER

Exige disponer de un Sistema (S<sup>a</sup>) de Regulación y Control



## Establecer un Sistema de:

### **Medición** de variables para **supervisión** y **alimentación** del S<sup>a</sup> de regulación

**Hidráulicas:** Presión, Caudal, Nivel

**Mecánicas:** Contactos final de carrera, Posición válvula (% apertura)

**Calidad:** Cloro libre, pH, Turbidez...

**Eléctricas:** I, V, cos  $\phi$ , Potencia, Posición contactos

**Otras:** Temperatura, Detector presencia, etc..

## Disponer de:

### **Actuadores** (Capacidad para **modificar el funcionamiento** del S<sup>a</sup> )

**Bombas:** Arranque, Paro, Velocidad de giro

**Válvulas comandadas a distancia:** Abrir/Cerrar todo. Fijar en posiciones intermedias

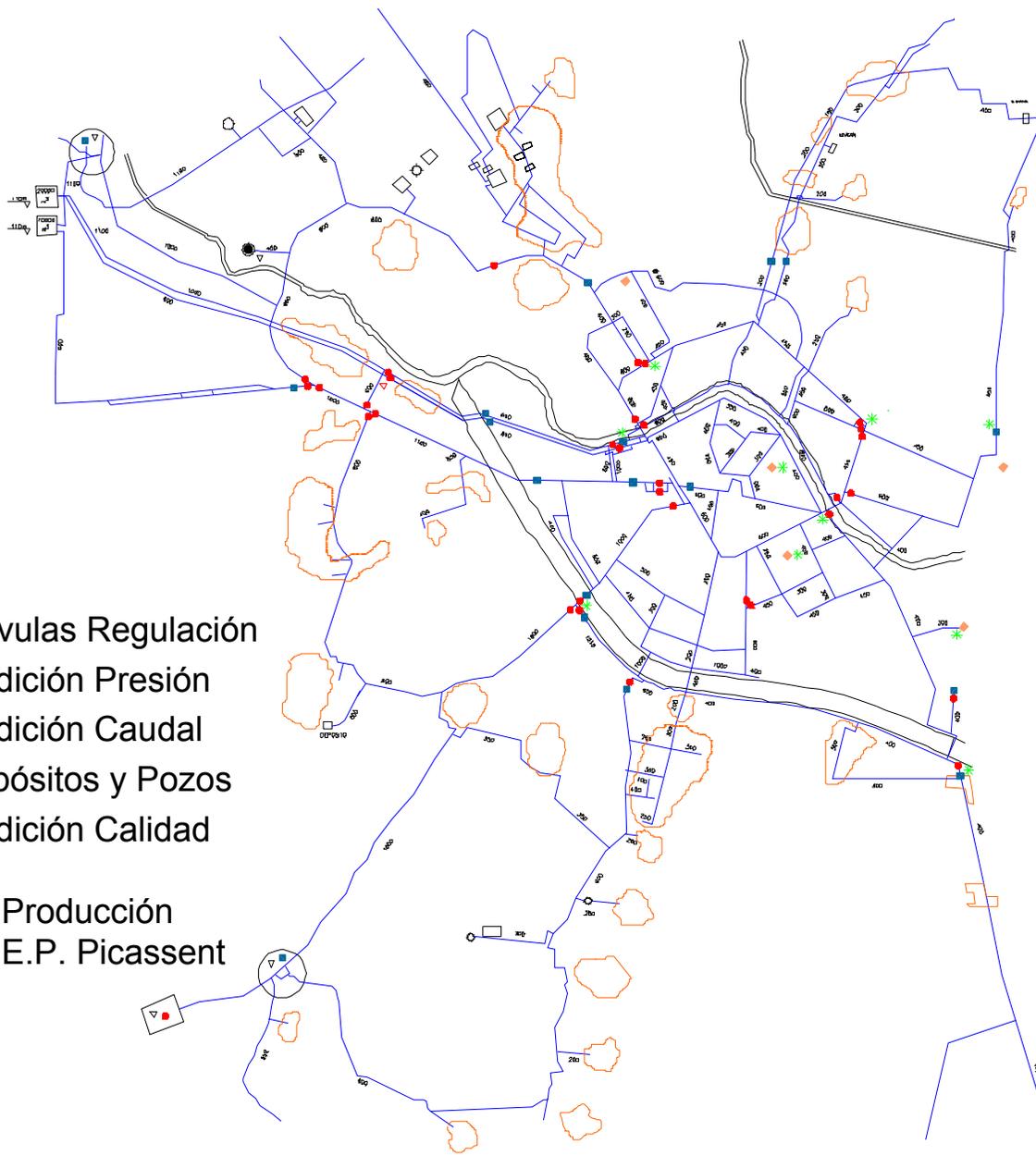
**Válvulas autónomas:** VRP, VSP, VLQ, Vál. Control depósitos

**Calidad:** Bombas Dosificadoras Cloro

## Y de:

### Capacidad de **almacenamiento** (Depósitos)

Producción  
E.P. La Presa



1.200 km tubería  
325.000 m<sup>3</sup>/día

Mar Mediterráneo

-  Válvulas Regulación
-  Medición Presión
-  Medición Caudal
-  Depósitos y Pozos
-  Medición Calidad

Producción  
E.P. Picassent

## S<sup>a</sup> DE REGULACIÓN Y CONTROL EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA (RDA)

Con todo ello se consigue una Explotación más eficiente, pues el Sistema permite:

- Minimizar Costes Energéticos
- Asegurar un Volumen de Reserva mínimo en depósitos
- Gestionar Niveles de presión (minimizar  $Q_{fuga}$ )
- Gestionar alarmas (situación de averías)
- Gestionar parámetros de calidad
- Realizar Balances volumétricos
- Etc...

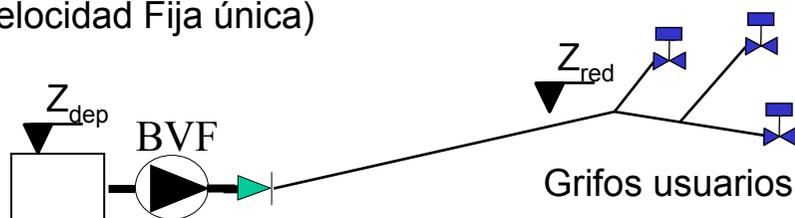
Es necesario **INVERTIR** en Regulación y Control para hacer el sistema más eficiente

# EL PUNTO DE EQUILIBRIO DE UN SISTEMA CURVA MOTRIZ vs CURVA RESISTENTE

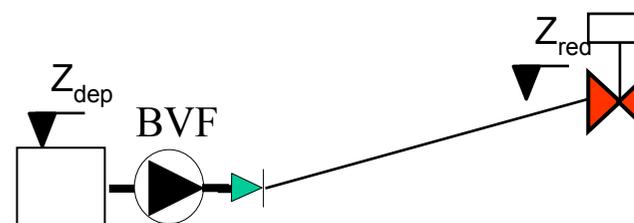
Acoplamiento curva motriz y curva resistente (sistema) da lugar a un caudal de consumo.  
La curva resistente la imponen los usuarios (puntos de consumo abiertos) o en un sistema de riego programado se impone por parte del regulador.

La curva motriz la impone la Empresa

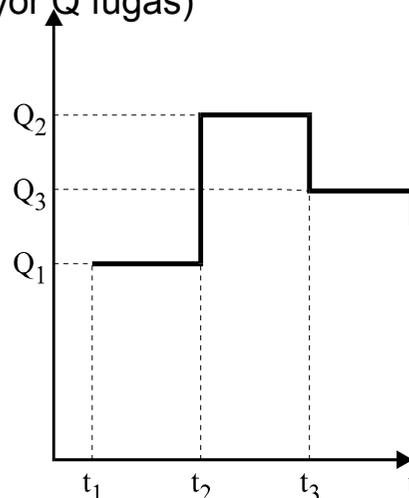
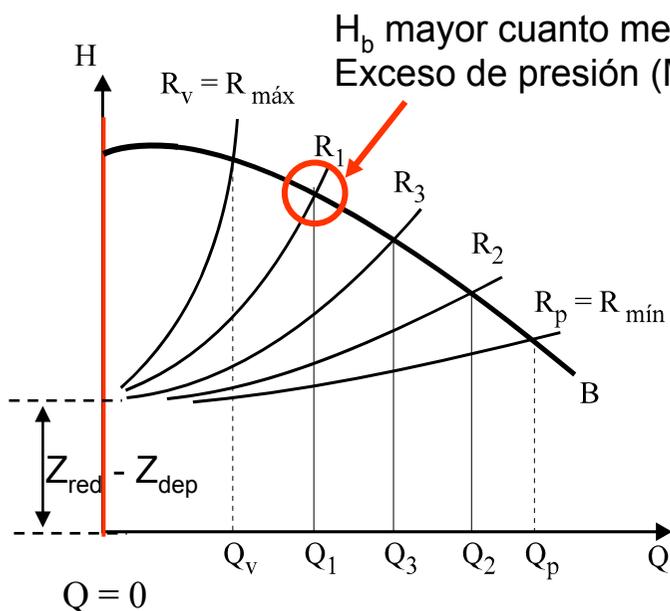
Ejemplo: Sistema simple con Curva motriz fija (Bomba Velocidad Fija única)



Sistema equivalente

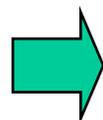


La válvula descarga a la atmósfera  
Más grifos abiertos → Válvula más abierta



Para cada caudal de consumo de la red, determinar la Altura de cabecera mínima necesaria para satisfacer las necesidades

Mantenerse sobre CC



Ahorro energético directo

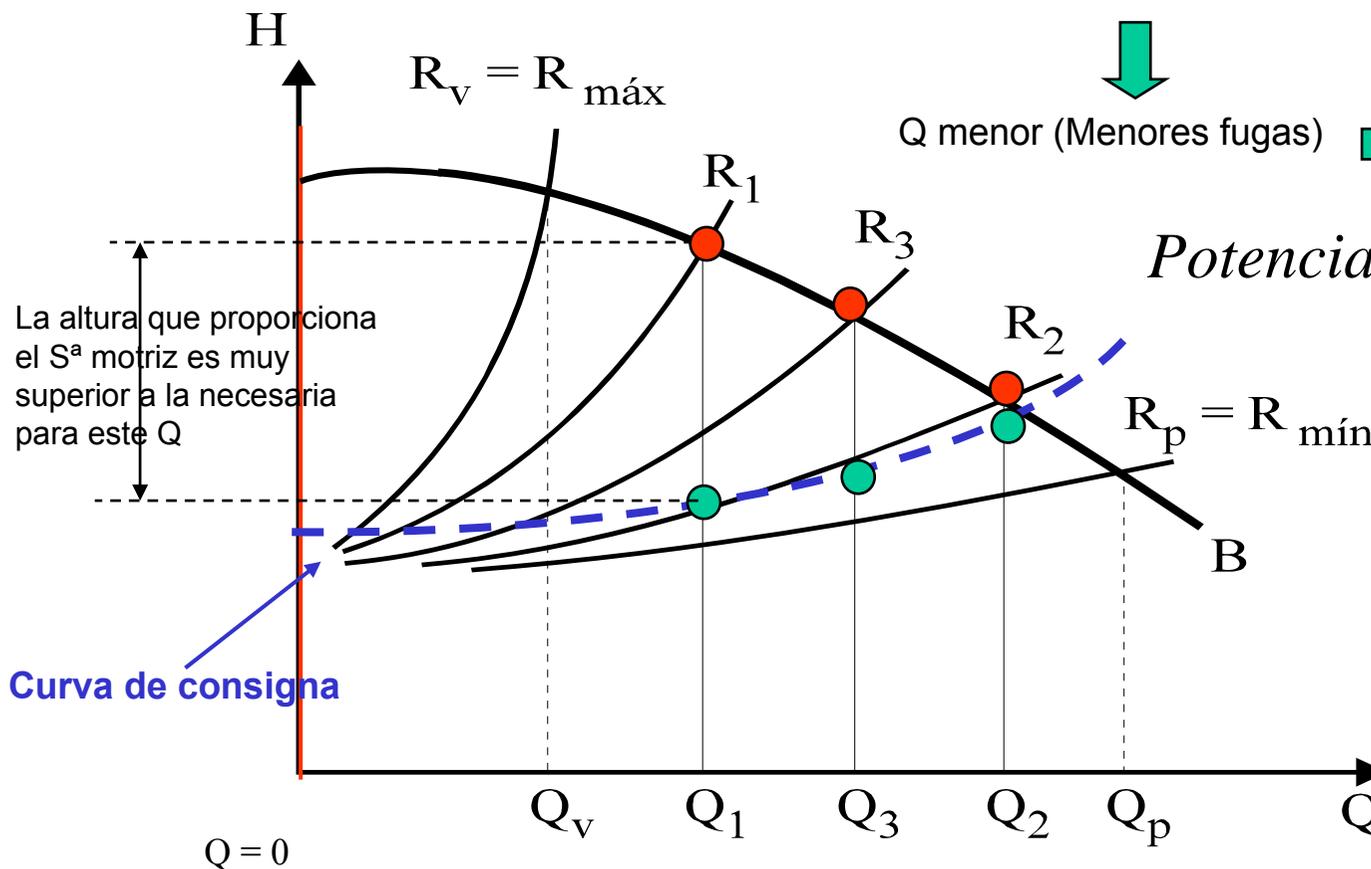
Disminuir Presión en red



Q menor (Menores fugas)



Menor Energía



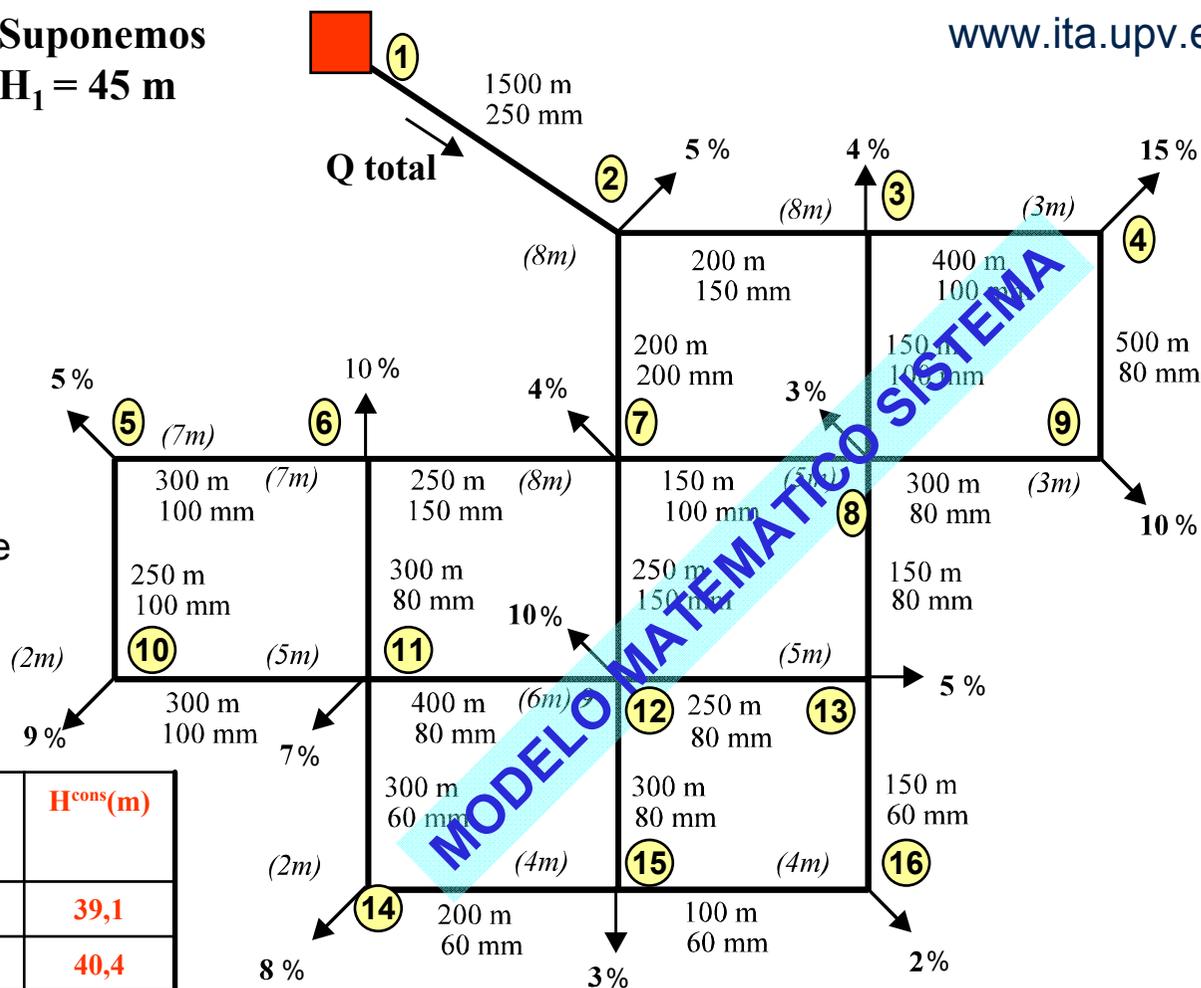
$$Potencia = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{\text{bombeo}}}{\eta}$$

Suponemos  
 $H_1 = 45 \text{ m}$

## CÁLCULO DE CURVA DE CONSIGNA 1 PUNTO ENTRADA

Variación en  $H_1$  supuesta para que  
en cualquier nudo  $P_{\min} = 30 \text{ mca}$

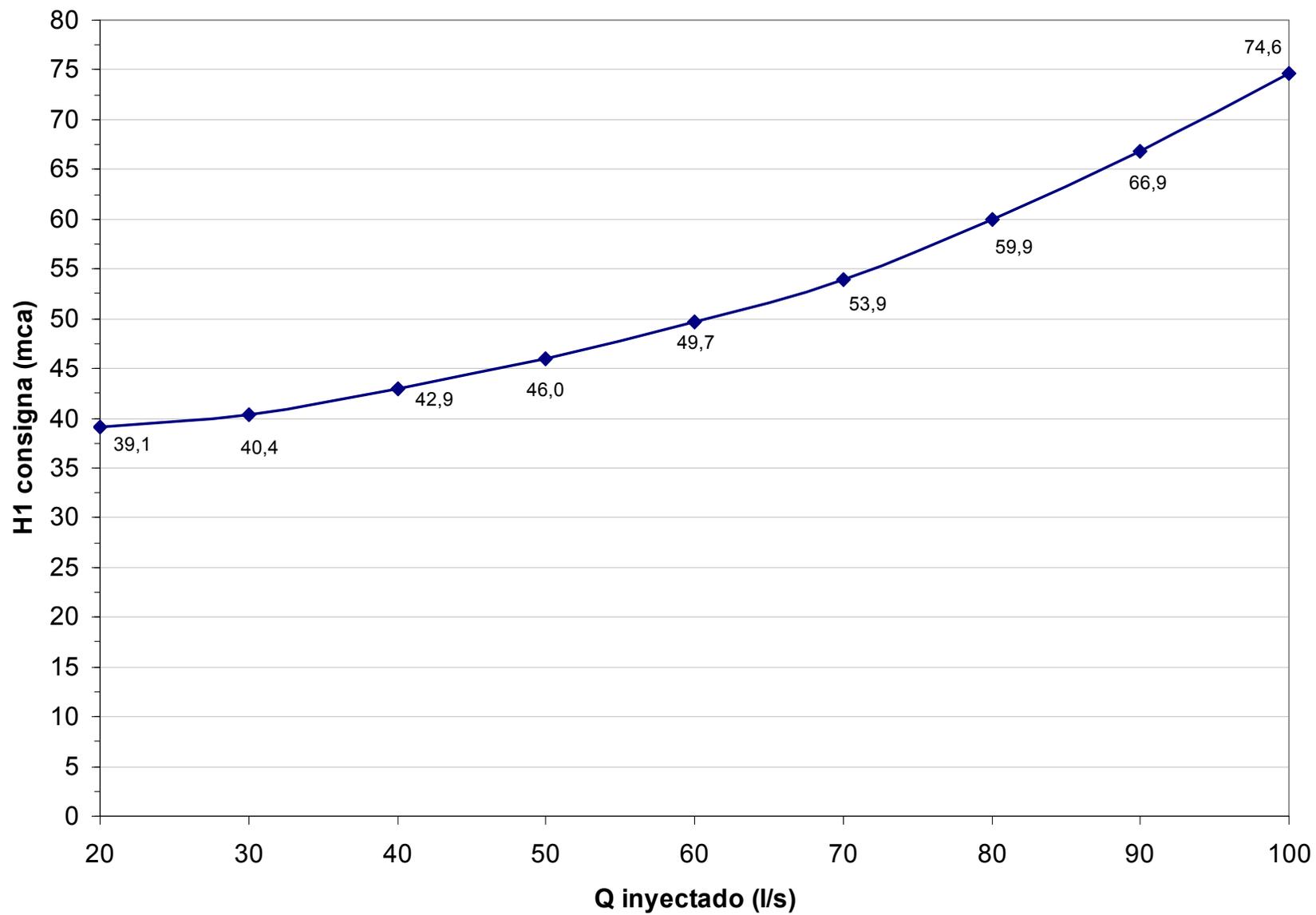
Q total (l/seg)	$P_{\min}$ (nudo)	$P_{\max}$ (nudo)	$\Delta H$	$H^{\text{cons}}(\text{m})$
20	35,86 (7)	41,25 (15)	-5,9	39,1
30	34,59 (11)	39,33 (15)	-4,6	40,4
40	32,07 (16)	36,75 (15)	-2,1	42,9
50	29,01 (16)	33,67 (6)	1	46
60	25,35 (16)	30,47 (6)	4,7	49,7
70	21,08 (16)	27,25 (6)	8,9	53,9
80	15,08 (14)	24,14 (2)	14,9	59,9
90	8,11 (14)	20,91 (2)	21,9	66,9
100	0,39 (14)	19,32 (2)	29,6	74,6



Q total máximo = 100 l/s  
 $\epsilon = 0,05 \text{ mm}$

**Presión mínima requerida = 30 mca**

## CURVA DE CONSIGNA 1 PUNTO DE ENTRADA



Suponemos  
 $H_1 = 45 \text{ m}$

## CÁLCULO DE CURVA DE CONSIGNA 2 PUNTOS ENTRADA

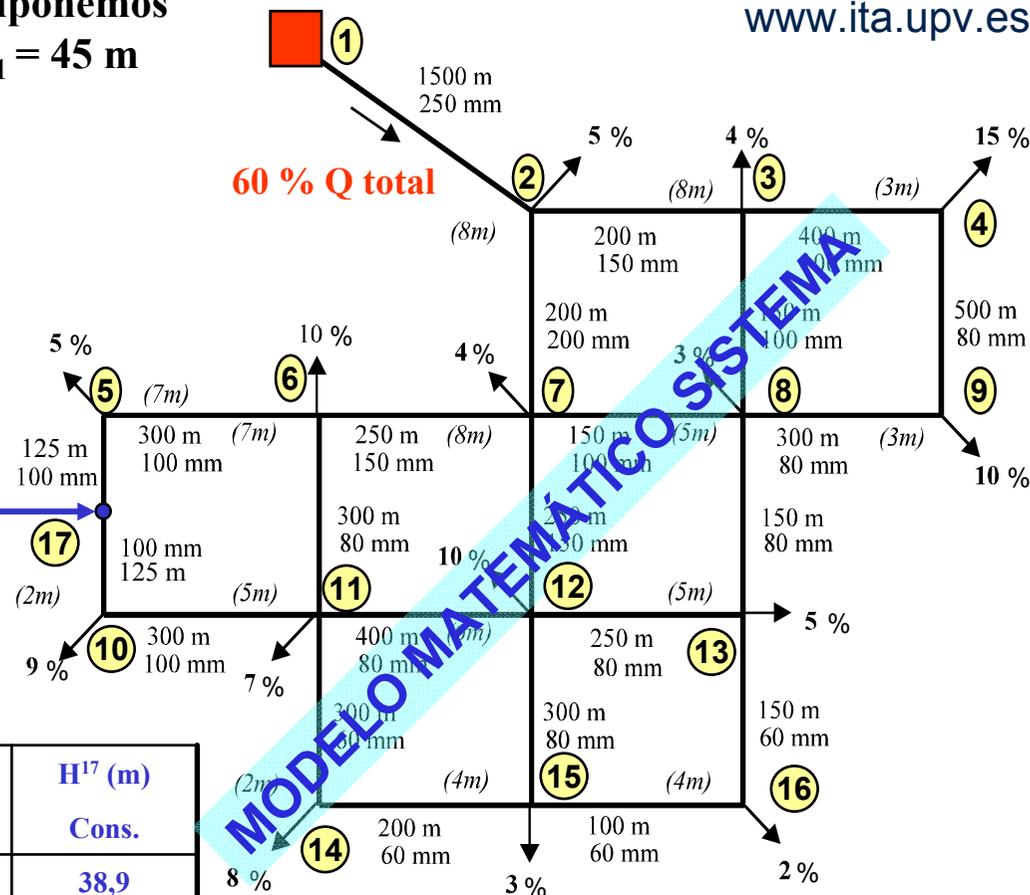
Calculamos  $H_{17}$  para  
inyectar el 40 % del  
caudal total

Variación en  $H_1$  supuesta para que  
en cualquier nudo  $P_{\text{mín}} = 30 \text{ mca}$

Cons (l/s)	$P_{\text{mín}}$ (nudo)	$P_{\text{máx}}$ (nudo)	$H^{17}$	$\Delta H$	$H^1(\text{m})$ Cons.	$H^{17}(\text{m})$ Cons.
20	36,49 (11)	42,94 (15)	41,4	-6,5	38,5	38,9
30	35,94 (11)	42,86 (15)	41,8	-5,9	39,1	39,9
40	35,2 (11)	42,77 (15)	42,3	-5,2	39,8	41,1
50	34,28 (11)	42,65 (15)	43	-4,3	40,7	42,7
60	32,49 (5)	42,52 (15)	43,8	-2,5	42,5	45,3
70	29,31 (5)	42,36 (15)	44,7	0,7	45,7	49,4
80	25,68 (5)	42,18 (15)	45,8	4,3	49,3	54,1
90	21,6 (5)	41,98 (15)	47,1	8,4	53,4	59,5
100	17,09 (5)	41,76 (15)	48,4	12,9	57,9	65,3

40 % Q total

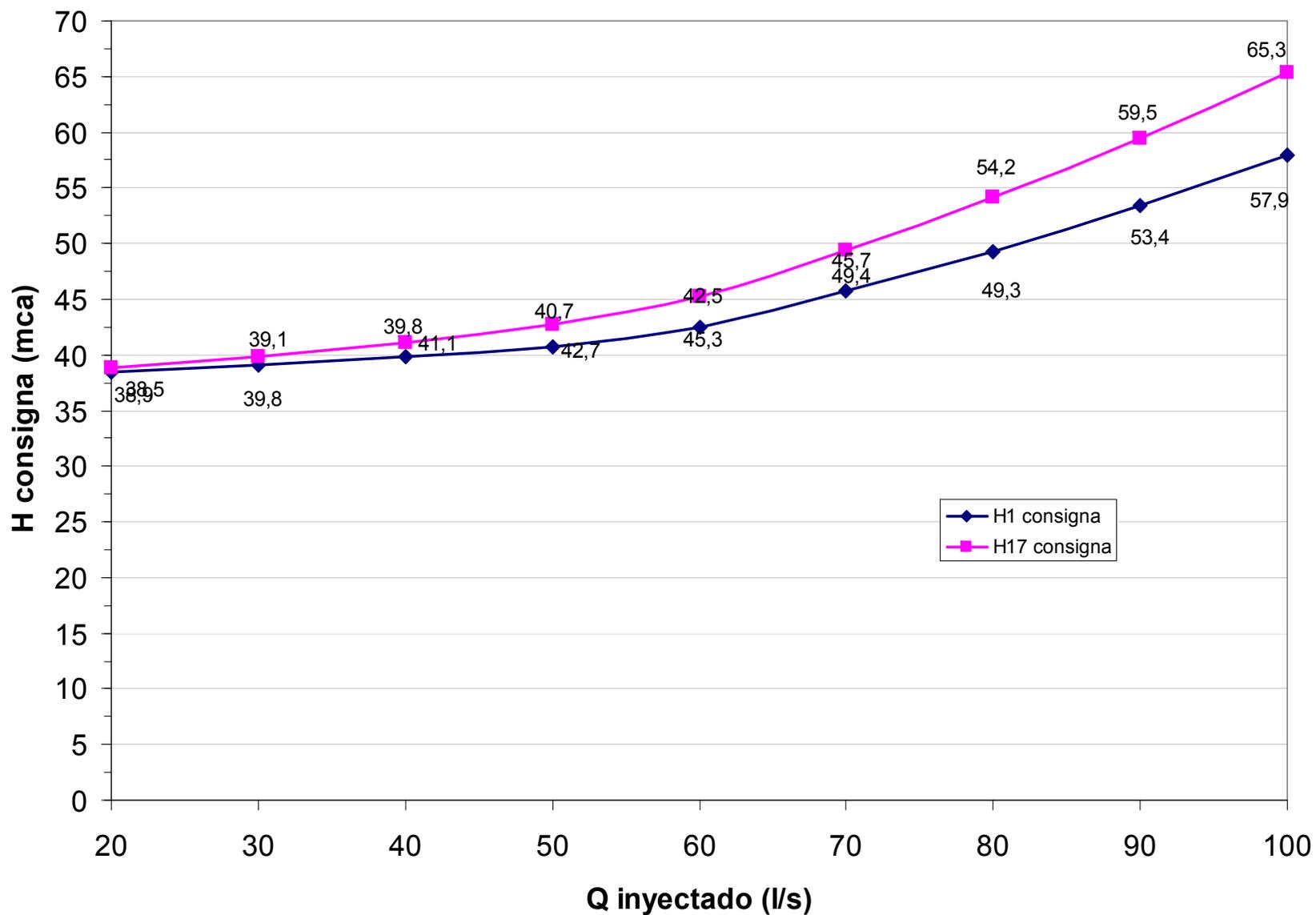
60 % Q total

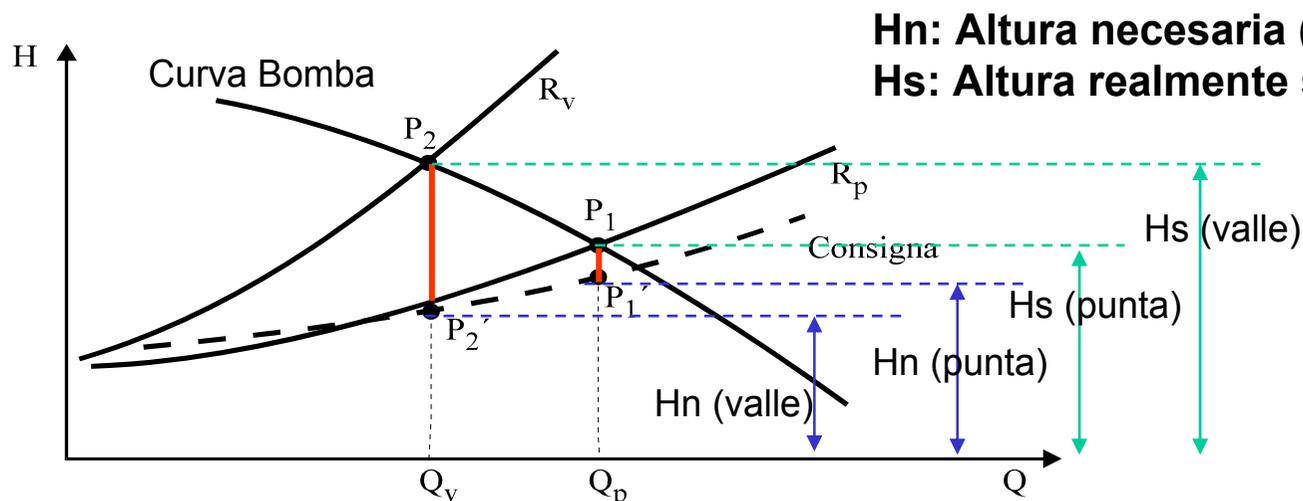


Q total máximo = 100 l/s  
 $\epsilon = 0,05 \text{ mm}$

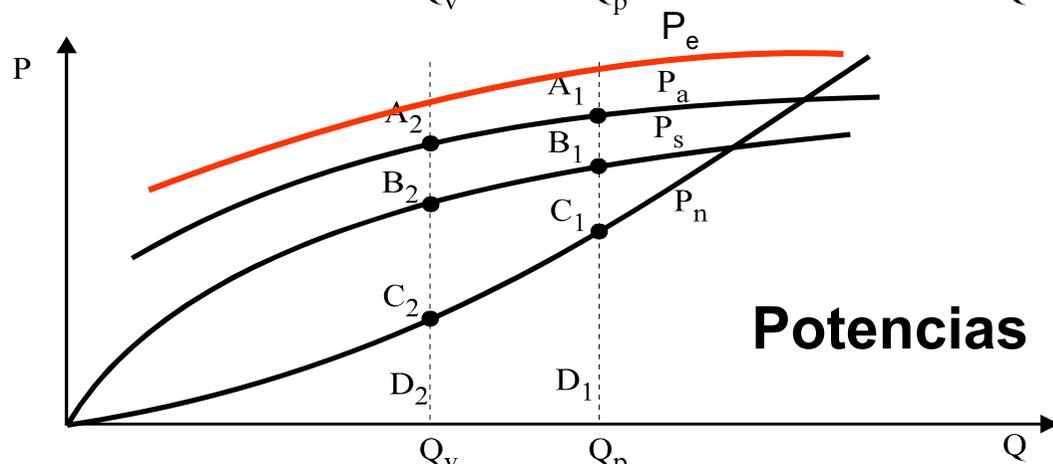
**Presión mínima requerida = 30 mca**

# CURVAS DE CONSIGNA 2 PUNTOS DE ENTRADA





$H_n$ : Altura necesaria (C. consigna)  
 $H_s$ : Altura realmente suministrada al fluido



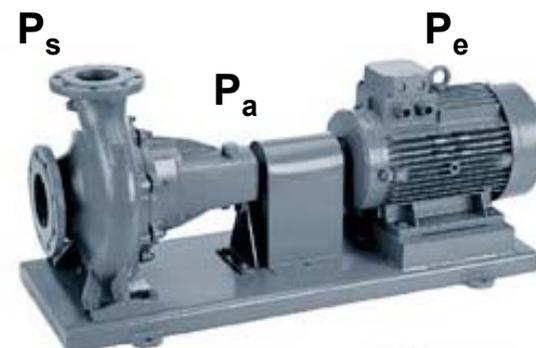
$$\eta_{reg} = P_n / P_s$$

$$\eta_{inst} = P_n / P_a$$

$$\eta_{gobal} = P_n / P_e$$

## Potencias

- $P_n$ : Potencia necesaria =  $\gamma Q H_n$
- $P_s$ : Potencia realmente suministrada al fluido =  $\gamma Q H_s$
- $P_a$ : Potencia absorbida por la bomba =  $\gamma Q H_s / \eta_{bomba}$
- $P_e$ : Potencia eléctrica consumida por la bomba =  $P_a / \eta_{motor\ eléctrico}$

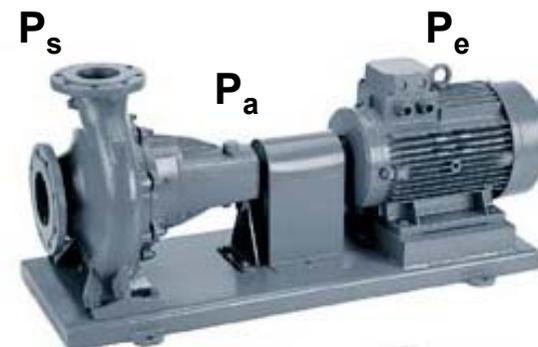


$P_n$ : Potencia necesaria =  $\gamma Q H_n$

$P_s$ : Potencia realmente suministrada al fluido =  $\gamma Q H_s$

$P_a$ : Potencia absorbida por la bomba =  $\gamma Q H_s / \eta_{\text{bomba}}$

$P_e$ : Potencia eléctrica consumida por la bomba =  $P_a / \eta_{\text{motor eléctrico}}$



## Indicadores

$$\eta_{\text{reg}} = \frac{\text{Pot. necesaria}}{\text{Pot. suministrada}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_n}{\gamma \cdot Q \cdot H_s} = 100 \% \text{ si } H_n = H_s \text{ (sobre curva consigna)}$$

$$\eta_{\text{inst}} = \frac{\text{Pot. necesaria}}{\text{Pot. absorbida}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_n}{\gamma \cdot Q \cdot H_s} = \eta_{\text{bomba}} \cdot \frac{H_n}{H_s} \quad \text{Limitado por el } \eta_{\text{bomba}}$$

$$\eta_{\text{global}} = \frac{\text{Pot. necesaria}}{\text{Pot. eléctrica}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_n}{\gamma \cdot Q \cdot H_s} = \eta_b \cdot \eta_{\text{me}} \cdot \frac{H_n}{H_s} \quad \text{Limitado por el } \eta_b \text{ y } \eta_{\text{me}}$$

$$\text{Pot. eléctrica} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_s}{\eta_b \cdot \eta_{me}}$$

$$\text{Energía específica (kw.h/m}^3\text{)} = \frac{10 \cdot H_s}{3600 \cdot \eta} = 0,0028 \cdot \frac{H_s}{\eta}$$

Tarifa energía Alta Tensión Media utilización = 0,073112 Euros/kw.h

$$\text{Coste específico (euros/m}^3\text{)} = \frac{10 \cdot H_s \cdot 0,073112}{3600 \cdot \eta} = 0,0002 \cdot \frac{H}{\eta}$$

**Para rendimiento  $\eta = 0,7$  y Altura  $H = 100$  m**

$$\text{Energía específica (kw.h/m}^3\text{)} = 0,4 \text{ kw.h/m}^3$$

$$\text{Coste específico (euros/m}^3\text{)} = 0,028 \text{ euros/m}^3$$

**Disminuyendo la  $H_s$  (acercar más a  $H$  necesaria) se puede lograr un importante ahorro energético y económico**

Teniendo en cuenta el tiempo de funcionamiento (horas  $h_i$ ) a cada potencia

$P_{n,i}$ : Potencia necesaria =  $\gamma Q_i H_{n,i}$

$P_{s,i}$ : Potencia realmente suministrada al fluido =  $\gamma Q_i H_{s,i}$

$P_{a,i}$ : Potencia absorbida por la bomba =  $\gamma Q_i H_{s,i} / \eta_{\text{bomba},i}$

$P_{e,i}$ : Potencia eléctrica consumida por la bomba =  $P_{a,i} / \eta_{\text{motor eléctrico},i}$

$$\eta_{\text{reg}} = P_n / P_s$$

$$\eta_{\text{inst}} = P_n / P_a$$

$$\eta_{\text{global}} = P_n / P_e$$

Energía = Potencia · horas

$$\eta_{\text{reg,energía}} = \frac{\sum P_{n,i} \cdot h_i}{\sum P_{s,i} \cdot h_i}$$

$$\eta_{\text{inst,energía}} = \frac{\sum P_{n,i} \cdot h_i}{\sum P_{a,i} \cdot h_i}$$

$$\eta_{\text{global,energía}} = \frac{\sum P_{n,i} \cdot h_i}{\sum P_{e,i} \cdot h_i}$$

## Coste

Llamando  $\epsilon_i$  al coste en euros/Kw.h de cada intervalo horario  $h_i$

$$\eta_{\text{reg,coste}} = \frac{\sum P_{n,i} \cdot h_i \cdot \epsilon_i}{\sum P_{s,i} \cdot h_i \cdot \epsilon_i}$$

$$\eta_{\text{inst,coste}} = \frac{\sum P_{n,i} \cdot h_i \cdot \epsilon_i}{\sum P_{a,i} \cdot h_i \cdot \epsilon_i}$$

$$\eta_{\text{global,coste}} = \frac{\sum P_{n,i} \cdot h_i \cdot \epsilon_i}{\sum P_{e,i} \cdot h_i \cdot \epsilon_i}$$

## TARIFAS ELÉCTRICAS REGULADAS

**Tabla 18.3** Tabla de tarifas eléctricas de Alta Tensión

TARIFAS DE ALTA TENSIÓN (> 1000 V)			
Rangos de Tensiones	Utilización		
	Corta	Media	Larga
General menor de 36 kV	1.1	2.1	3.1
General entre 36 y 72.5 kV	1.2	2.2	3.2
General entre 72.5 y 145 kV	1.3	2.3	3.3
General mayor de 145 kV	1.4	2.4	3.4

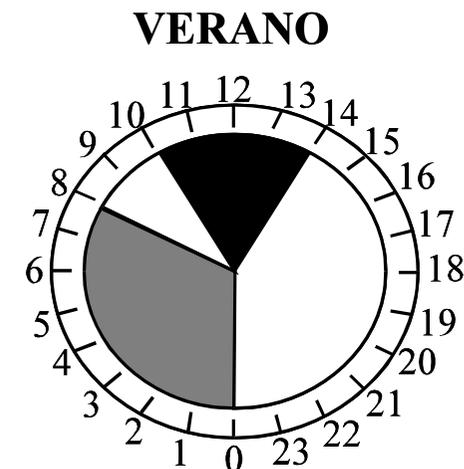
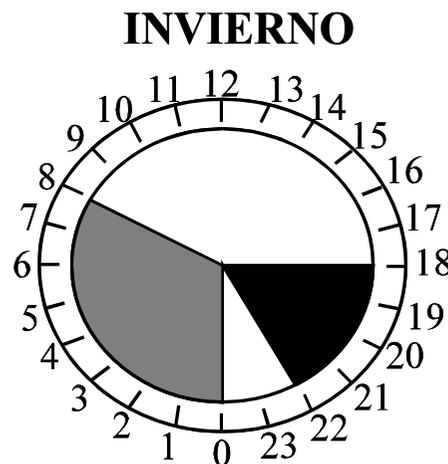
**Tabla 18.4** Tabla de tarifas eléctricas de Baja Tensión

TARIFAS DE BAJA TENSIÓN (<1000 V)	
Tipo de Tarifa	Rango de Potencia y utilización
1.0	Potencia hasta 770W
2.0	General, potencia menor de 15 kW
3.0	General de utilización normal
4.0	General de larga utilización
B.0	Alumbrado público

# TARIFAS ELÉCTRICAS REGULADAS DISCRIMINACIÓN HORARIA

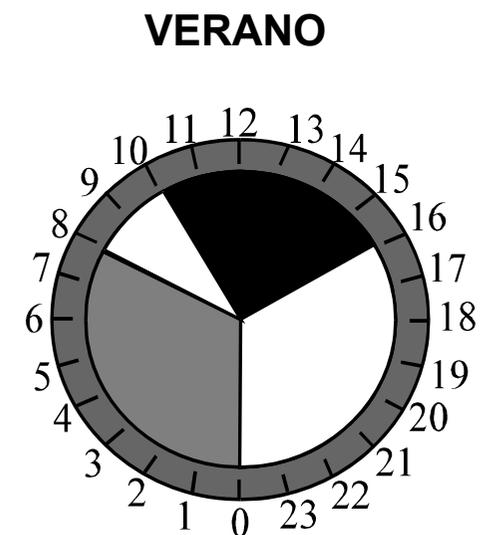
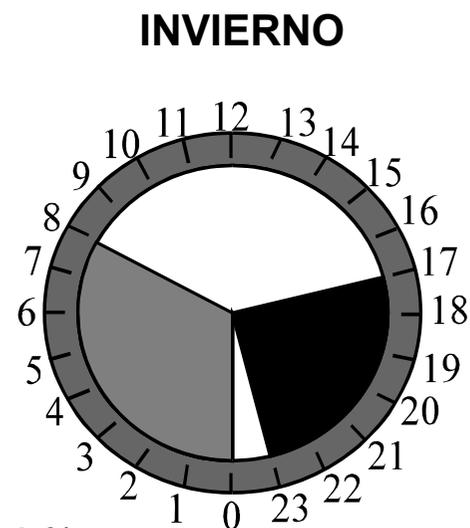
## Tipo 3

-  Punta: 4 h/día. +70 %
-  Valle: 8 h/día. -43 %
-  Llano: 12 h/día.



## Tipo 4

-  Punta: 6 h/día laborable. +100 %
-  Llano: 10 h/día laborable.
-  Valle: 8 h/día laborable y 24 h/día Sábados, Domingos y festivos. -43 %



## CÁLCULO DISCRIMINACIÓN HORARIA

$$DH = \left( \frac{CH}{100} \right) \cdot EN \cdot PR \qquad CH = \frac{\sum E_i \cdot C_i}{EN}$$

*DH* es el recargo o descuento por discriminación horaria.

*CH* es el coeficiente de discriminación horaria, en %

*E<sub>i</sub>* es la energía consumida en cada uno de los períodos horarios definidos para cada tipo de discriminación horaria, en kWh

*C<sub>i</sub>* es el coeficiente de recargo o descuento especificado para dicho período horario, en %..

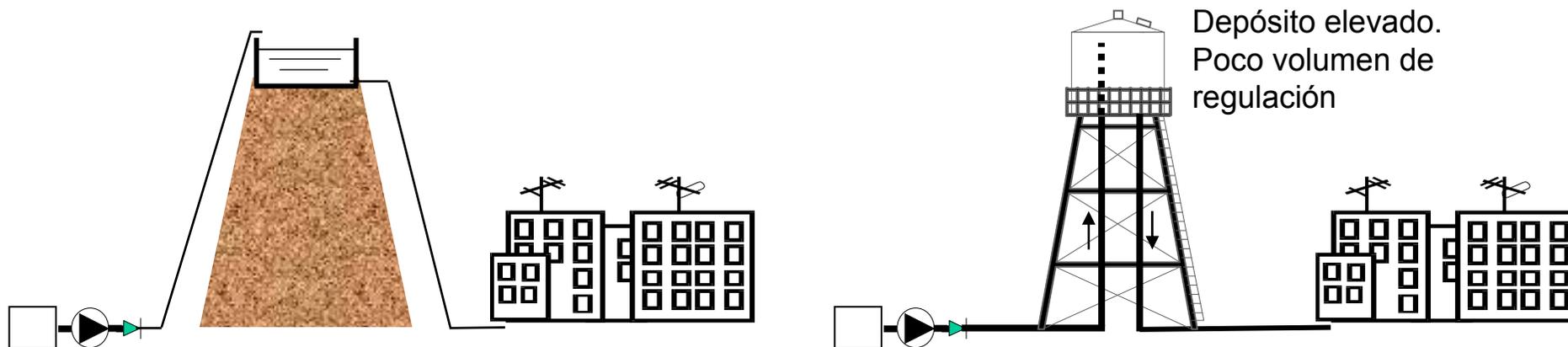
*EN* es la energía activa total consumida en el período de facturación, en kWh.

*PR* es el precio de referencia de la energía (tarifa general de media utilización correspondiente al nivel de tensión de suministro).

## COMPLEMENTOS POR ENERGÍA REACTIVA

$$\cos \varphi = \frac{A}{\sqrt{R^2 + A^2}} \qquad Kr (\%) = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21$$

No se aplicarán recargos superiores al 47% ni descuentos superiores al 4 %.



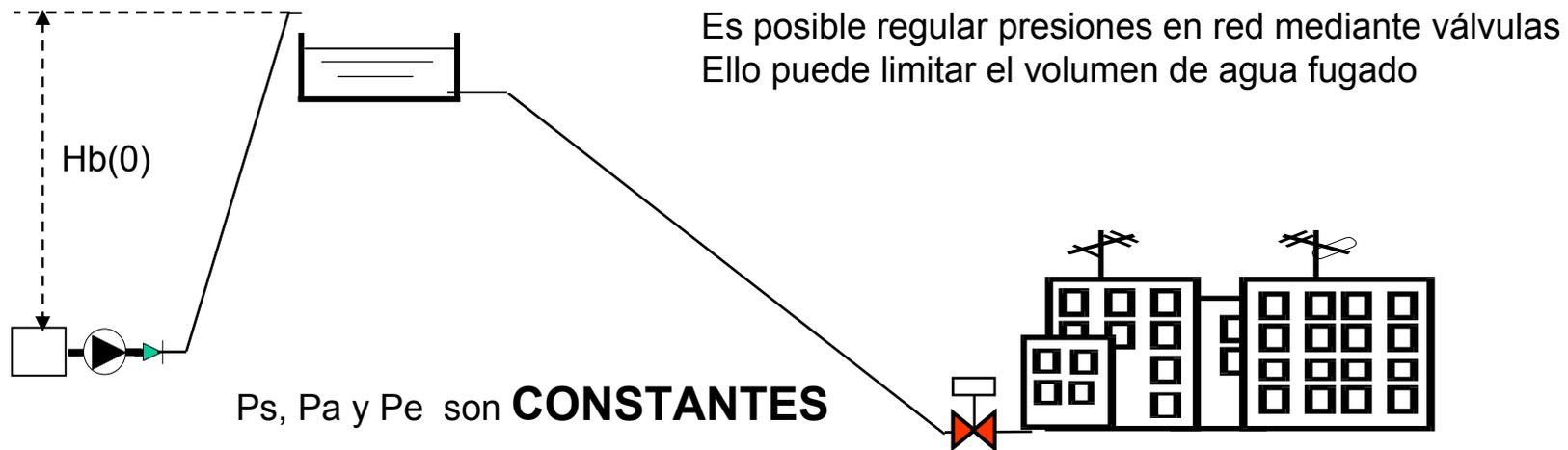
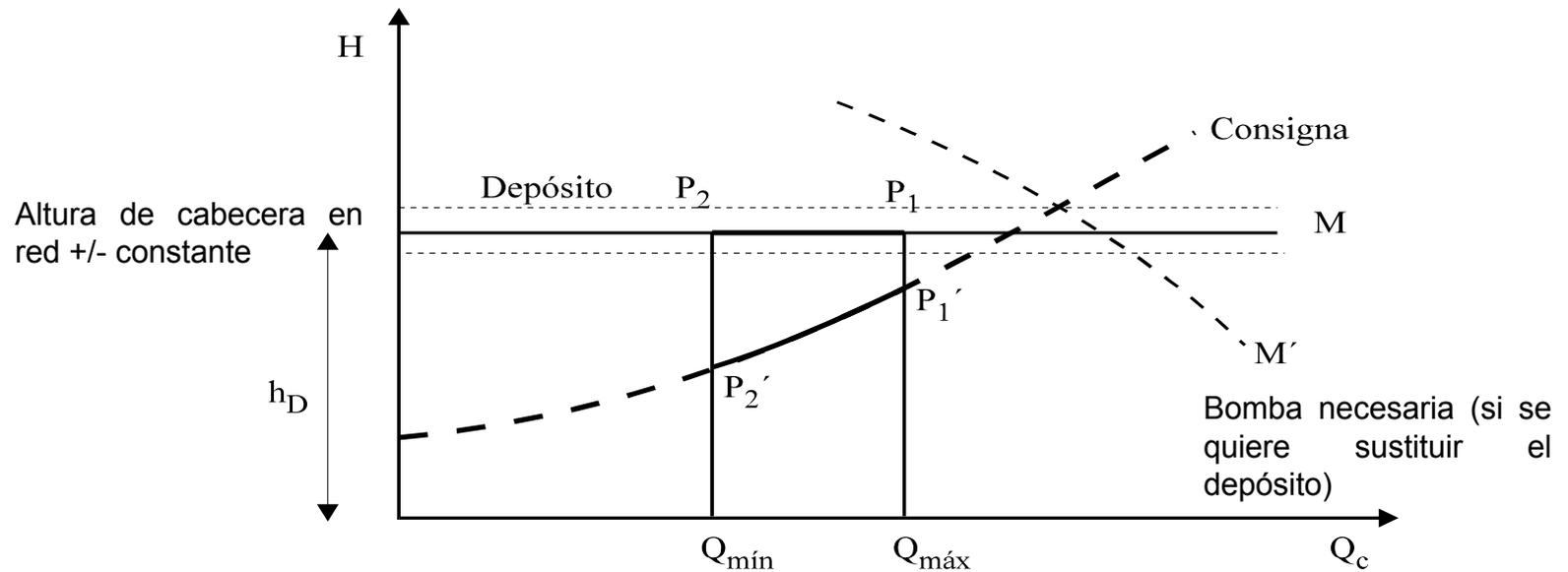
Depósito semienterrado  
aprovechando cota del terreno.  
Volumen de regulación importante

Balsa riego

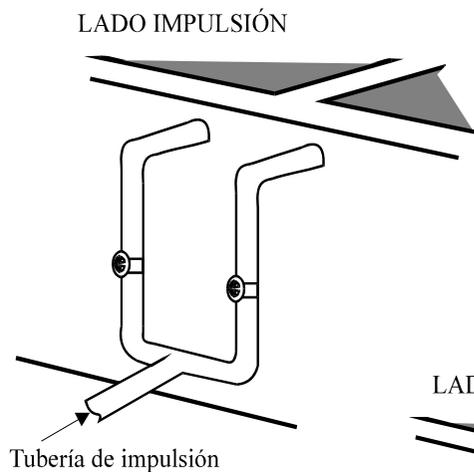
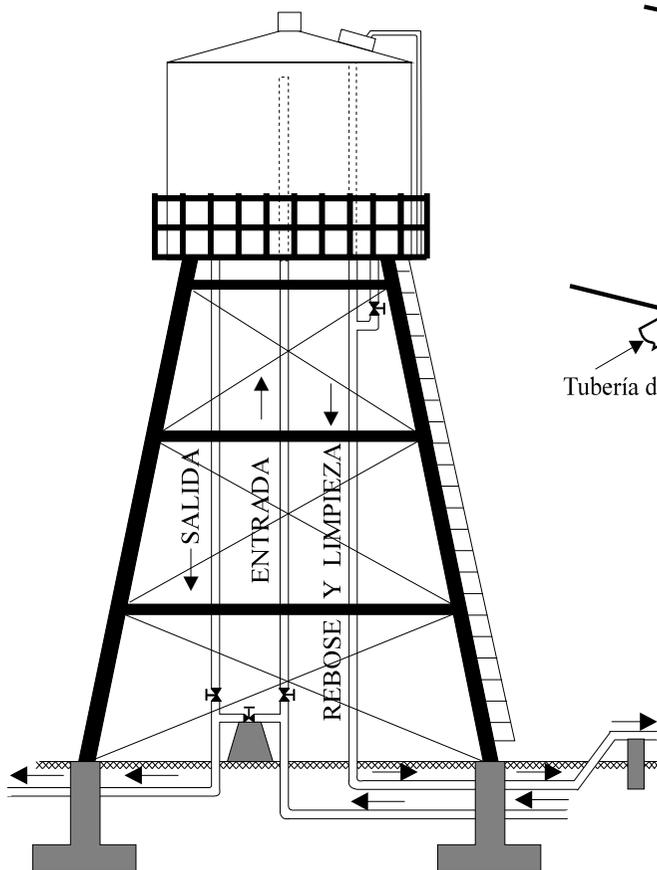


- Reserva frente a averías en la impulsión
- Aprovechamiento de horas valle de coste de la energía
- La Bomba solo funciona en 1 punto (Buscar elevado Rendimiento)
- Mayor inversión
- Poca versatilidad
- No puede seguir la curva de consigna

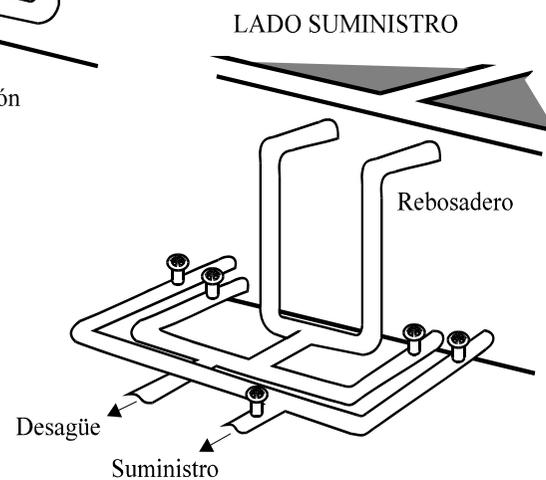
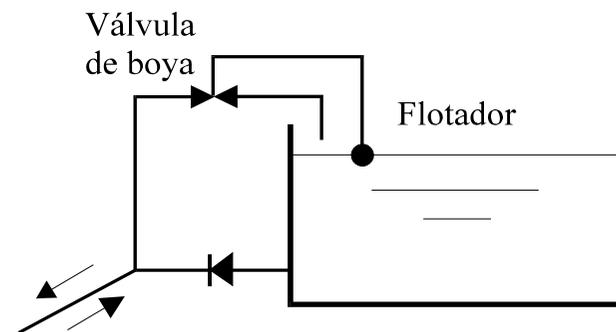
## Rendimiento energético



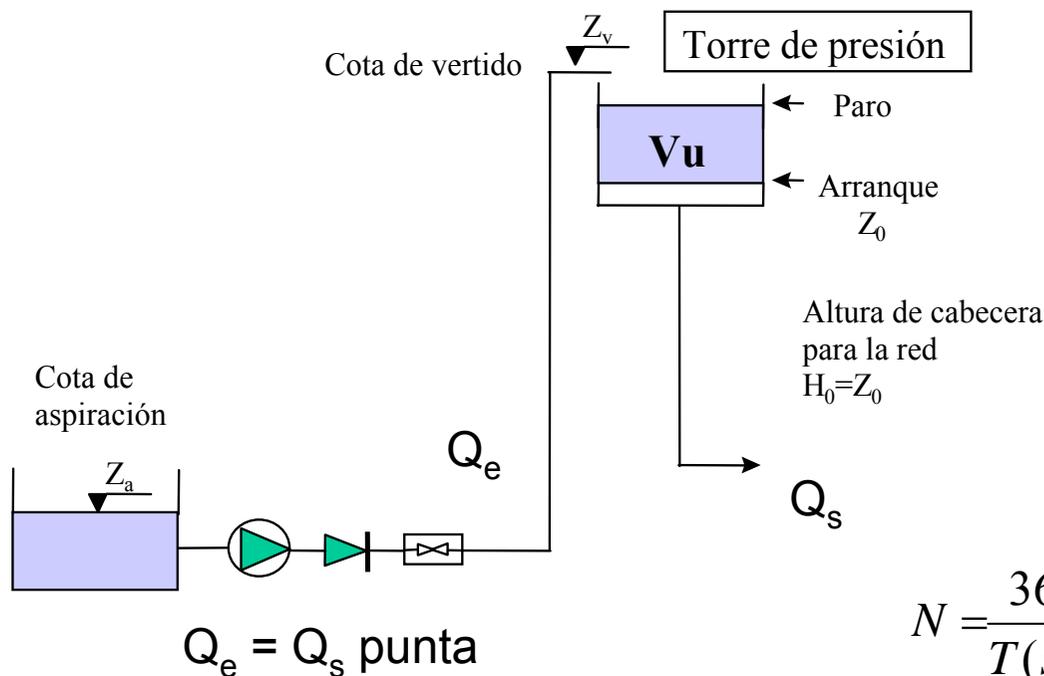
# VALVULERÍA



## Entrada y salida por la misma tubería



# TORRES DE PRESIÓN



$$T_{ll} = \frac{V_u}{Q_e - Q_s}$$

$$T_v = \frac{V_u}{Q_s}$$

$$T = T_{ll} + T_v = \frac{V_u Q_e}{(Q_e - Q_s) Q_s}$$

$$N = \frac{3600}{T(\text{seg})} = \frac{3600 Q_s}{V_u} \left( 1 - \frac{Q_s}{Q_e} \right)$$

$$Q_s \text{ para } N \text{ Máximo} \quad \frac{dN}{dQ_s} = 0 \rightarrow Q_s = \frac{Q_e}{2}$$

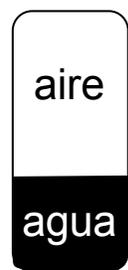
$$N_{\max} = \frac{900 Q_e (l/s)}{V_u (l)}$$

$$V_u (l) = \frac{T(\text{seg})}{4} Q_b (l/s) = \frac{T(\text{min})}{4} Q_b (l/\text{min})$$

$$V_u (l) = \frac{900 Q_b (l/s)}{N_c (\text{arr}/h)}$$

## TIPOS DE CALDERINES

Atención disolución del aire  
 en agua  
 Recarga:  
 Inyectores  
 Compresores



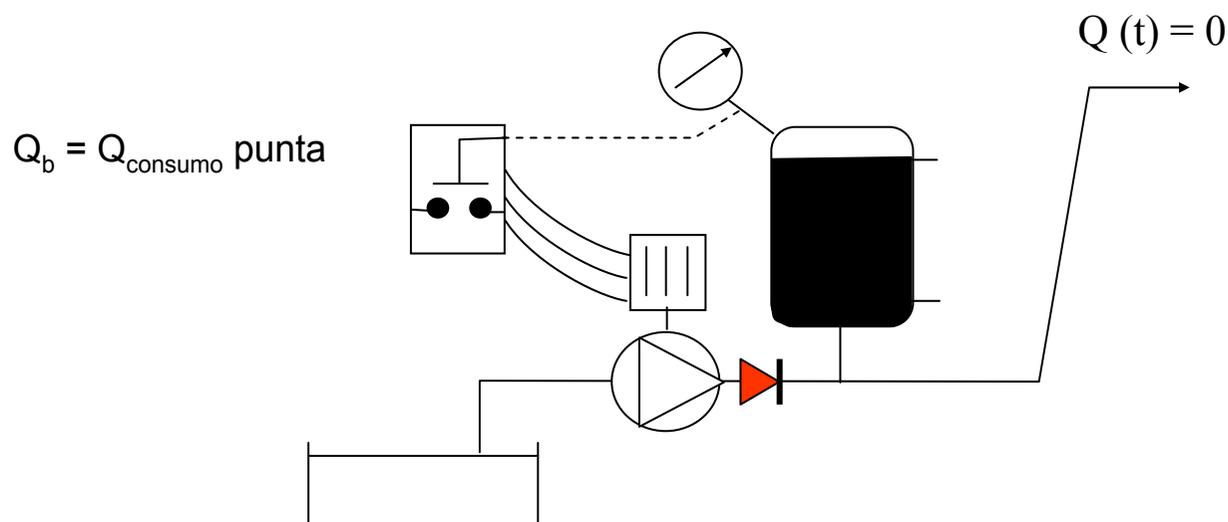
Aire-agua



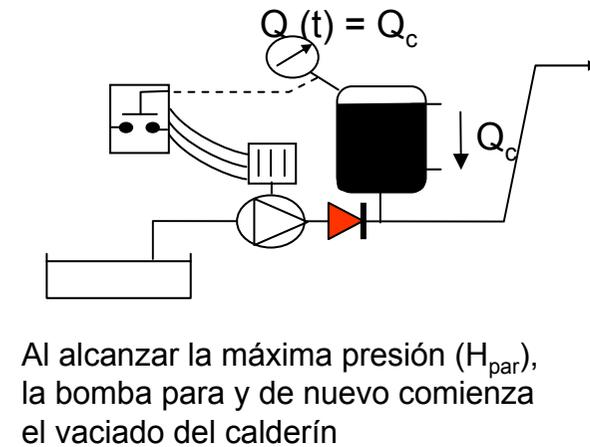
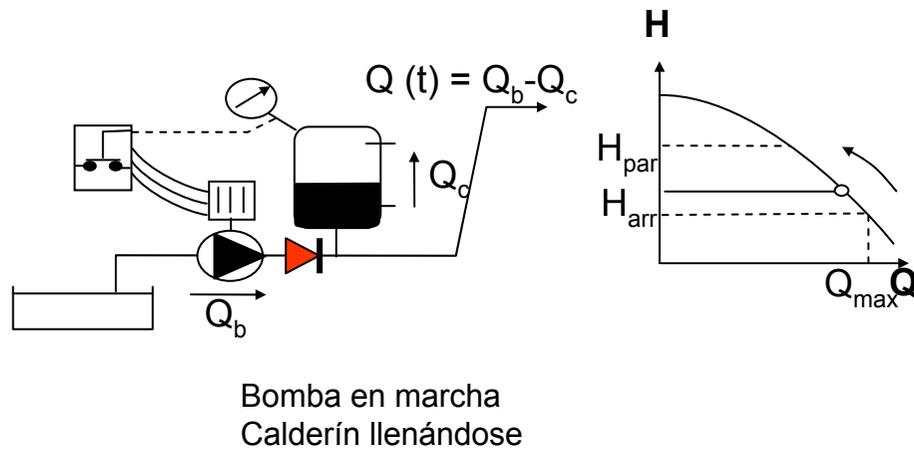
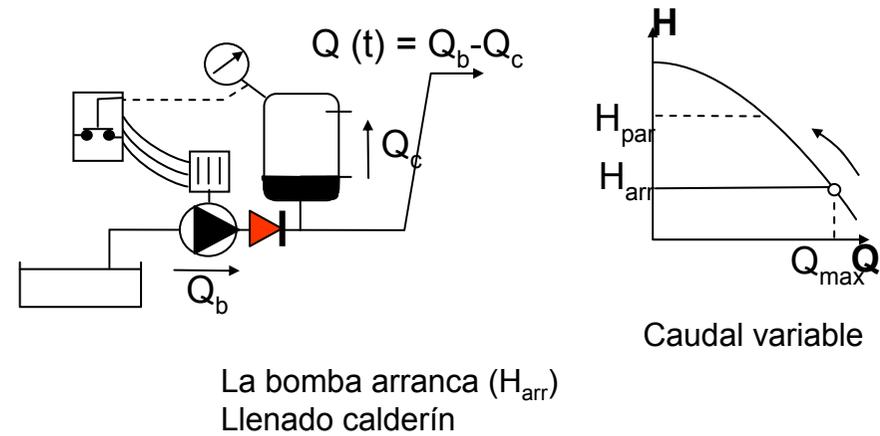
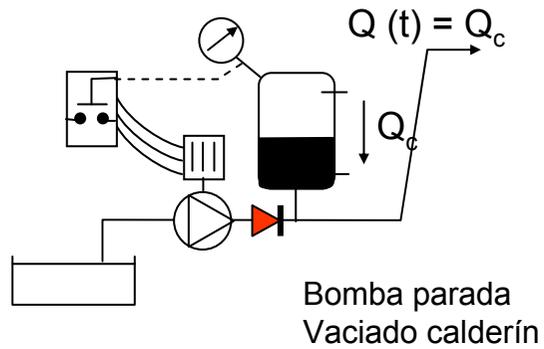
Membrana

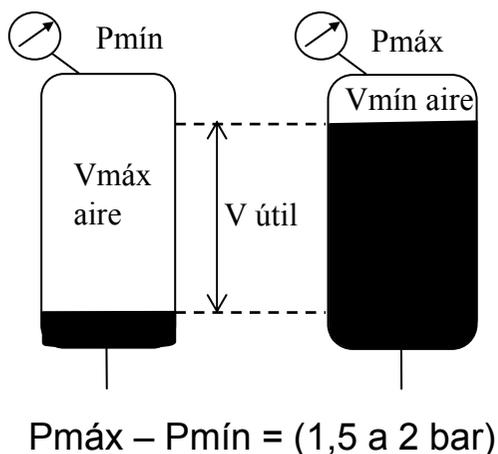
Atención Presión de  
 hinchado con el calderín  
 vacío.

Un presostato regula los arranques (Presión baja cuando el aire se ha expandido) y paradas (Presión alta cuando el aire se ha comprimido al llenarse de agua el calderín) de la bomba



## SECUENCIA





Tomando:

$$k = \frac{V_c}{V_{máx}}$$

Como coeficiente de seguridad  
( $k = 1,25$  membrana)



$$V_c(l) = 15 \cdot k \cdot \frac{Q_b(lpm)}{N_c(arr/h)} \frac{P_{máx}(mca) + 10'33}{P_{máx}(mca) - P_{mín}(mca)}$$

$Q_b$  = Caudal por bomba activa (tomar el valor máximo del rango de caudales de funcionamiento)

El Volumen útil real, dada una presión de hinchado absoluta  $P_0^*$

$P_0 = P_{mín} - (0,3 \text{ a } 0,5 \text{ bar})$

$$P_{máx}^* V_{mín} = P_{mín}^* V_{máx} = P_0^* V_C$$

$$V_{mín} = \frac{P_0^* V_C}{P_{máx}^*} \quad V_{máx} = \frac{P_0^* V_C}{P_{mín}^*}$$



$$V_u = P_0^* \cdot V_C \frac{P_{máx}^* - P_{mín}^*}{P_{máx}^* \cdot P_{mín}^*}$$

Tomando valores absolutos de  $p$  ( $p^*$ ) y evolución isoterma

$$P_{máx}^* V_{mín} = P_{mín}^* V_{máx}$$

$$V_u = V_{máx} - V_{mín} = V_{máx} \left( 1 - \frac{P_{mín}^*}{P_{máx}^*} \right) =$$

$$= V_{máx} \frac{P_{máx}^* - P_{mín}^*}{P_{máx}^*}$$

$$V_u(l) = \frac{900 Q_b(l/s)}{N_c(arr/h)}$$

$$\Rightarrow V_{máx} = 900 \frac{Q_b}{N_c} \frac{P_{máx}^*}{P_{máx}^* - P_{mín}^*}$$

Parranque = 35 mca  
Qbomba = 600 lpm

Pparo = 50 mca  
k = 1.25

P hinchado = 30 mca  
N = 10 ciclos/hora

$$V_c(l) = 15 \cdot k \cdot \frac{Q_b(lpm)}{N_c(arr/h)} \frac{P_{max}(mca) + 10'33}{P_{max}(mca) - P_{min}(mca)}$$

$$V_c(l) = 15 \cdot 1'25 \cdot \frac{600(lpm)}{10(arr/h)} \frac{50 + 10'33}{50(mca) - 35(mca)} = 4524 \text{ litros}$$



5000 litros

$$V_u = P_0^* \cdot V_c \frac{P_{máx}^* - P_{mín}^*}{P_{máx}^* \cdot P_{mín}^*}$$

$$V_u = (30 + 10,33) \cdot 5000 \cdot \frac{50 - 35}{(50 + 10,33) \cdot (35 + 10,33)} = 1106 \text{ litros} = 22 \% V_c$$

$$V_u(l) = \frac{900 Q_b(l/s)}{N_c(arr/h)}$$

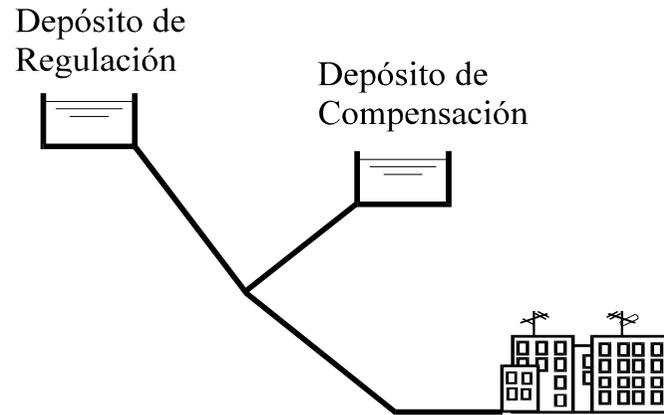
$$N = \frac{900 \cdot Q_b(l/s)}{V_u(l)} = \frac{900 \cdot \frac{600}{60}}{1106} = 8'14 \text{ ciclos/hora}$$

### CALDERÍN SIN MEMBRANA NI MÉTODO DE RECARGA ( P hinchado = 0 mca)

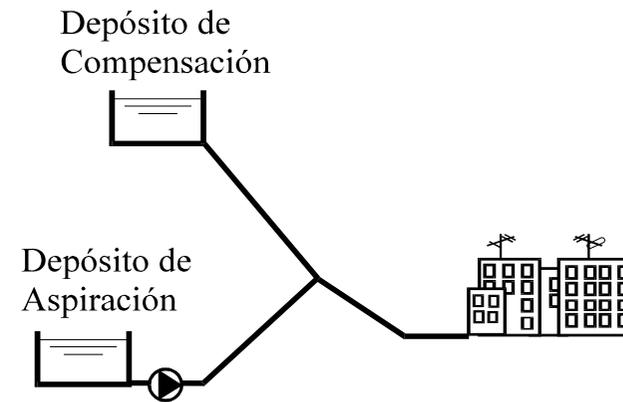
$$V_u = (0 + 10'33) \cdot 5000 \cdot \frac{(50 - 35)}{(50 + 10'33)(35 + 10'33)} = 283 \text{ litros} = 5'66 \% V_u$$

$$N = \frac{900 \cdot Q_b(l/s)}{V_u(l)} = \frac{900 \cdot \frac{600}{60}}{283} = 31,8 \text{ ciclos/hora} \quad \text{Excesivos}$$

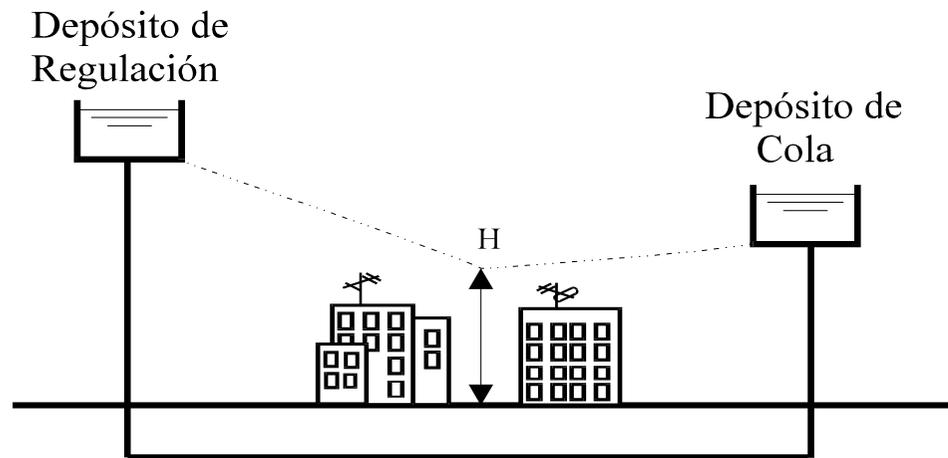
## OTRAS TIPOLOGÍAS FUNCIONALES



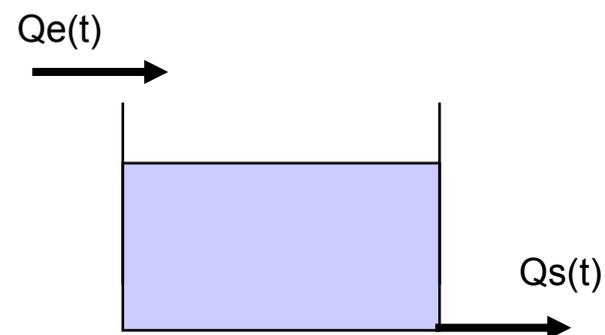
a)



b)



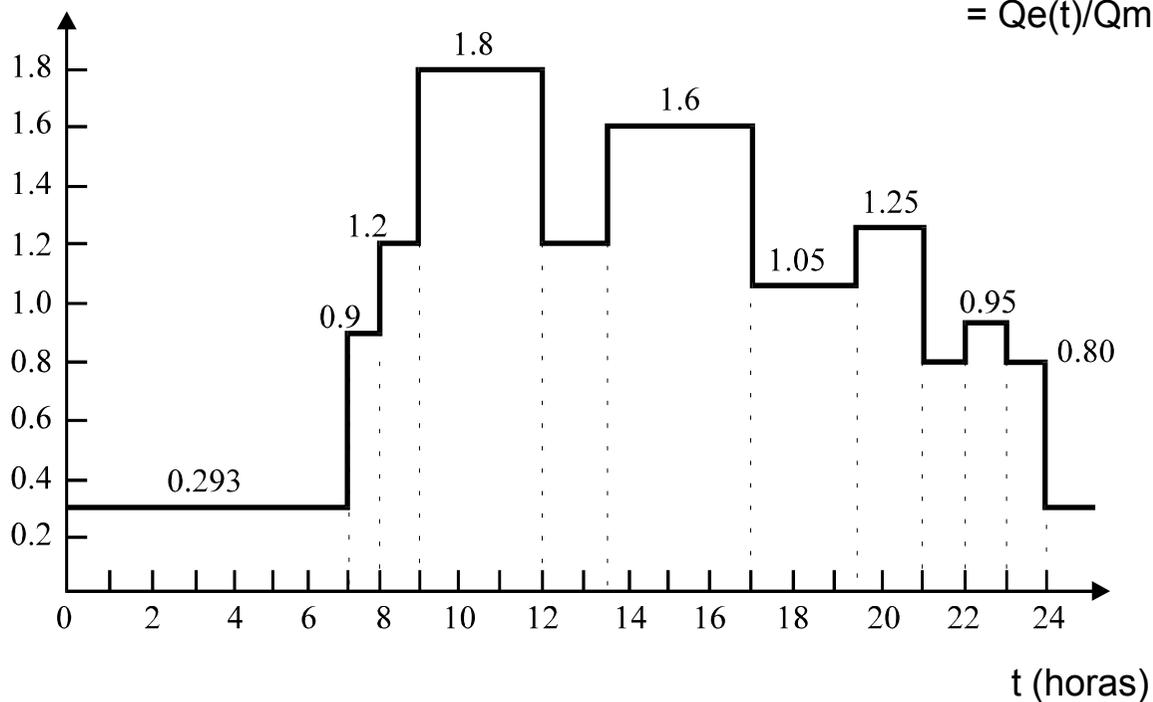
$$\frac{\nabla \text{diario (m}^3\text{)}}{24 \text{ (h)}} = Q_{\text{med}} \text{ (m}^3 \text{ / h)}$$



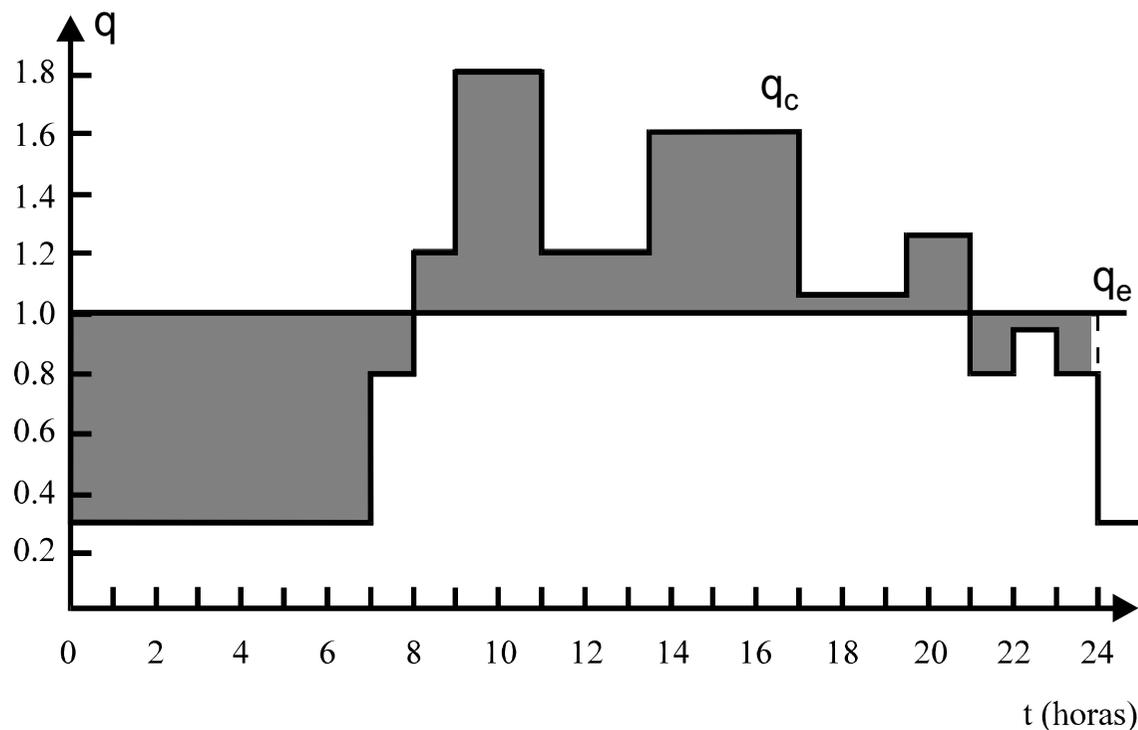
## Curva de Modulación del Consumo

$Q_c$ : Coeficiente de modulación =  $Q_s(t)/Q_{\text{med}}$

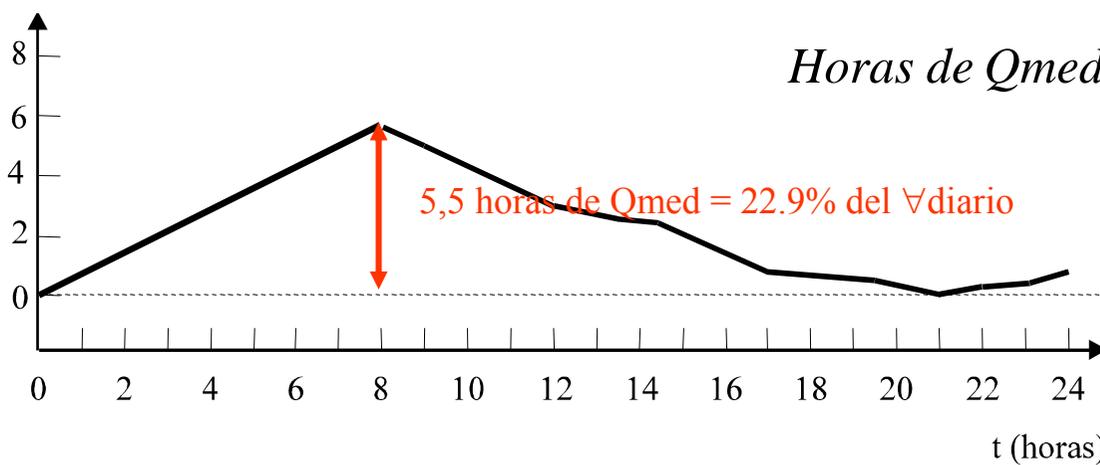
$Q_c$ : Coeficiente de modulación entrada  
=  $Q_e(t)/Q_{\text{med}}$



# Bombeo Constante 24 horas



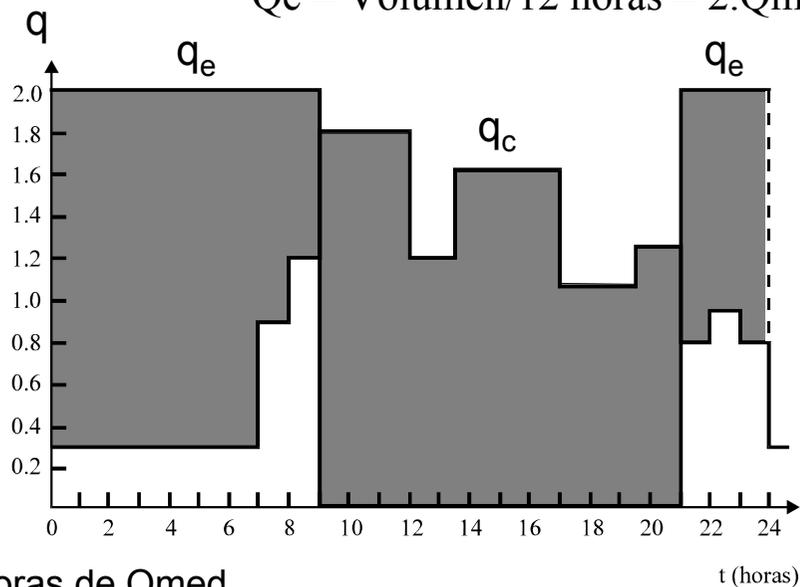
Horas de Qmed



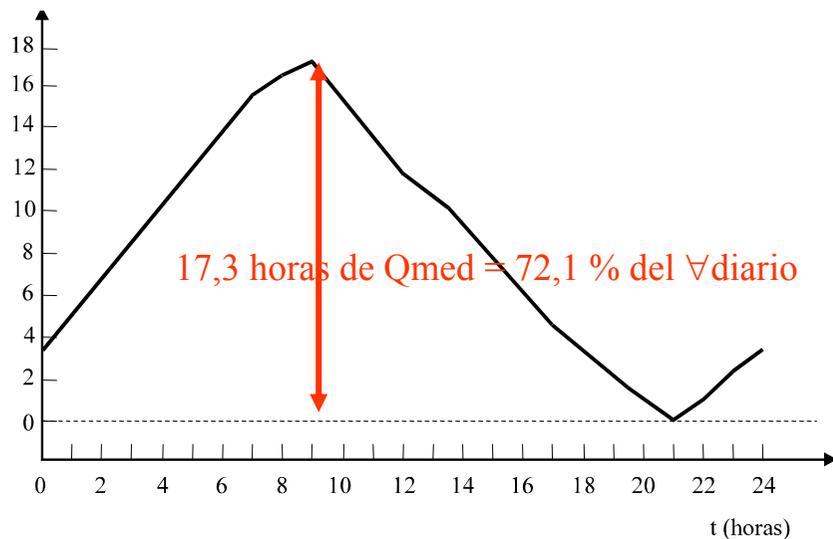
$$\text{Horas de } Q_{med} = \frac{\nabla_{ac} (m^3)}{Q_{med} (m^3 / hora)}$$

5,5 horas de Qmed = 22.9% del  $\nabla$  diario

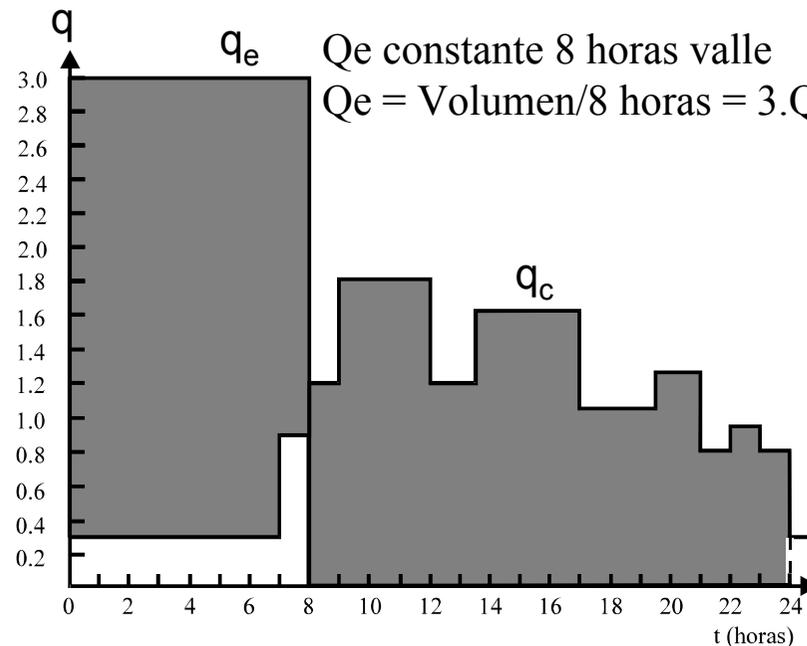
$Q_e$  constante 12 horas  
 $Q_e = \text{Volumen} / 12 \text{ horas} = 2 \cdot Q_{med}$



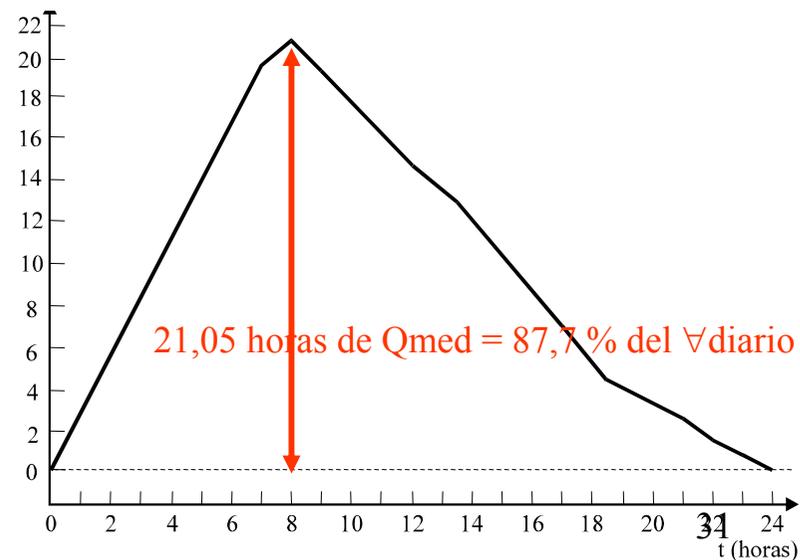
Horas de  $Q_{med}$



$Q_e$  constante 8 horas valle  
 $Q_e = \text{Volumen} / 8 \text{ horas} = 3 \cdot Q_{med}$



Horas de  $Q_{med}$



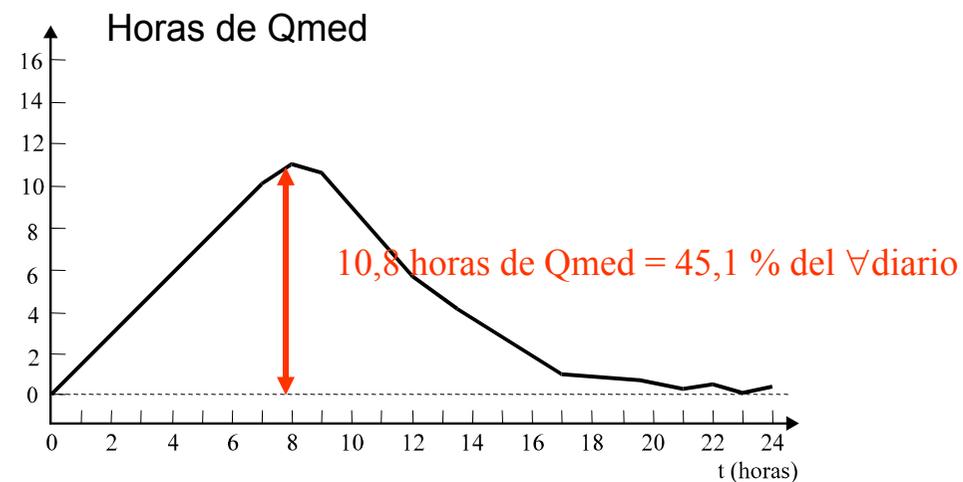
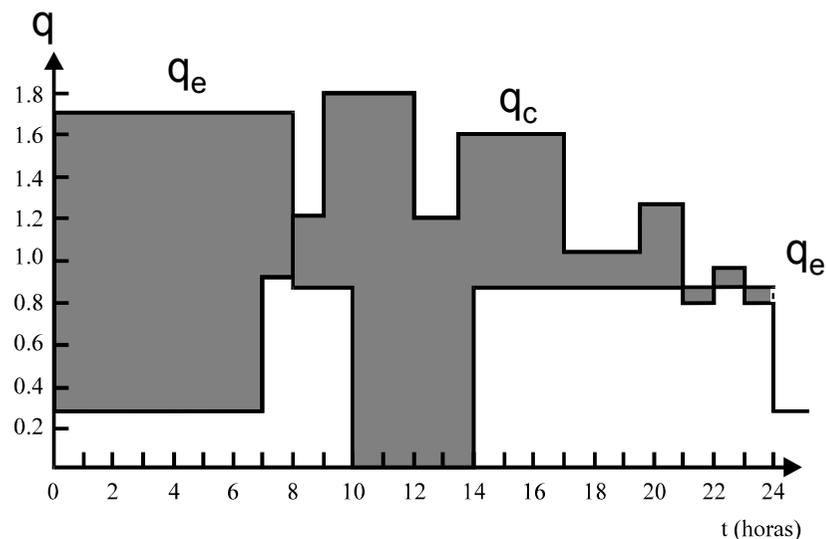
**Entrada**  
**8 horas valle +**  
**12 horas llano**

$Q$  entrada valle = 2  $Q$  bombeo llano



$Q$  entrada valle = 1,7145  $Q$  med

$Q$  entrada llano = 0,857  $Q$  med



$$Pot(kw) = \frac{9810 \cdot Q(m^3 / s) \cdot H(mca)}{1000 \cdot \eta_b \cdot \eta_{me}} = cte \cdot Q(m^3 / s)$$

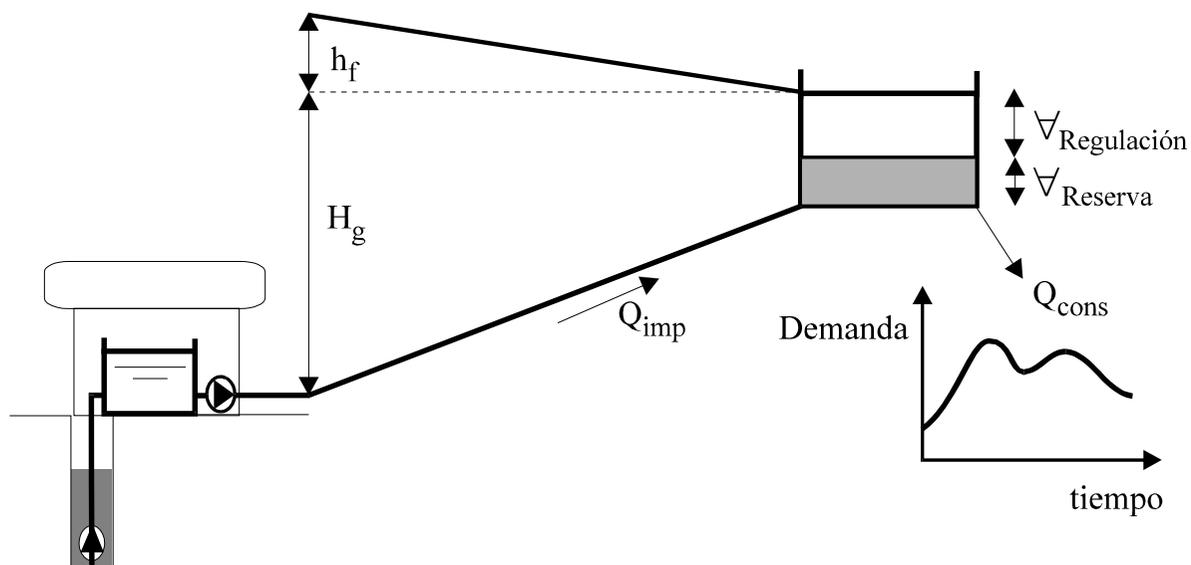
$Q_i$  = caudal de cada intervalo  
 $nh_i$  = Horas/día de cada intervalo  
 $p_i$  = €/ (kw.h) de cada intervalo

$$Coste\ energético\ diario = cte \sum Q_i \cdot nh_i \cdot p_i = cte \left( Q_p nh_p p_p + Q_{ll} nh_{ll} p_{ll} + Q_v nh_v p_v \right)$$

$$Coste\ energético\ diario = cte \cdot p \cdot \left( Q_p \cdot nh_p \cdot 1.7 + Q_{ll} \cdot nh_{ll} + Q_v \cdot nh_v \cdot 0.57 \right)$$

Alternativa	Volumen del depósito (% vol. diario consumido)	Coste energético (unidades relativas)
$Q_{med}$ durante 24 horas	22,92 %	23,36
$2 \cdot Q_{med}$ durante 12 horas	72,08 %	17,12
$3 \cdot Q_{med}$ durante 8 horas	87,71 %	13,68
$1,7145 \cdot Q_{med}$ durante 8 h. valle $0,857 \cdot Q_{med}$ durante 12 h. llano	45,10 %	18,10

## OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA BOMBA-TUBERÍA-DEPÓSITO

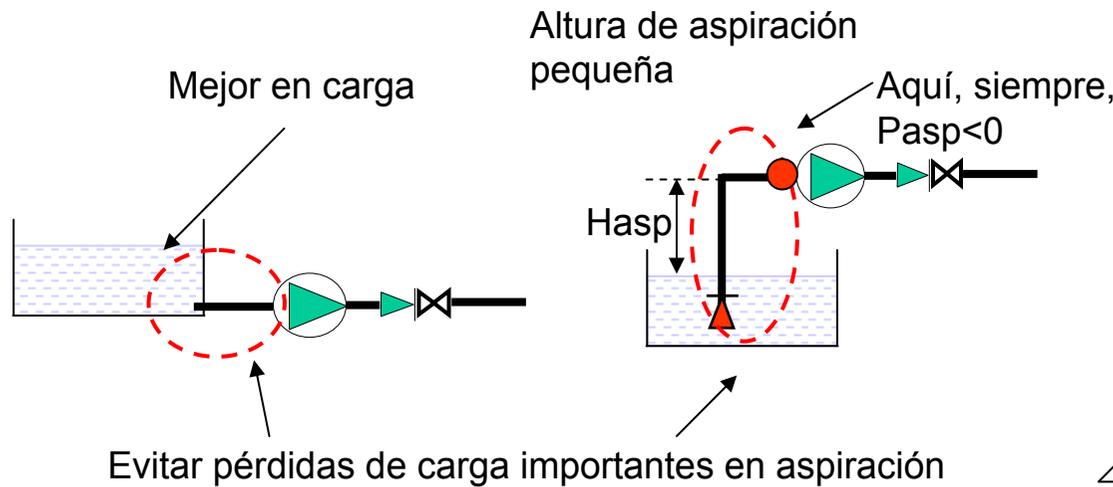


$$C_{\text{total}} = C_{\text{bombas}} + C_{\text{energía}} + C_{\text{tubergía}} + C_{\text{depósito}}$$

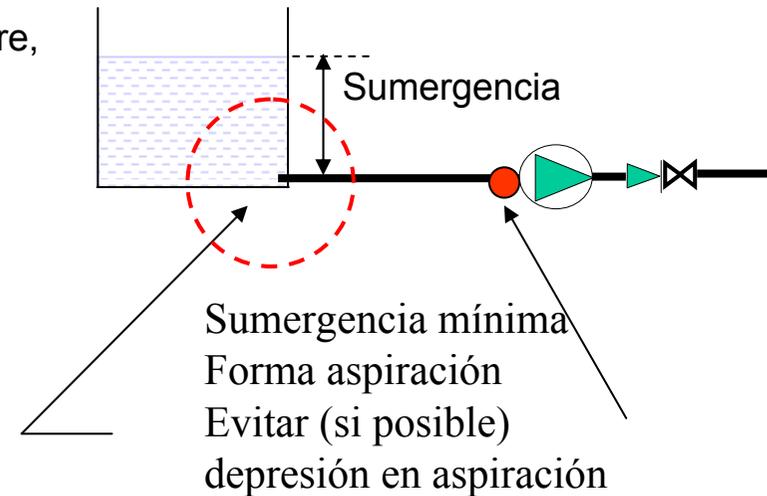
$$\text{Coste total anual} = C_{\text{inversión}} \cdot F_{\text{amort.}} + C_{\text{energía}}$$

$$F_{\text{amort}} = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \quad \begin{array}{l} r = \text{Tasa de amortización anual (tanto por uno)} \\ T = \text{Período de vida del proyecto (años)} \end{array}$$

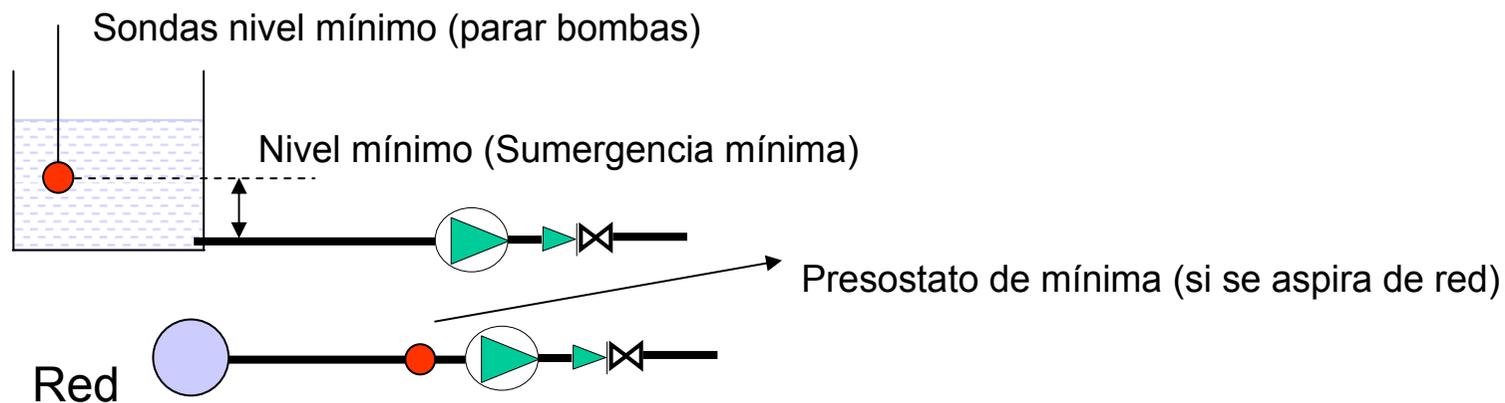
## Evitar cavitación en bomba



## Evitar vorticidades (entrada de aire)

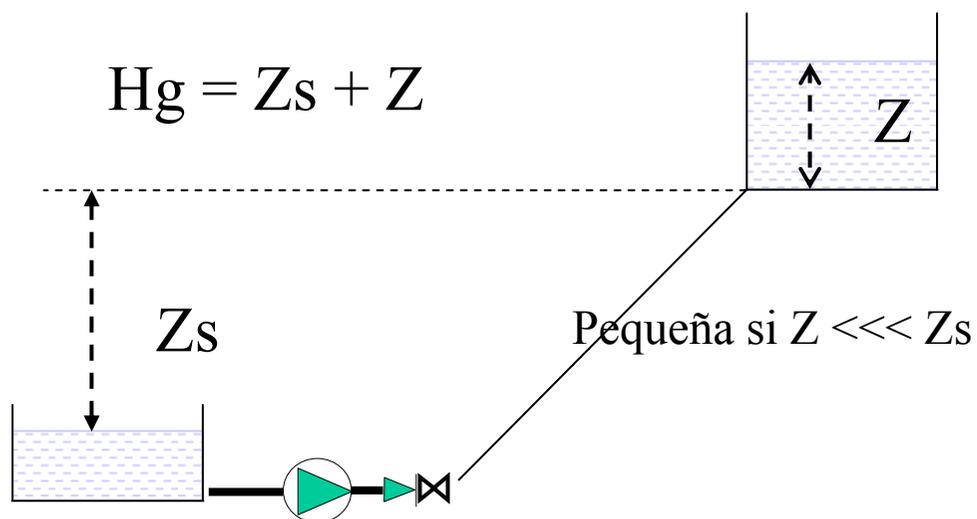


## Instalar sensores (prioridad sobre sensores en depósito impulsión)

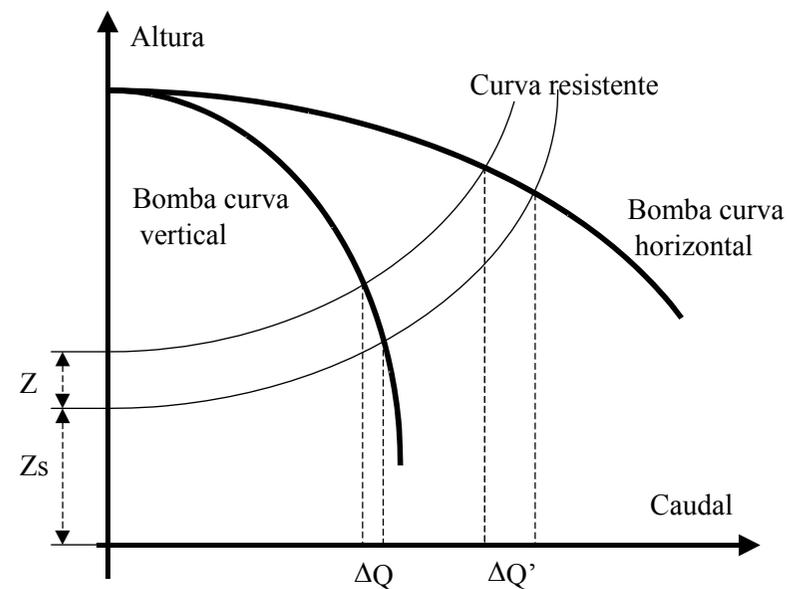


**Entrada:** Parte superior (Q constante)  
Parte inferior (Q variable con nivel agua Z)

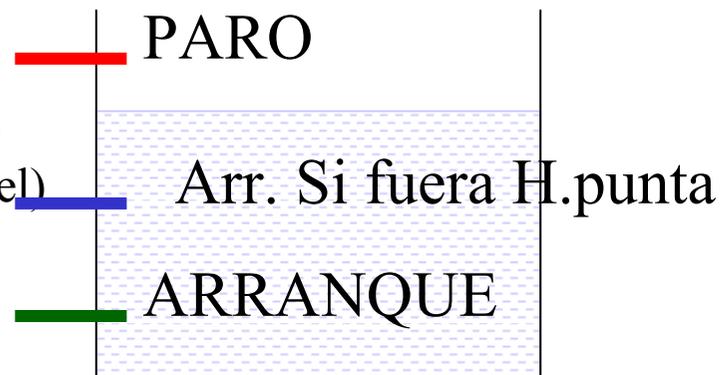
**Influencia de la variación de nivel en Q**  
(atención nivel aspiración en pozos)



Mayor si:  
Curva bomba horizontal  
Resistencia hidráulica pequeña



Sondas todo/nada (tres sondas si inhibidor horario)  
Transductor presión en fondo (medida continua nivel)

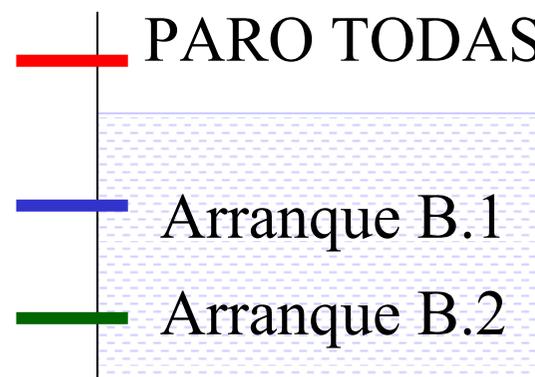
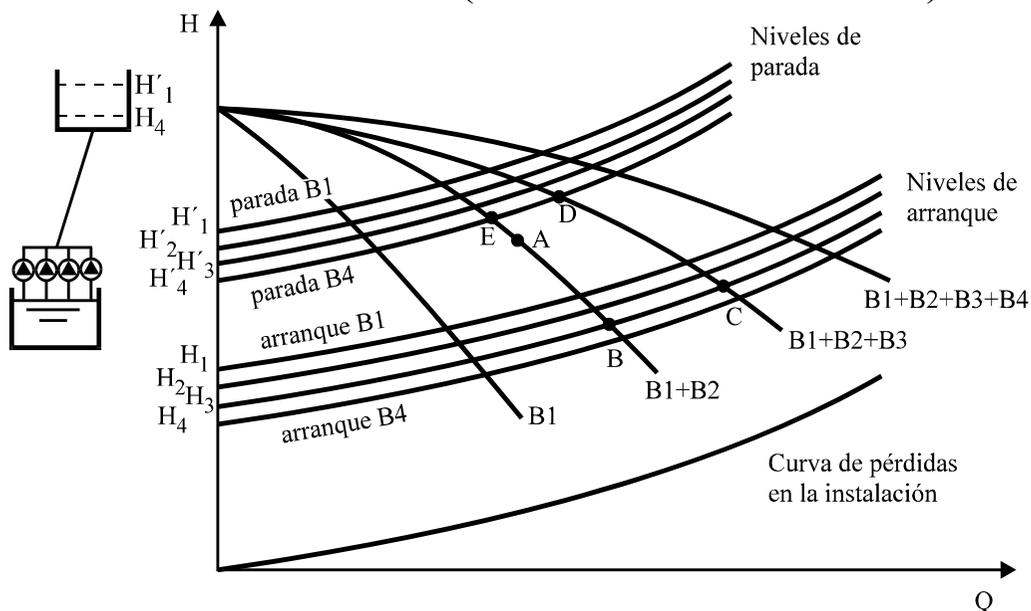


## Regulación escalonada

Arranque y paro de bombas en función de niveles

Mayor volumen cuantas menos bombas

Rotar las Bombas (B.1 funciona más horas)



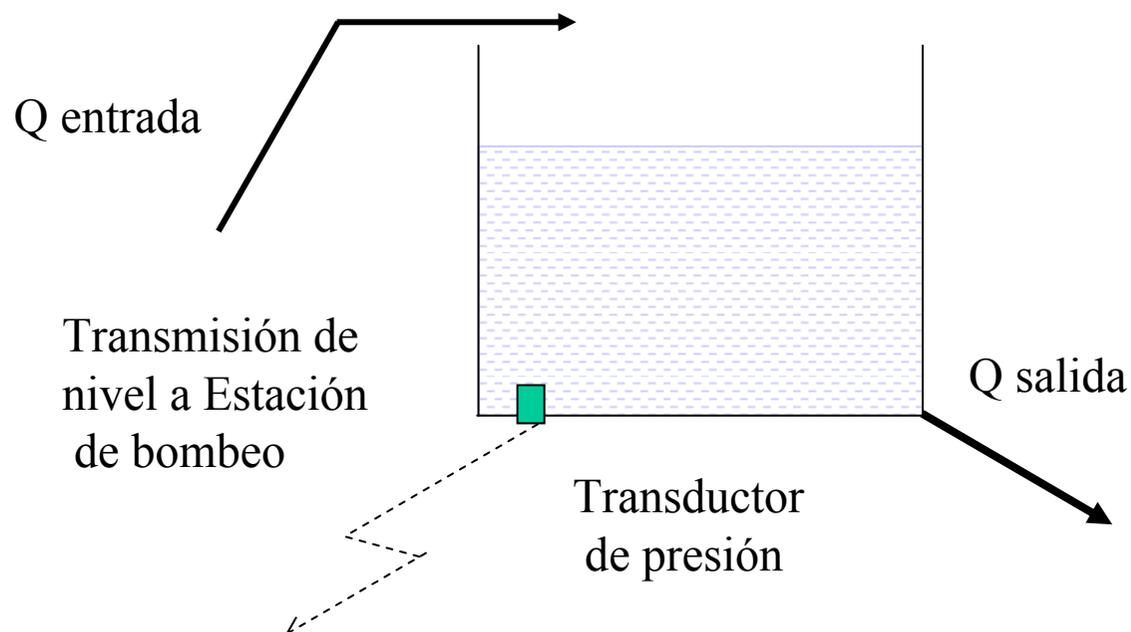
Regulación continua:  $Q \text{ entrada} = Q \text{ salida}$

Mantener nivel constante ( $Q_{\text{imp}} = Q_{\text{demanda}}$ )

1 BVV o 1 BVV con varias BVF

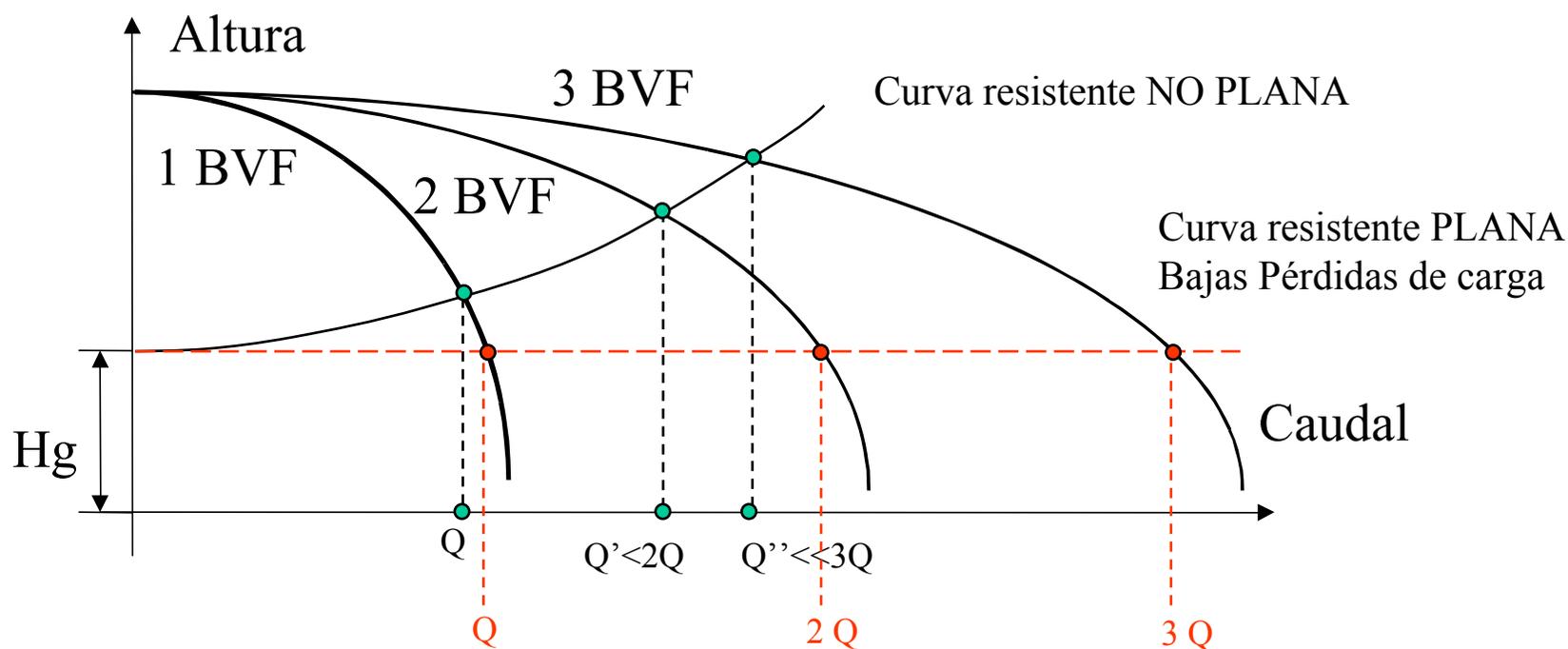
Menor Volumen regulación (teóricamente nulo)

Rotar las Bombas (BVV funciona más horas)



## INCREMENTO DEL CAUDAL IMPULSADO EN SISTEMAS CON BVF ACOPLADAS EN PARALELO

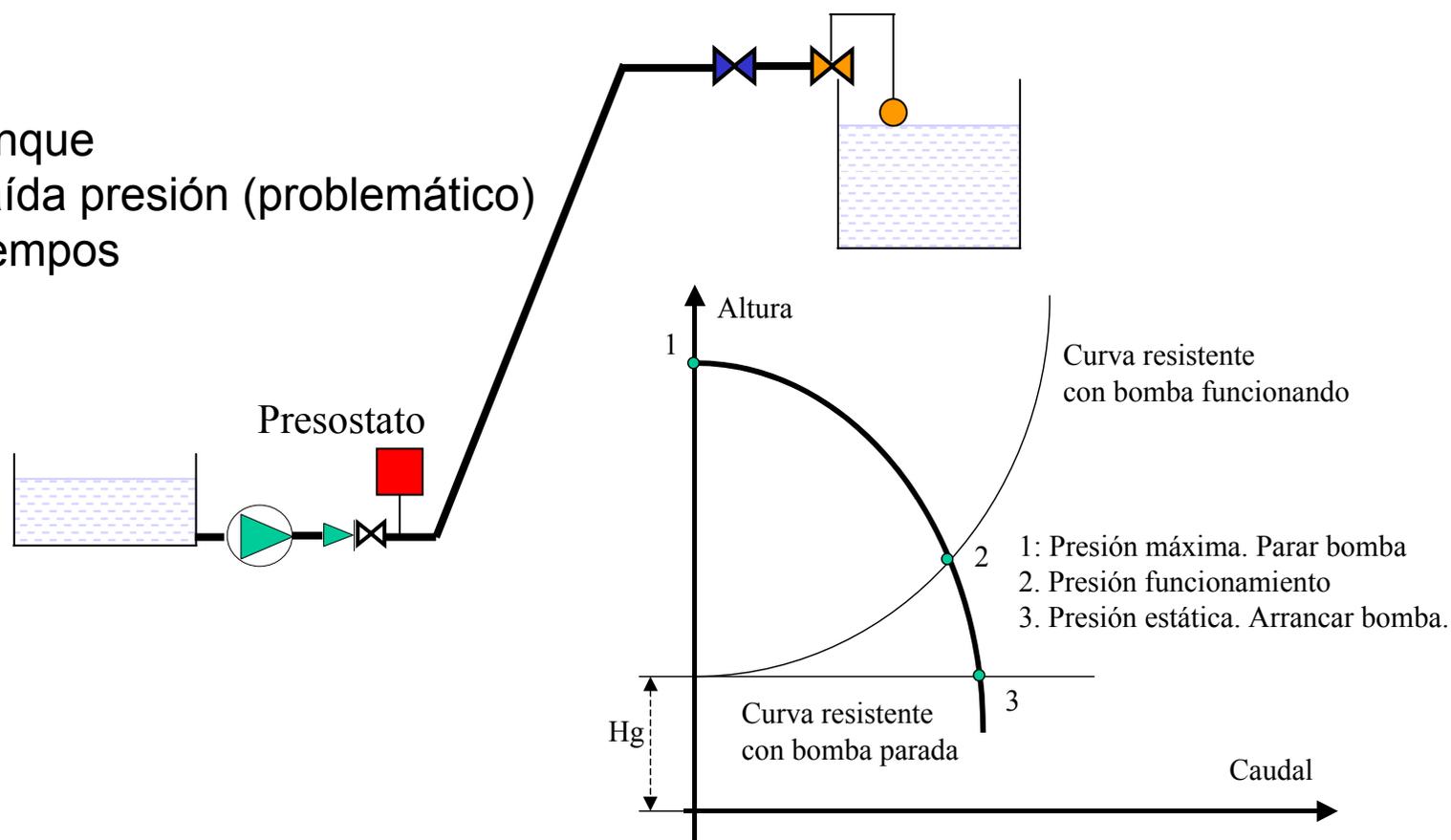
El Q impulsado de duplica, triplica, etc. cCon varias bombas en paralelo **solo** si la curva resistente es perfectamente plana

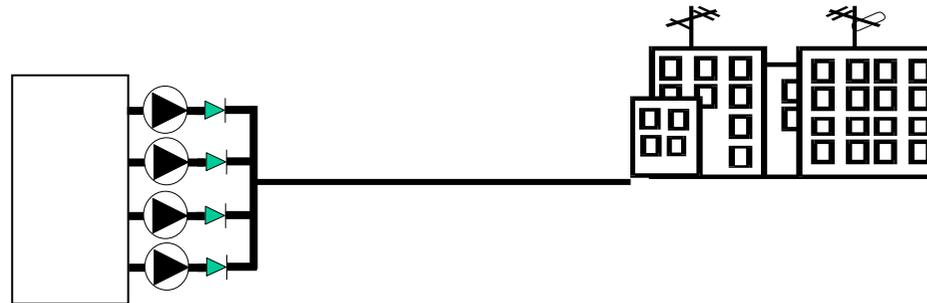


## REGULACIÓN SIN ELEMENTOS DE MEDICIÓN DE NIVEL EN EL DEPÓSITO DE IMPULSIÓN

Cuando cierra la V.Flottador (todo/nada), sube la presión a la salida bomba y el presostato da orden de paro

Arranque  
 Caída presión (problemático)  
 Tiempos

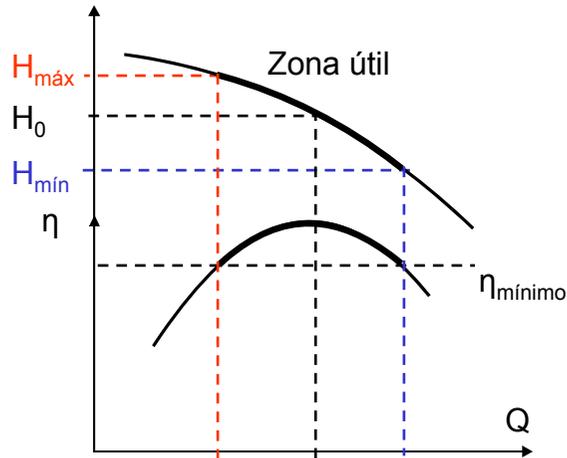




- Menor inversión
- Mayor versatilidad
- No hay reserva frente a averías en la impulsión
- No aprovecha las horas valle de energía eléctrica
- $Q_{\text{bombeo}}$  variable  $\rightarrow$  Rendimiento variable (no óptimo)
- No puede seguir la curva de consigna (**salvo BBV**)

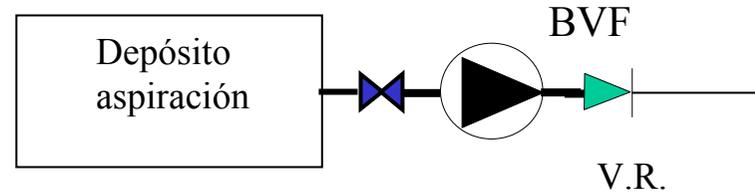
### OBJETIVOS DE LA REGULACIÓN EN INYECCIÓN DIRECTA

- Funcionar lo más cerca posible de la curva de consigna con coste energético el menor posible (puntos de elevado rendimiento).
- Minimizar el número de arranques y paradas bruscas de grupos.
- Mantener seguridad suministro

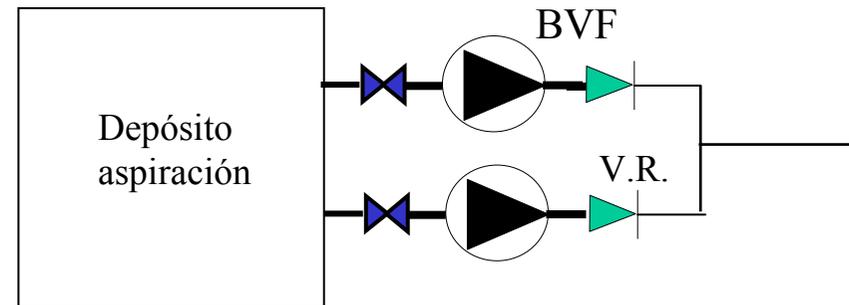


Elección de la bomba para que trabaje en zona por encima de un rendimiento mínimo.

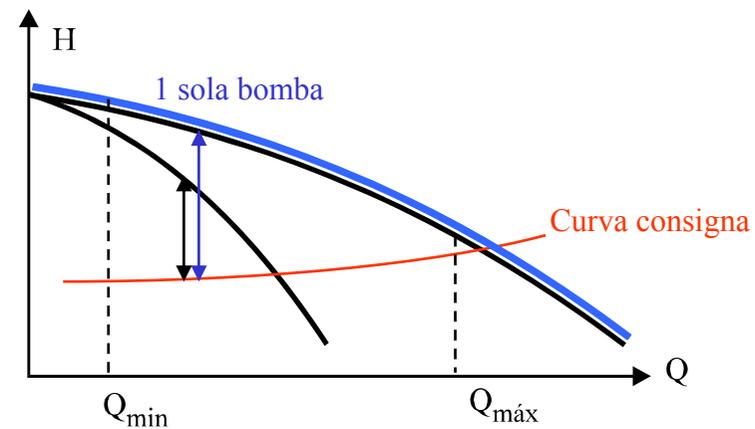
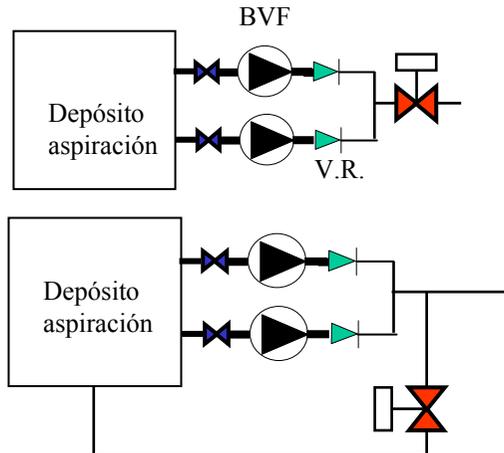
1 sola bomba de velocidad fija BVF



Varias BVF en paralelo (ojo reserva activa)

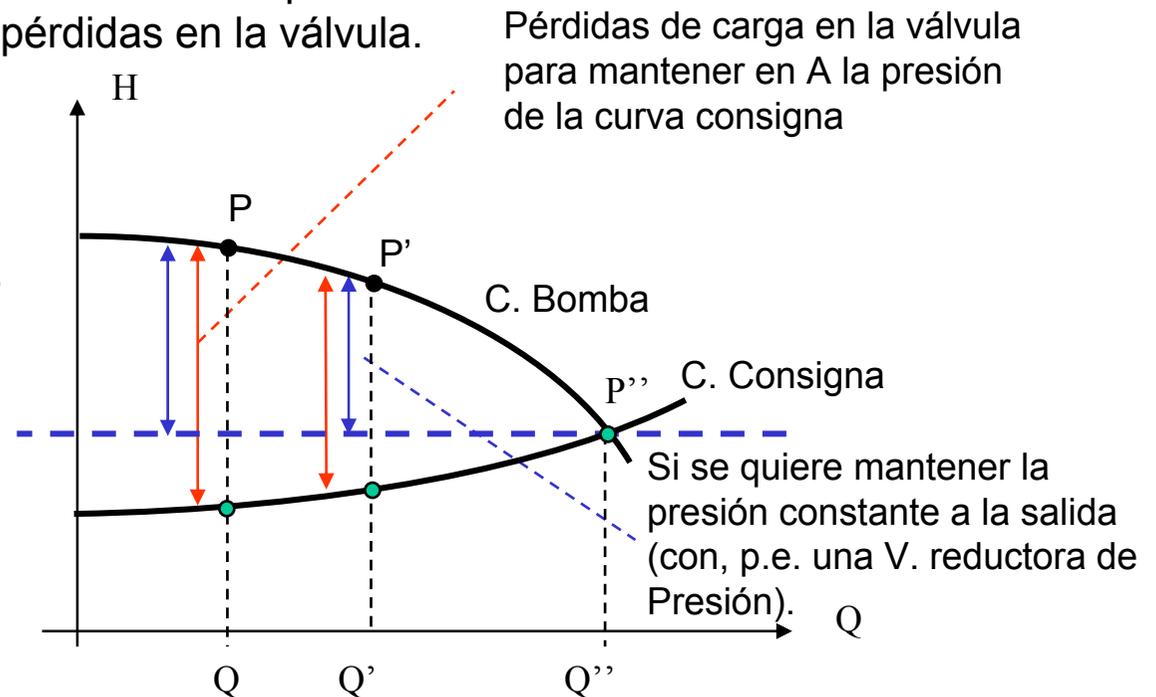
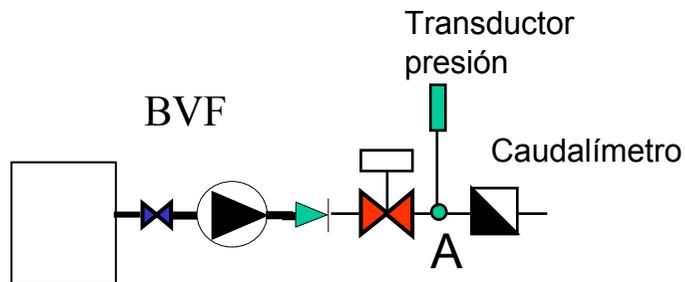


1 o varias BVF en paralelo con válvula en serie o derivación



# REGULACIÓN CON VÁLVULA MOTORIZADA EN SERIE

La bomba funciona en P, P' y P'' (Altura superior a la necesaria, que se pierde luego en la válvula, excepto en P''). No hay ahorro energético. Se suministra a la red la presión necesaria pero con el "peaje" de las pérdidas en la válvula.

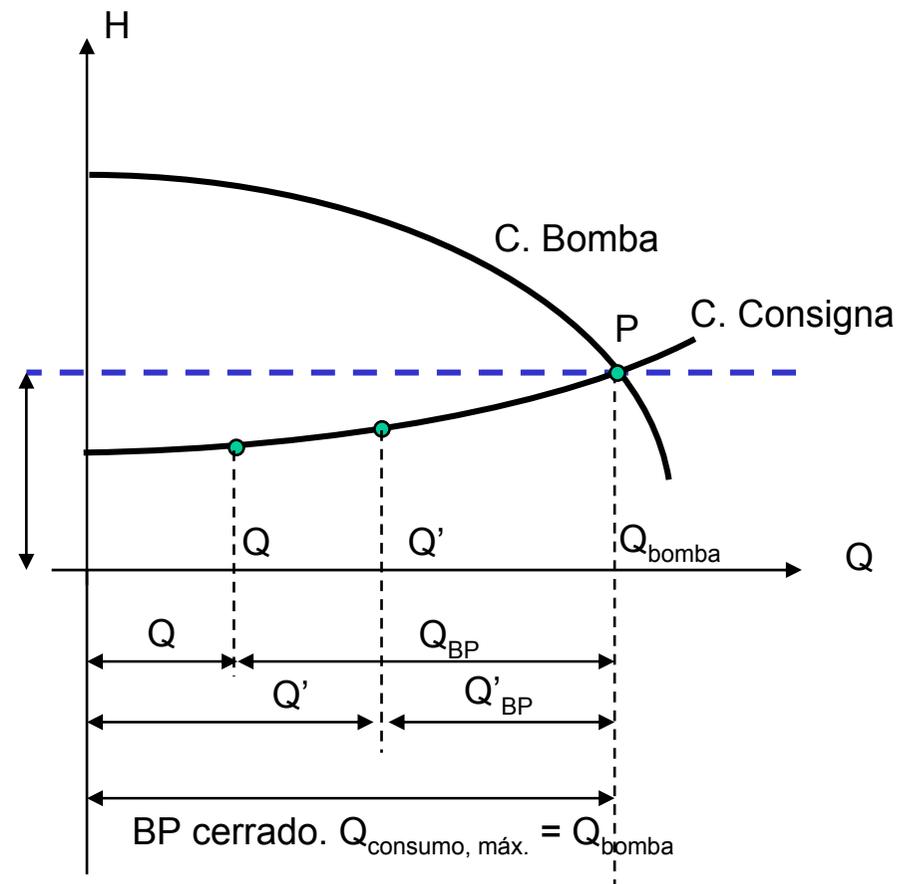
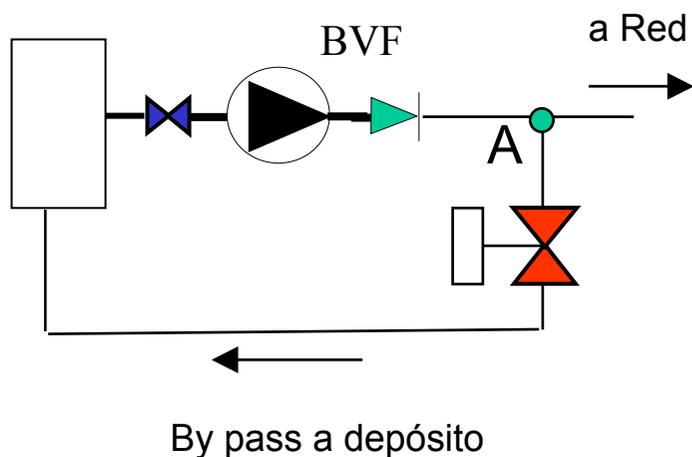


$$\text{Potencia suministrada} = \gamma Q H_s > \text{Potencia Necesaria} = \gamma Q H_n$$

En este caso  $Q = Q$  necesario pero  $H_s > H_n$

## REGULACIÓN CON VÁLVULA MOTORIZADA EN DERIVACIÓN

Caudal constante de la bomba  $Q_{\text{bomba}}$ . Se recircula el “sobrante”  
para mantener la **presión en A fija**

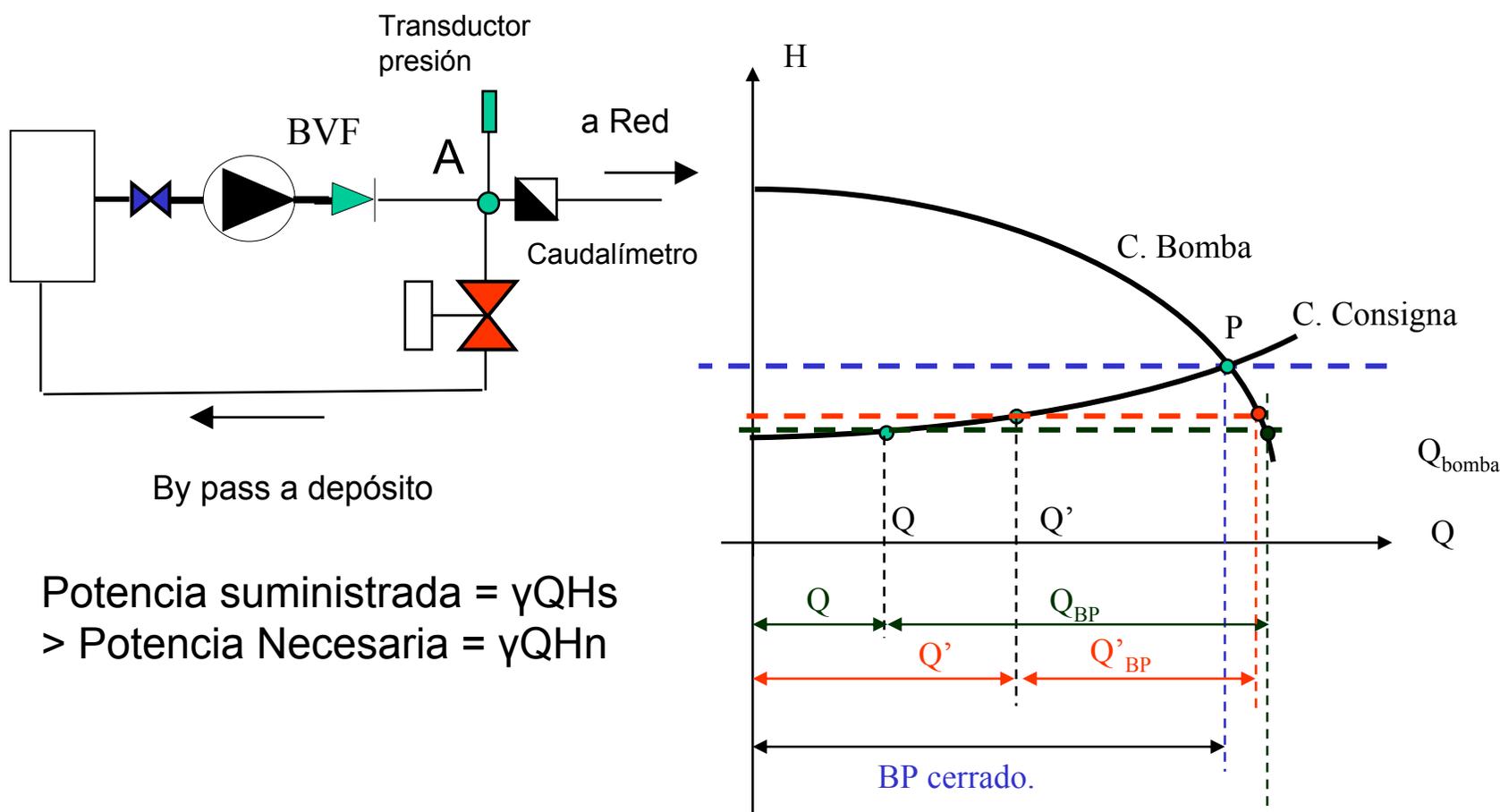


Potencia suministrada =  $\gamma Q H_s >$  Potencia Necesaria =  $\gamma Q H_n$

En este caso  $H_s = H_n$  necesario pero  $Q_{\text{bomba}} > Q_{\text{consumo}}$

## REGULACIÓN CON VÁLVULA MOTORIZADA EN DERIVACIÓN

Caudal de la bomba para mantener la altura necesaria de la Curva consigna. Se recircula el “sobrante” para mantener la H necesaria



Potencia suministrada =  $\gamma Q H_s$   
 > Potencia Necesaria =  $\gamma Q H_n$

En este caso  $H_s = H_n$  necesario pero  $Q_{bomba} > Q_{consumo}$

Potencia con caudal Q

$$W_P = \frac{\gamma Q H_P}{\eta_b} = \frac{1.000 \cdot 0,28 \cdot 43}{0,76 \cdot 75} = 211,2 \text{ CV}$$

Comparación regulación trabajando con Q/2

Potencia con caudal Q/2

Necesaria

$$W_{C_1} = \gamma Q/2 H_{C_1} = \frac{1.000 \cdot 0,14 \cdot 38}{75} = 70,9 \text{ CV}$$

Válvula en serie (se bombea el caudal requerido Q/2)

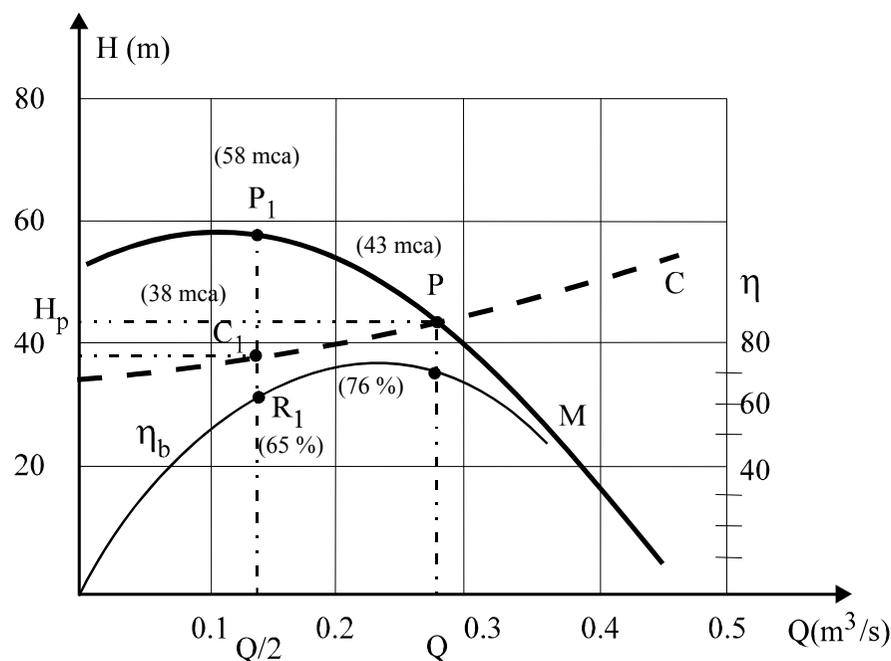
$$W_{P_1} = \frac{\gamma Q/2 H_{P_1}}{\eta_{R_1}} = \frac{1.000 \cdot 0,14 \cdot 58}{0,65 \cdot 75} = 166,6 \text{ CV}$$

$$\eta_{\text{inst},1} = \frac{W_{C_1}}{W_{P_1}} 100 = \frac{70,9}{166,6} = 42,6 \%$$

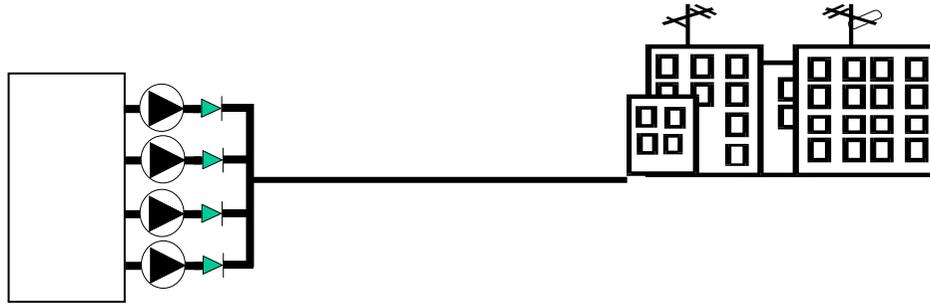
Válvula en derivación (se bombea Q y se deriva Q/2)

$$W_P = \frac{\gamma Q H_P}{\eta_b} = \frac{1.000 \cdot 0,28 \cdot 43}{0,76 \cdot 75} = 211,2 \text{ CV}$$

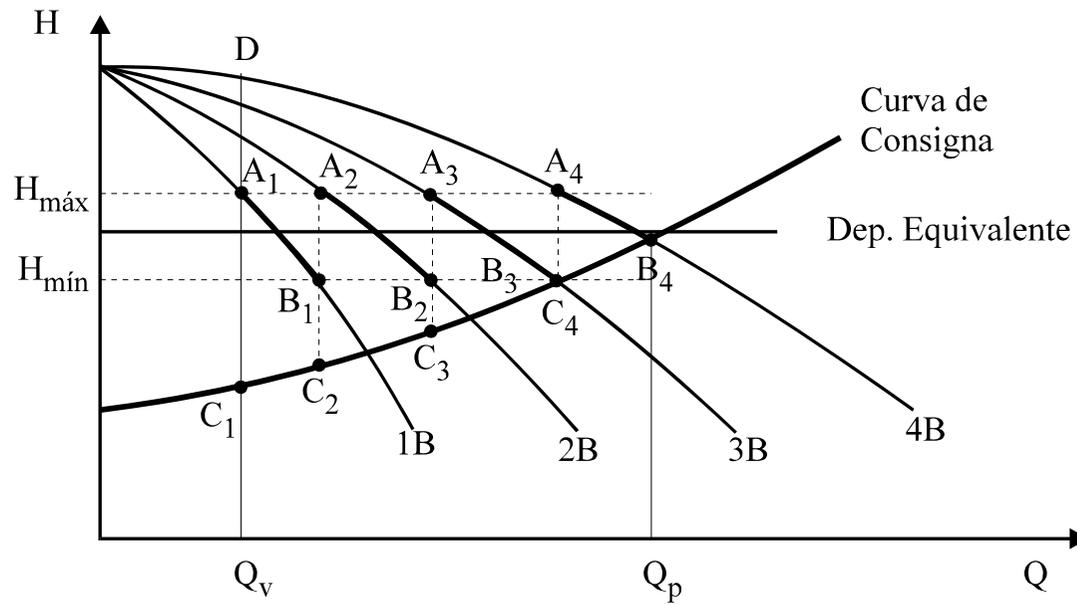
$$\eta_{\text{inst},2} = \frac{W_{C_1}}{W_P} 100 = \frac{70,9}{211,2} = 33,6 \%$$



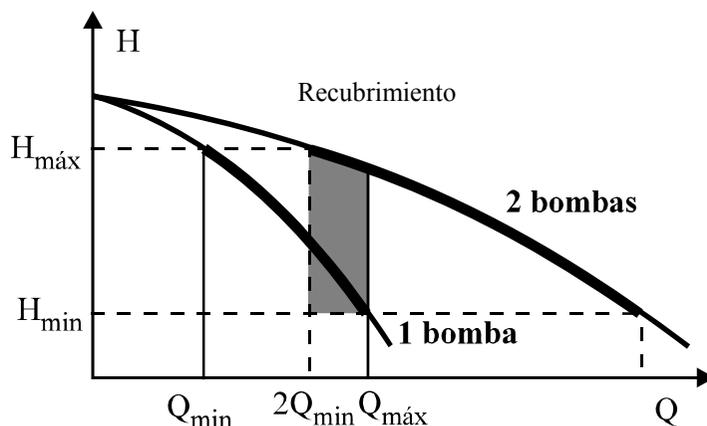
## ASOCIACIÓN EN PARALELO



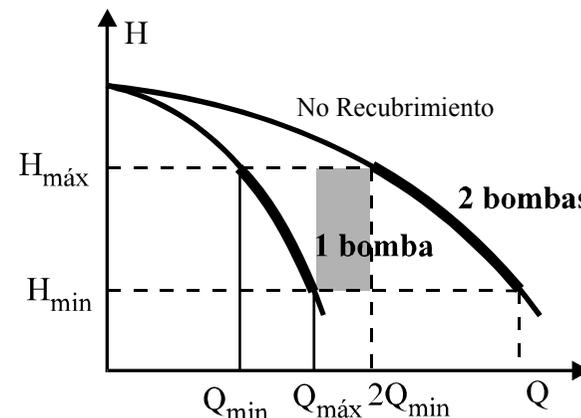
**BVF**



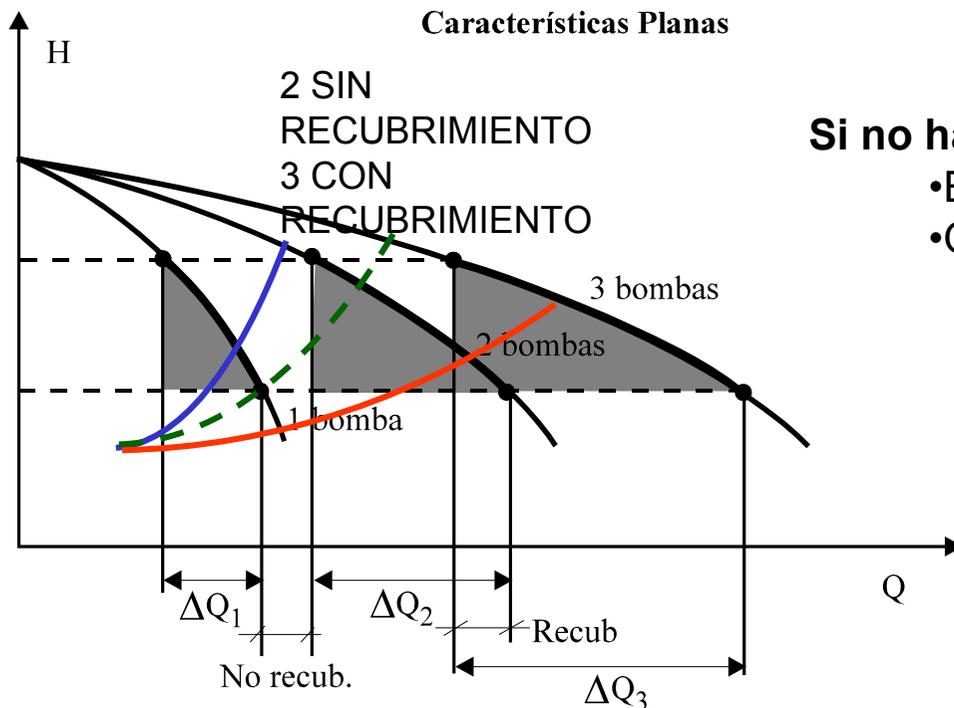
## ASOCIACIÓN EN PARALELO: Número de grupos necesarios + 1 de reserva activa



Características Planas



Características Verticales



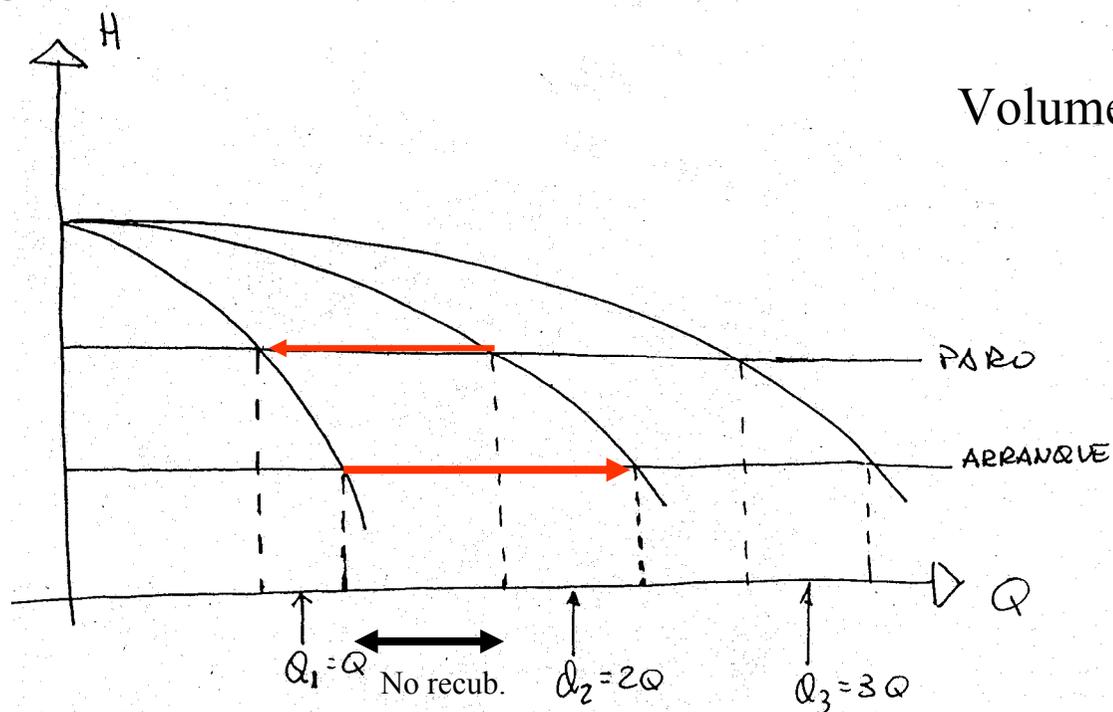
**Si no hay recubrimiento y el caudal no es estable:**

- Excesivos arranques y paradas
- Oscilaciones de presión por A/P

**Soluciones:**

Colocar calderín

Retardar maniobras (no se satisfacen las condiciones pero se limita la frecuencia de maniobras de arranque/paro)



## Volumen calderín

Entre 1 BVF y 2 BVF

$$T_{\text{llenado}} = \frac{\Delta V}{Q_2 - Q_c}$$

$$T_{\text{vaciado}} = \frac{\Delta V}{Q_c - Q_1}$$

$$T = T_{\text{llenado}} + T_{\text{vaciado}}$$

Caudal de consumo más desfavorable  
(menor T entre arranques)

$$Q_c = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$$

Con  $Q_1 = Q$  y  $Q_2 = 2Q$

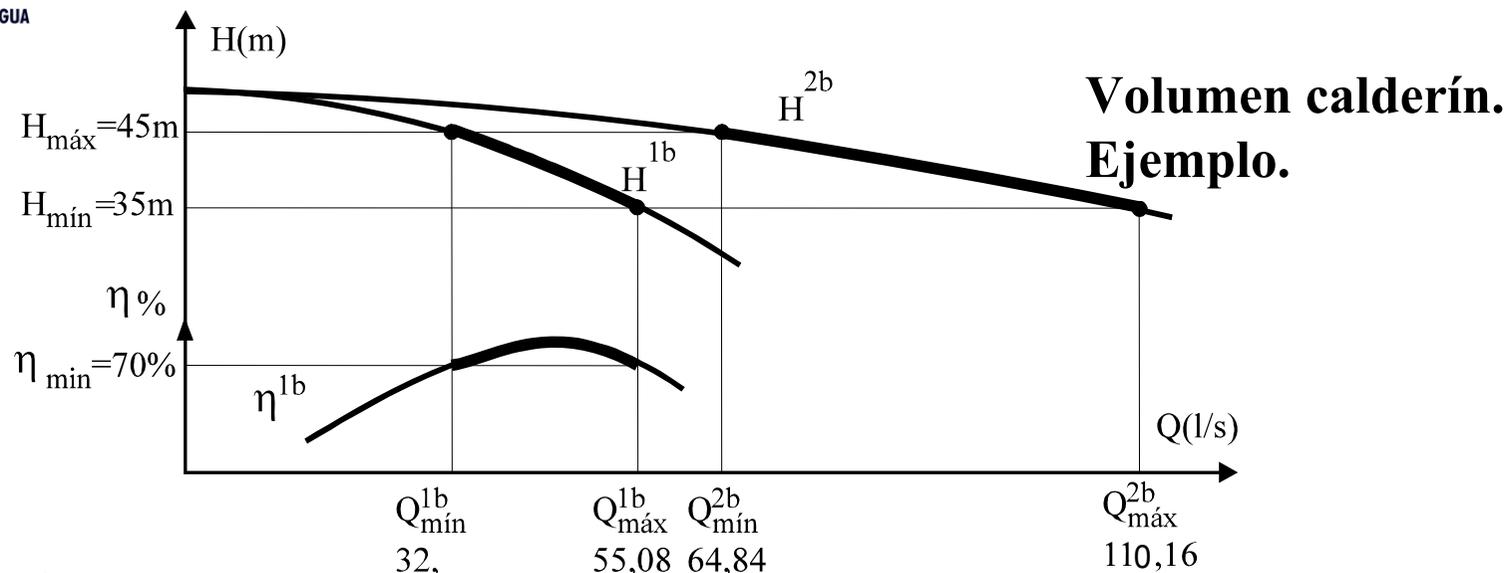
$$Q_c = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = \frac{Q + 2Q}{2} = \frac{3Q}{2}$$

$$T = \frac{\Delta V}{2Q - \frac{3Q}{2}} + \frac{\Delta V}{\frac{3Q}{2} - Q} = \frac{4 \cdot \Delta V}{Q}$$

es la misma expresión que para 1 sola bomba

Q: caudal por bomba

$$V_c(l) = 15k \frac{Q(\text{lpm})}{N_c(1/h)} \frac{H_{\text{max}}(\text{mca}) + 10'33}{H_{\text{max}}(\text{mca}) - H_{\text{min}}(\text{mca})}$$



$$Q_{1B} = 55,08 \text{ l/s}$$

$$Q_{2B} = 110,16 \text{ l/s} = 2 \cdot Q_{1B}$$

Si se adopta el Q máximo, del lado de la seguridad

Considerando:

Evolución isoterma

$k = 1,25$  (Coef, seguridad)

$N_c = 12$  ciclos/hora

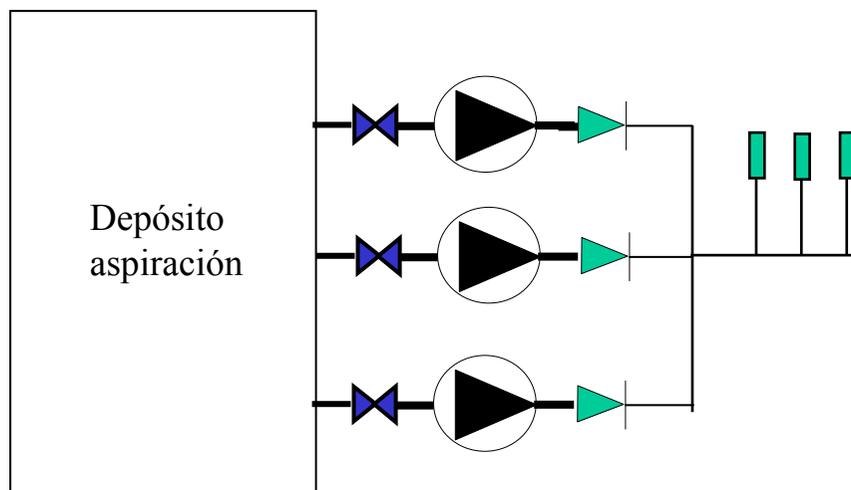
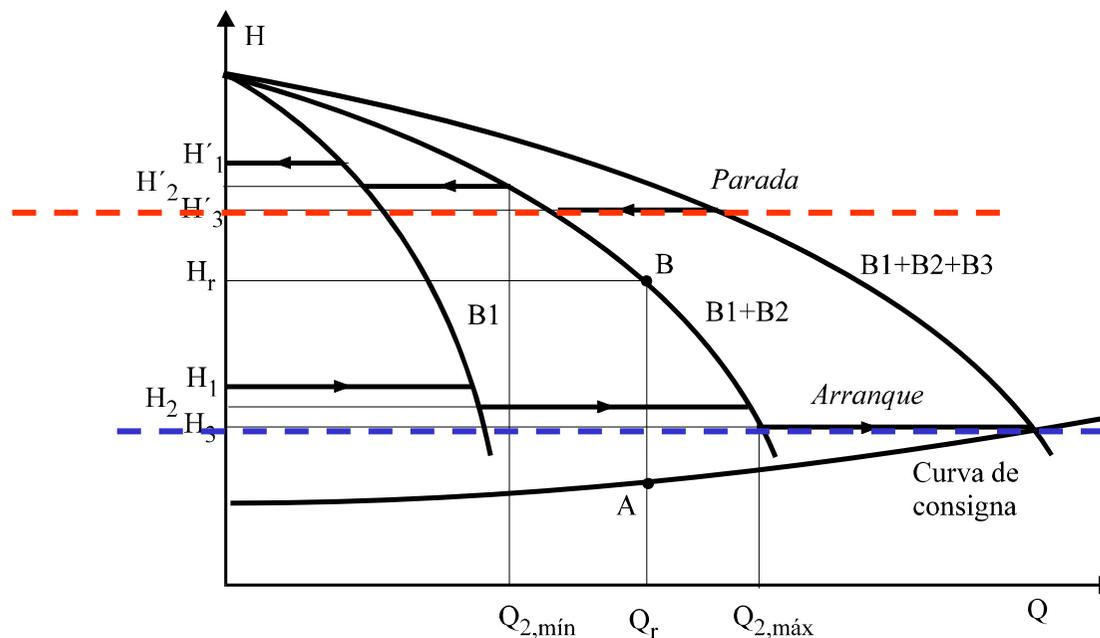
Caudal por bomba (Valor del caudal que suministra cada bomba en el punto de máximo caudal)

$$V_c(l) = 15k \frac{Q(lpm)}{N_c(1/h)} \frac{H_{\max}(mca) + 10'33}{H_{\max}(mca) - H_{\min}(mca)} = 15 \cdot 1,25 \cdot \frac{(55,08 \cdot 60)}{12} \cdot \frac{45 + 10,33}{45 - 35} = 28,57 \text{ m}^3$$

# ASOCIACIÓN EN PARALELO BVF

## Diferentes niveles de arranque y paro

### REGULACIÓN MANOMÉTRICA



3 presostatos

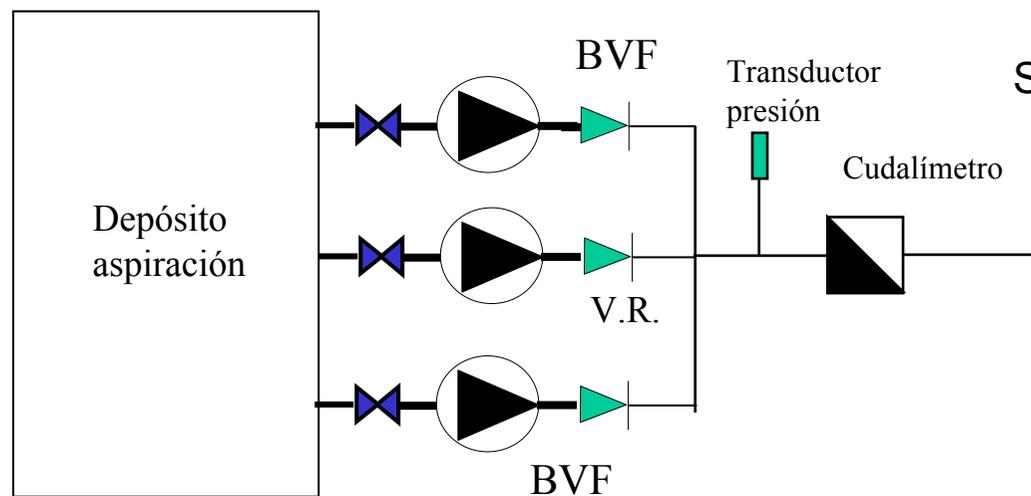
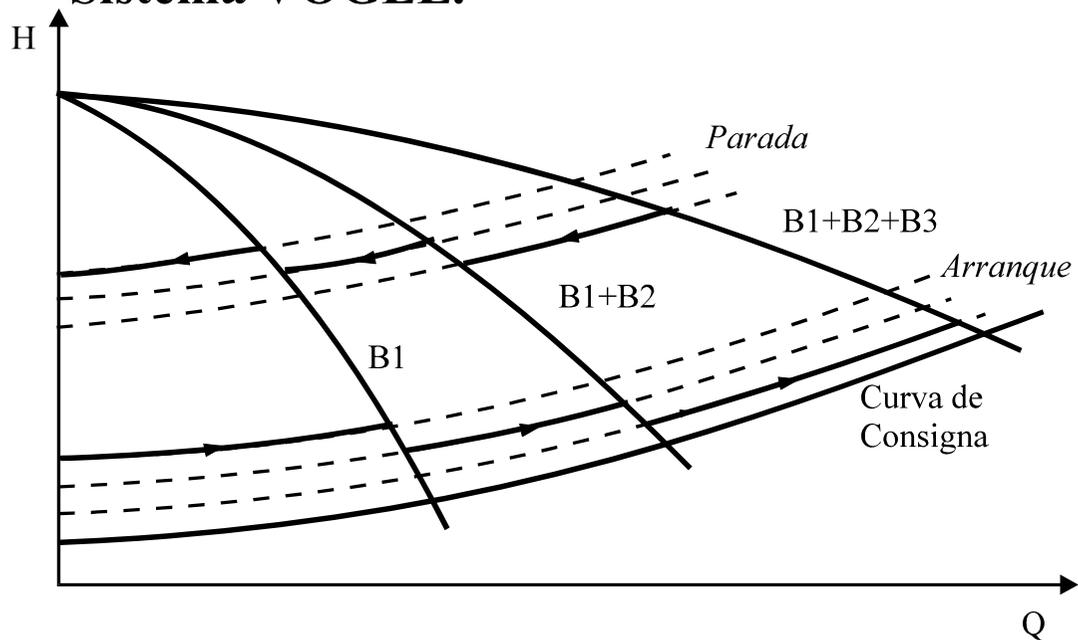
Niveles de arranque y paro diferentes

O

1 presostato o transductor de presión + PLC

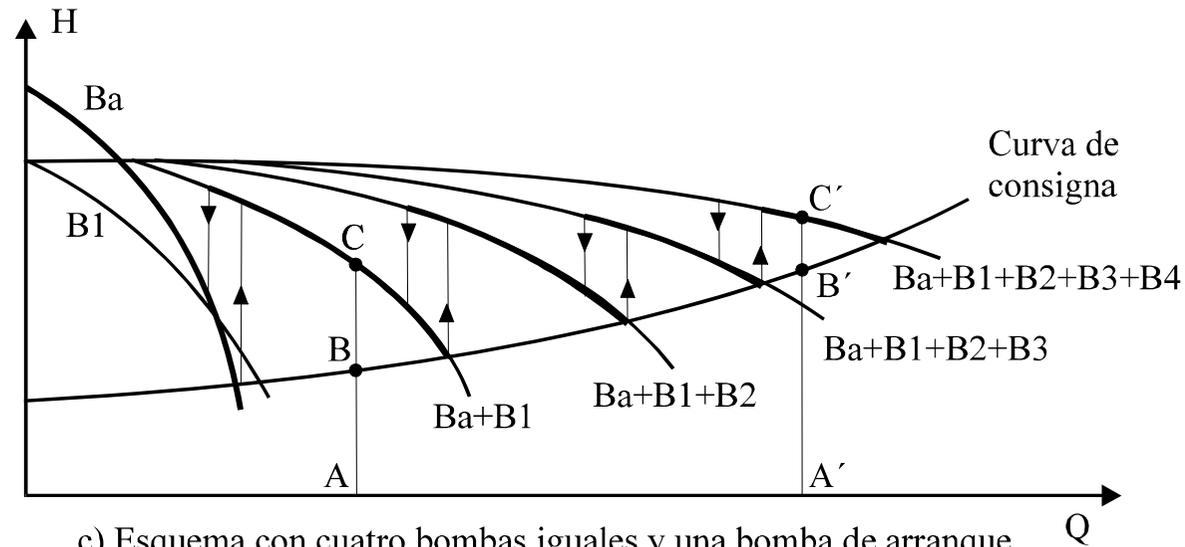
Mismo nivel de arranque y paro para todas

## ASOCIACIÓN EN PARALELO BVF Sistema VOGEL.

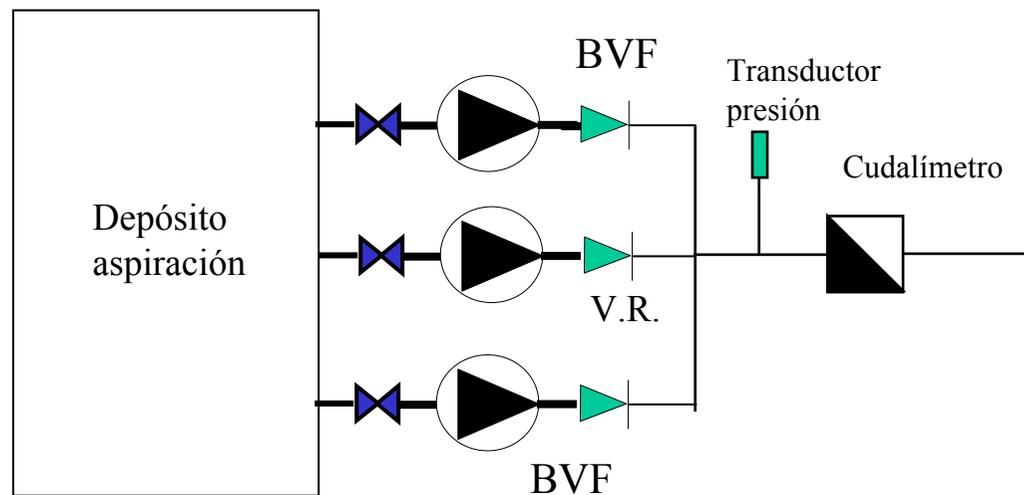


Se ajusta más a la Curva de Consigna

## ASOCIACIÓN EN PARALELO BVF REGULACIÓN CAUDALIMÉTRICA



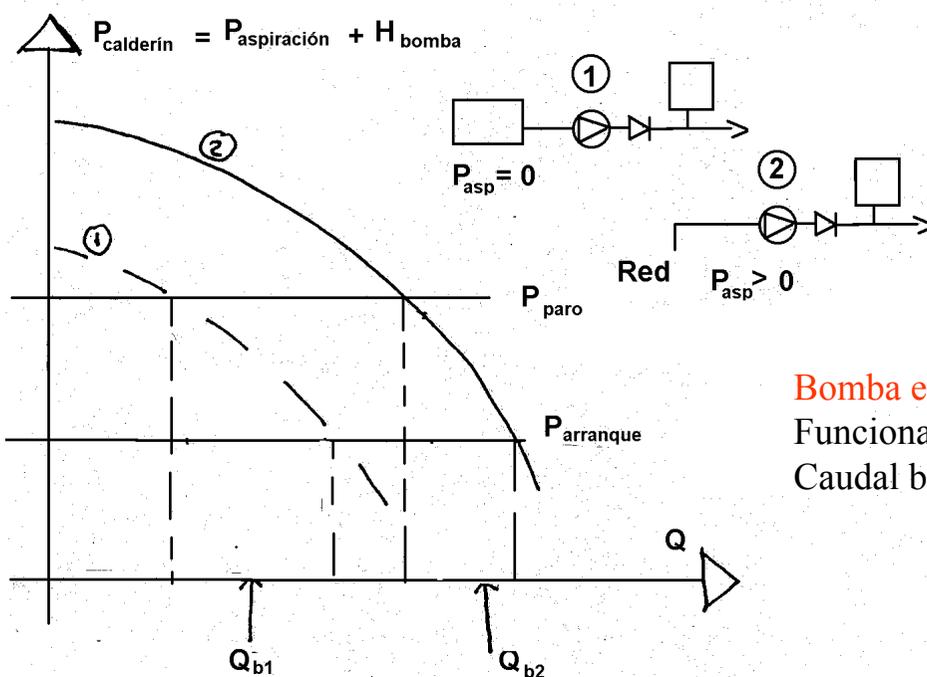
c) Esquema con cuatro bombas iguales y una bomba de arranque



Siempre debe de existir Recubrimiento

## INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE ASPIRACIÓN EN EL FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS.

La misma bomba aspirando de depósito o de red



**Bomba elegida según 1, funcionando como 2**

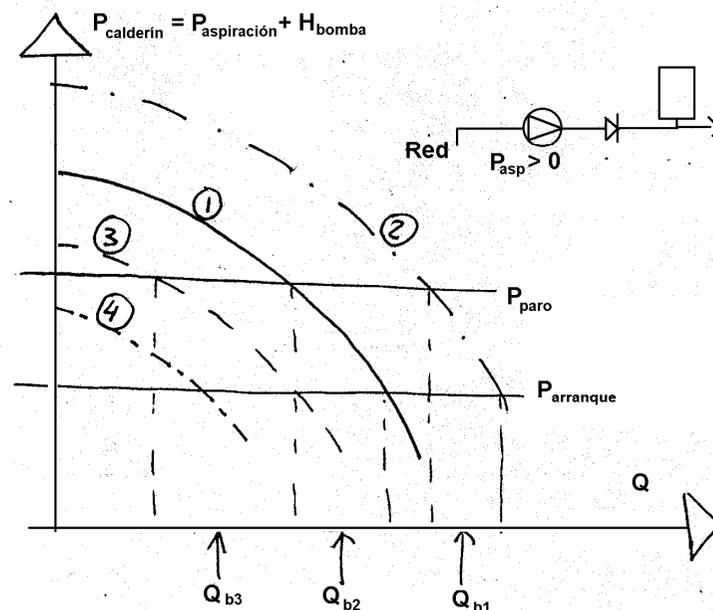
Funcionando fuera de puntos de elevado rendimiento  
Caudal bombeo mayor ( $Q_{b2}$ ), calderín insuficiente.

**Bomba elegida según 2, funcionando como 1**

Funcionando fuera de puntos de elevado rendimiento  
Caudal bombeo menor ( $Q_{b1}$ ), insuficiente para mantener presión

## INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE ASPIRACIÓN EN EL FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS.

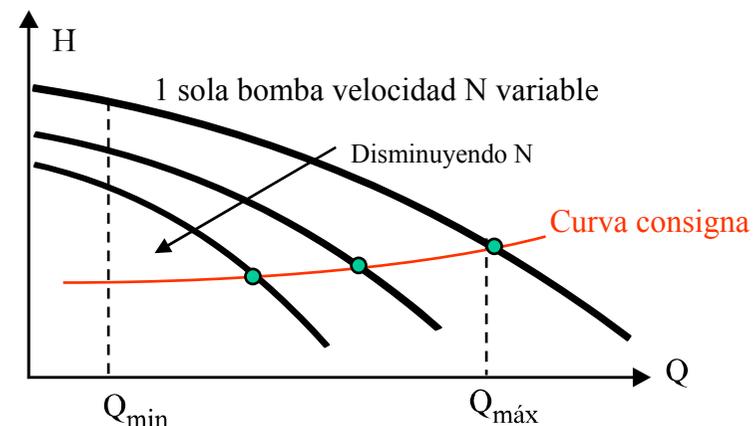
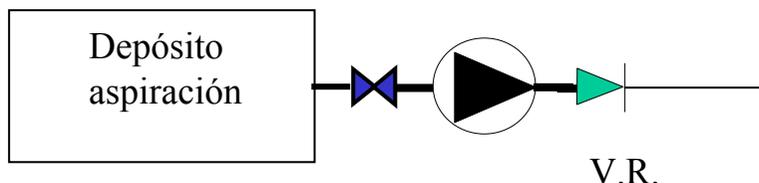
La misma bomba aspirando de red. Variación de presión en red.



- 1.- Presión de red de diseño
- 2.- Presión de red superior (calderín insuficiente)
- 3.- Presión de red inferior (caudales insuficiente)
- 4.- Presión de red mínima (la bomba no para nunca)

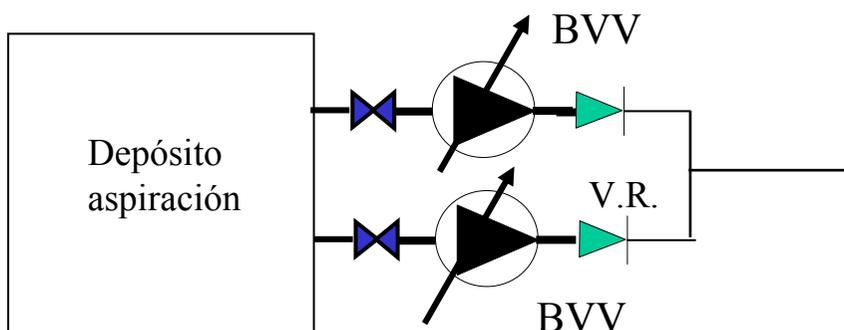
# BOMBEO DIRECTO **B**ombas **V**elocidad **V**ariable

## 1 sola Bomba de velocidad variable BVV

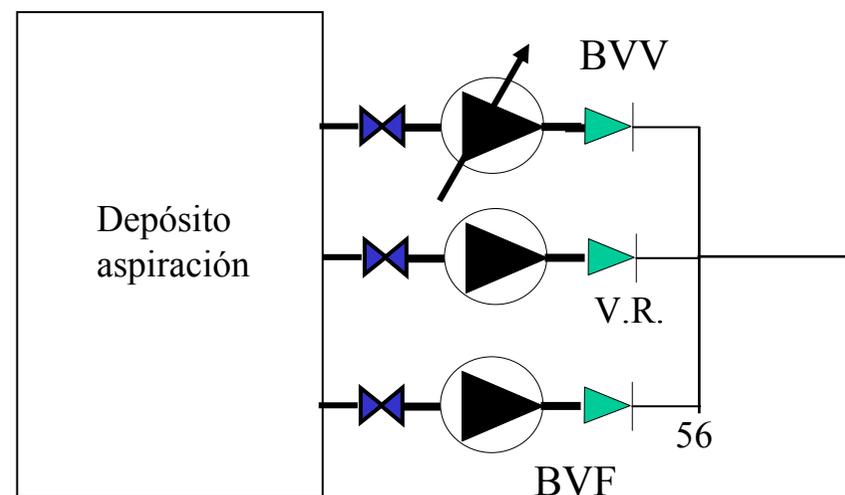


- Maniobras suaves
- Seguimiento punto consigna
- Atención rendimiento bomba a distintas N
- Es posible el funcionamiento del mismo motor sin variador

## Varias BVV en paralelo (reserva activa)



## Varias BVF en paralelo con 1 o más BVV (reserva activa)



# REGULACIÓN CON BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE

$$H(N_0) = A - B \cdot Q^2$$

$$f = \frac{p \cdot N}{60}$$

f : frecuencia en Hz (f red = 50 Hz)

P: número de pares de polos (1 o 2) del motor

N: velocidad de giro en r.p.m.

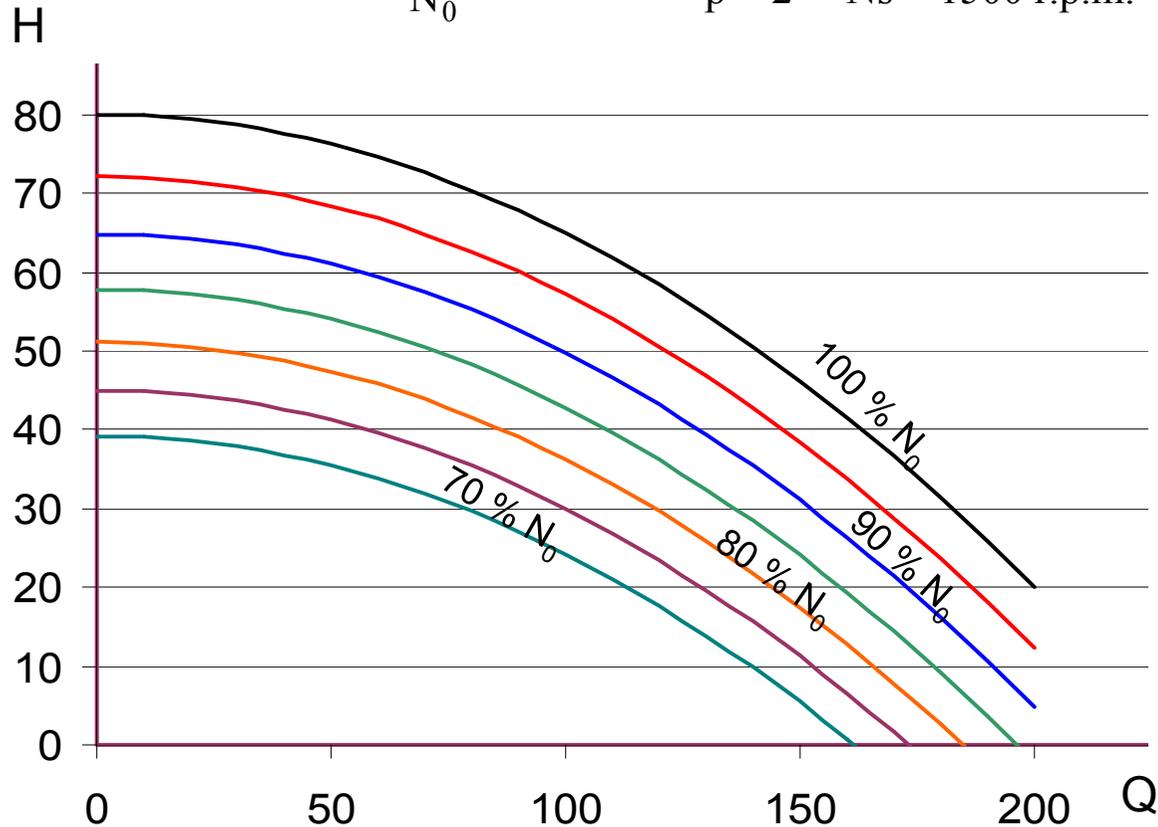
$$H(N) = A \cdot \alpha^2 - B \cdot Q^2$$

$$\alpha = \frac{N}{N_0}$$

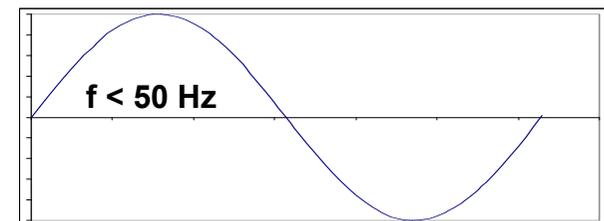
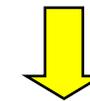
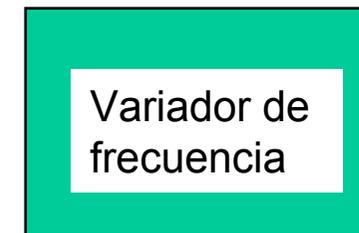
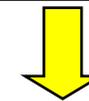
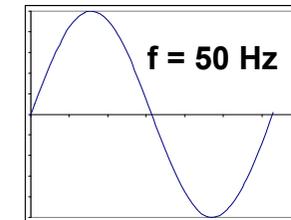
Para f = 50 Hz.

p = 1    Ns = 3000 r.p.m.

p = 2    Ns = 1500 r.p.m.

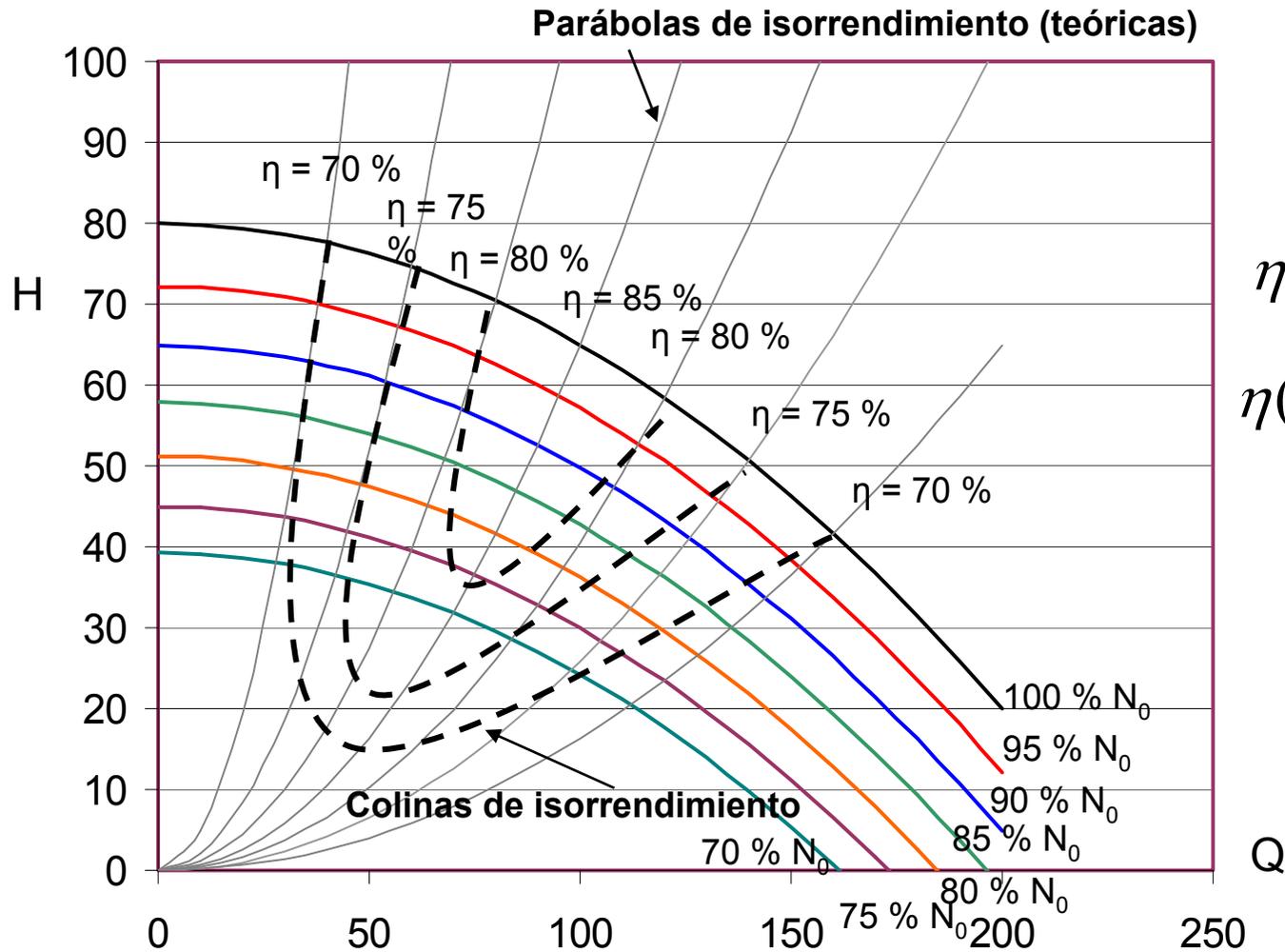


Si varía f, varía N



# CURVAS DE ISORRENDIMIENTO PARA BOMBAS DE VELOCIDAD VARIABLE

Cuando varía la velocidad de giro el rendimiento se ve afectado



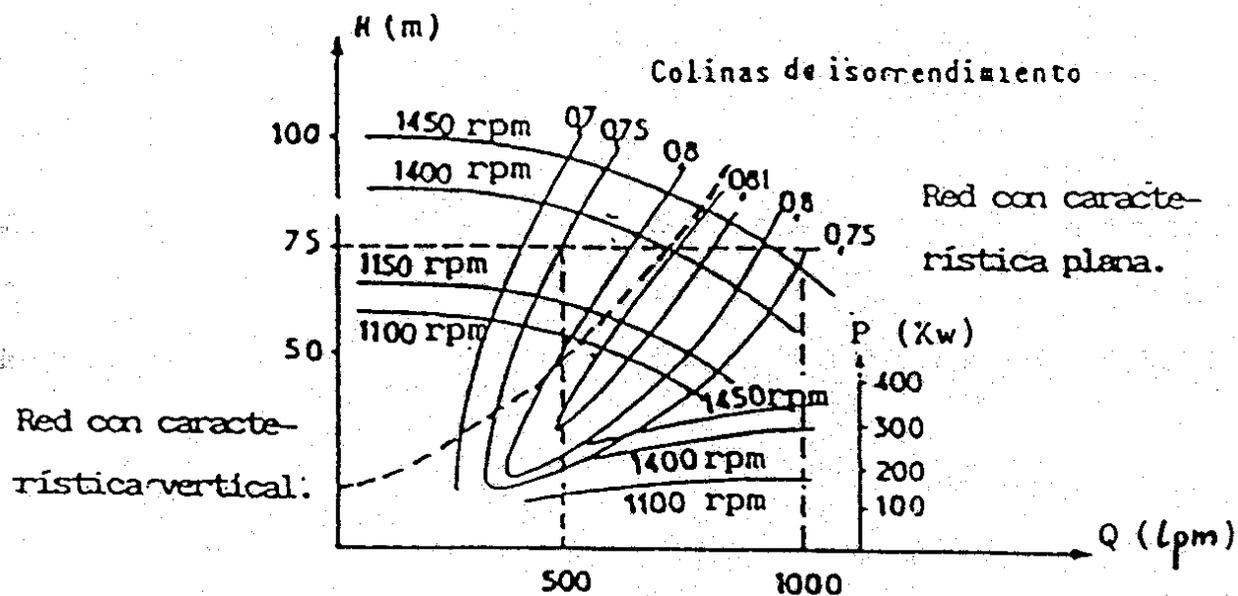
$$\alpha = \frac{N}{N_0}$$

$$\eta(N_0) = E \cdot Q - F \cdot Q^2$$

$$\eta(N) = E \cdot \frac{Q}{\alpha} - F \cdot \frac{Q^2}{\alpha^2}$$

Límite de velocidad de giro mínima (f mínima entre 35 o 40 Hz)

## ZONA ÚTIL DE FUNCIONAMIENTO DE BVV



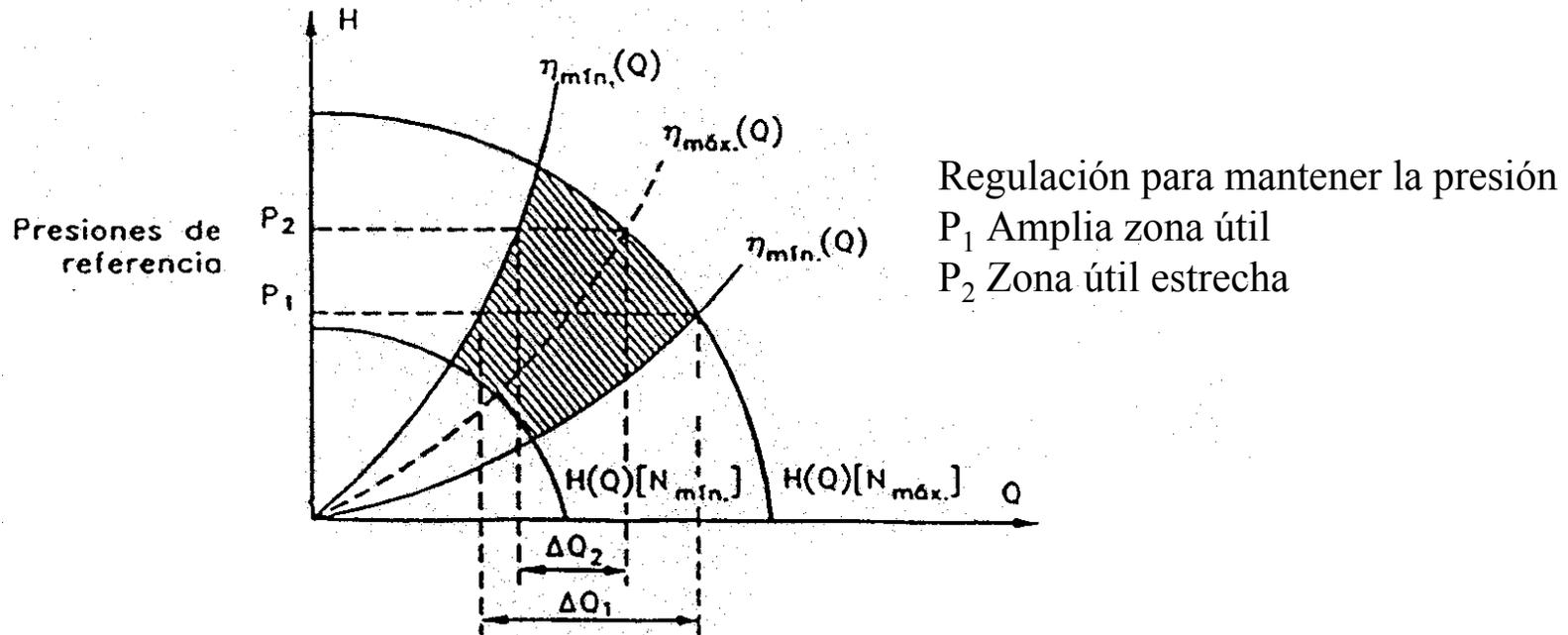
Curva resistente parabólica (vertical):

El  $\eta$  es elevado por encima de 1100 rpm (76 %)

Curva resistente horizontal:

De 500 a 1000 lpm  $\eta > 75$  % (de 1300 rpm (90 %) a 1450 rpm)

# ZONA ÚTIL DE FUNCIONAMIENTO

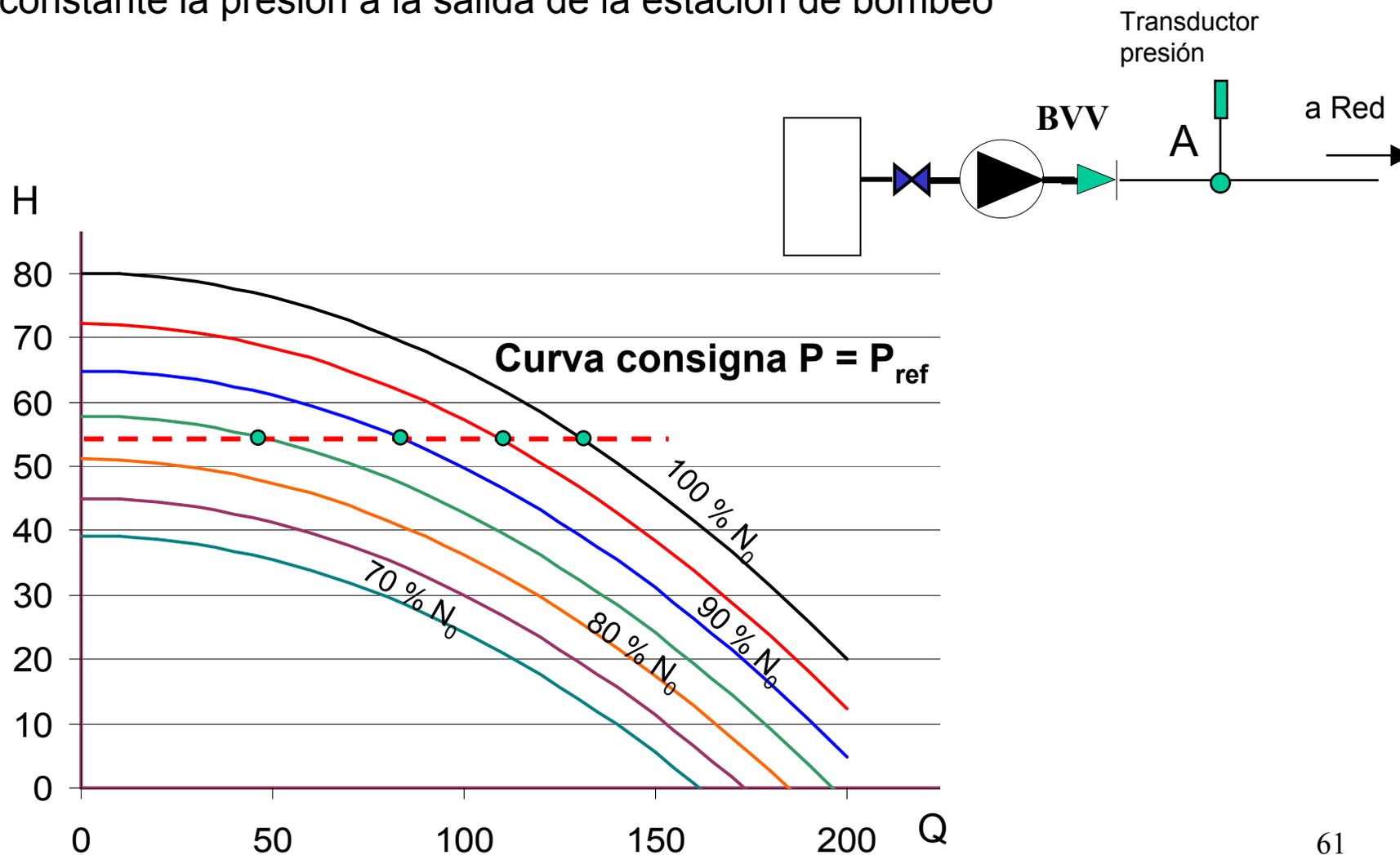


Para mantener  $\eta$  mínimo hay que acotar campo trabajo

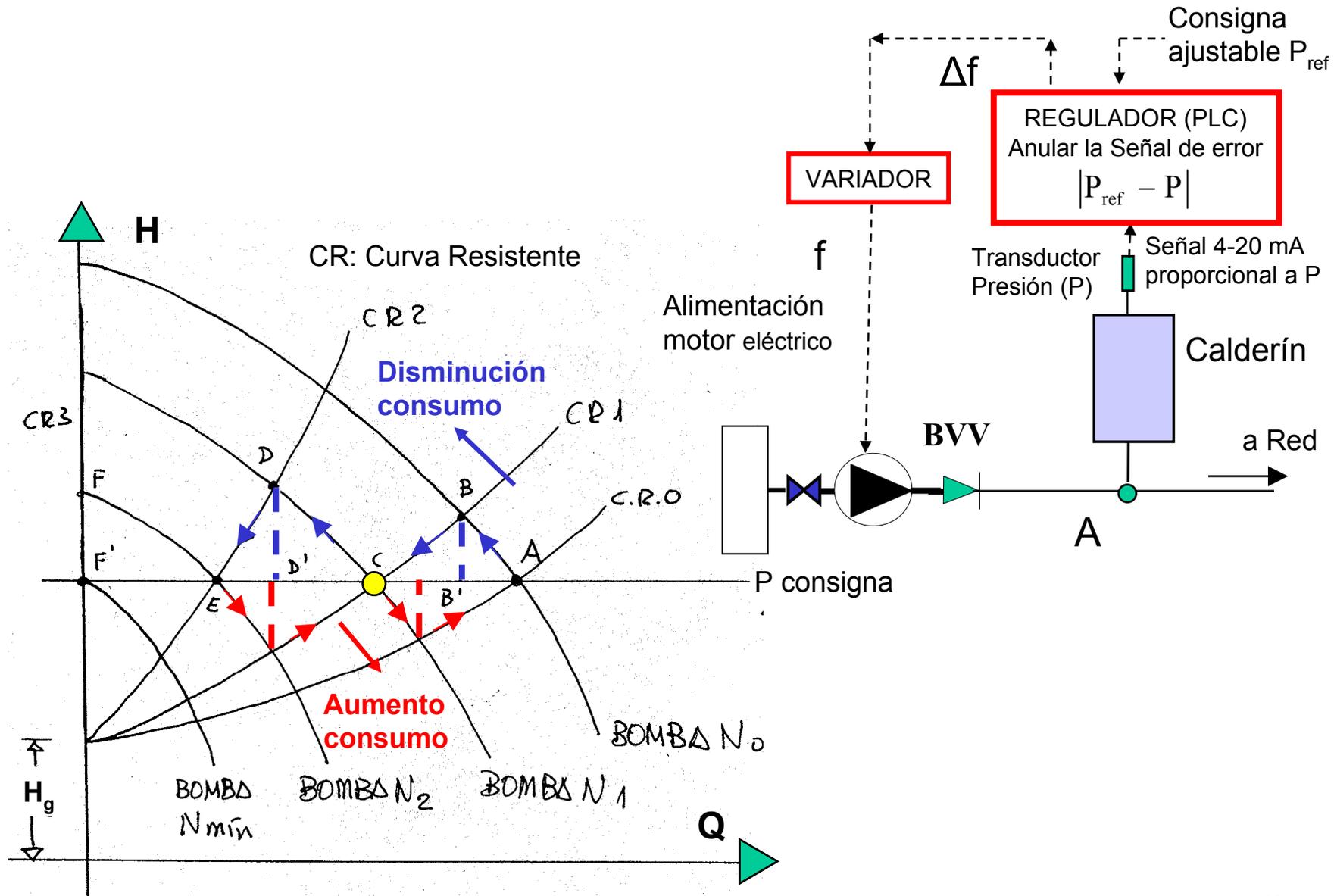
- Velocidad mínima de giro
- Parábolas isorrendimiento

## REGULACIÓN CON BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE

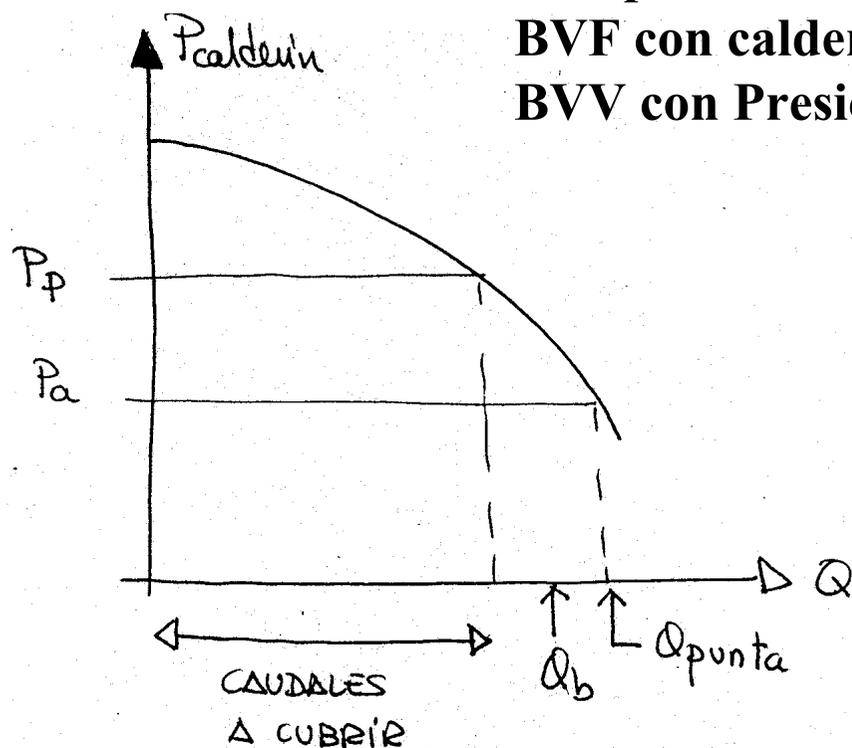
En la mayoría de ocasiones la consigna es mantener constante la presión a la salida de la estación de bombeo



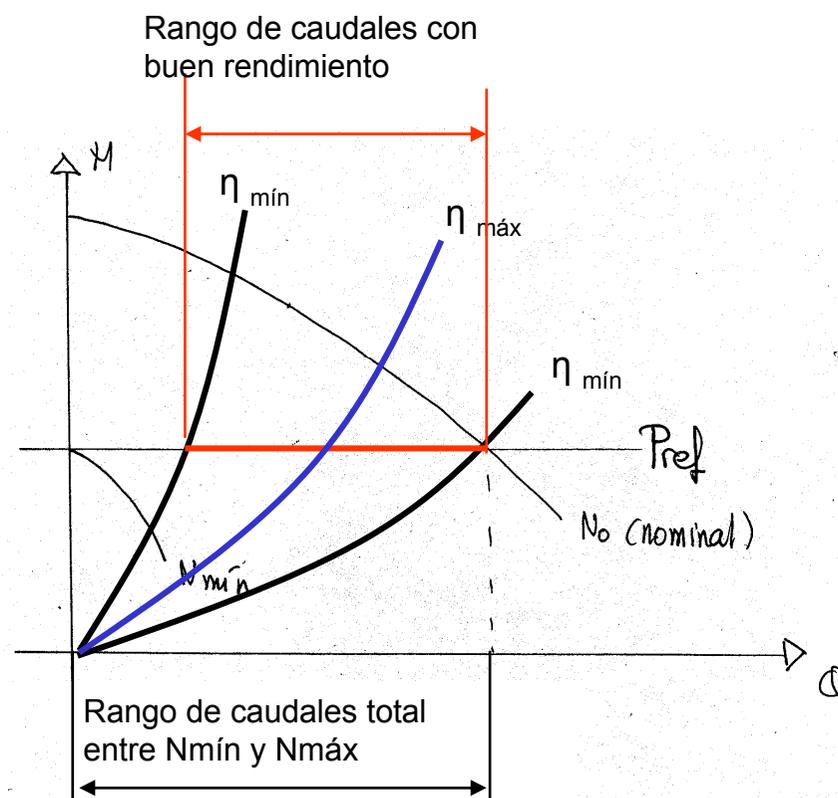
# REGULACIÓN CON BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE



## Comparación zonas de funcionamiento BVF con calderín BVV con Presión de referencia



- El rendimiento siempre es bueno.
- Las presiones fluctúan mucho en la red
- Mayor número de maniobras de arranque/paro
- Volumen de calderín elevado para evitar arranques y paradas frecuentes

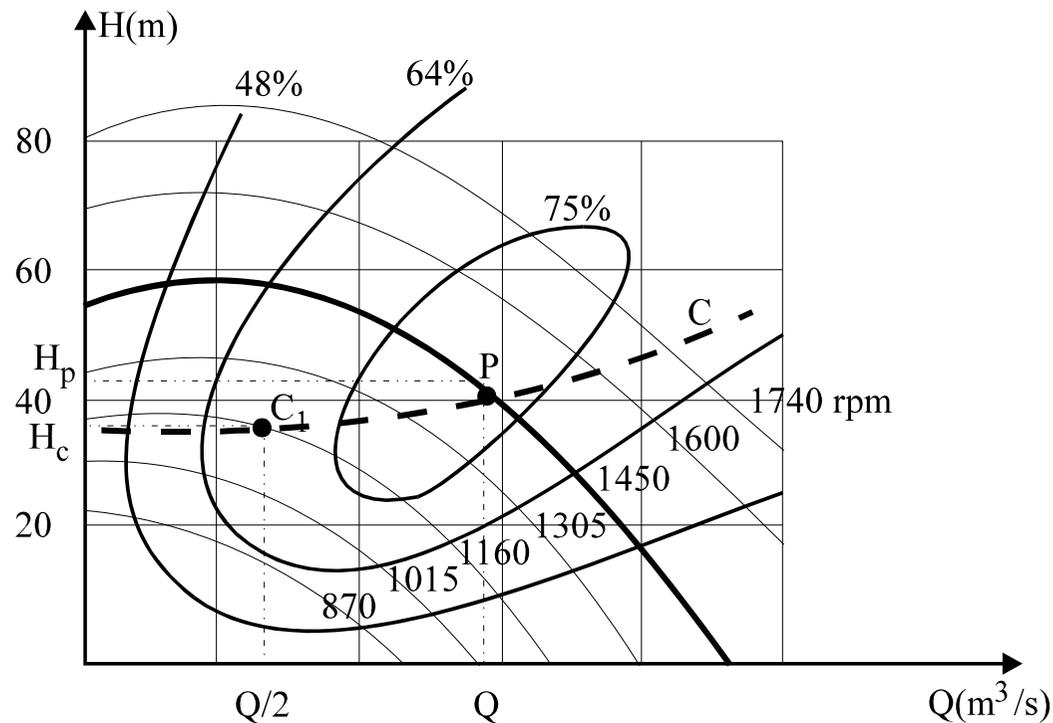


- Presión en la red estable
- Maniobras no bruscas

## REGULACIÓN CON BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE (BVV)

Se puede regular para lograr estar sobre la curva de consigna (exactamente la presión necesaria para el caudal necesario)

$$W_{C_1} = \frac{\gamma Q / 2 H_{C_1}}{\eta_{C_1}} = \frac{1.000 \cdot 0,14 \cdot 38}{0,68 \cdot 75} = 104,3 \text{ CV}$$

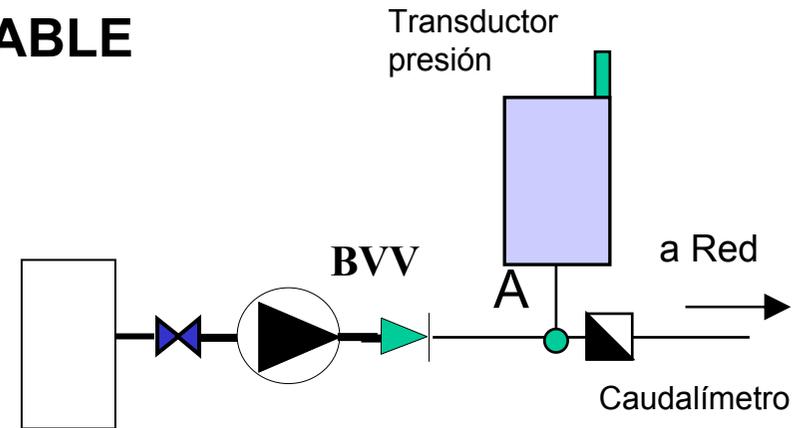
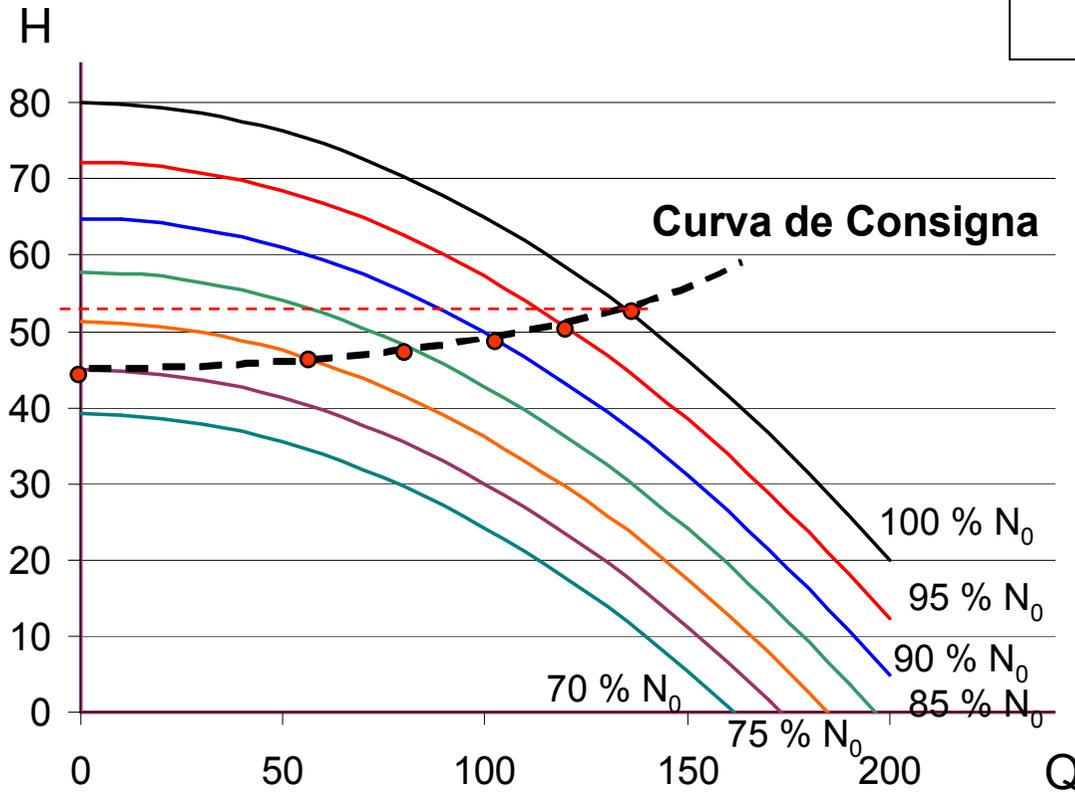


$$\eta_{\text{inst, BVV}} = \frac{70,9}{104,3} = 68 \%$$

Igual al  $\eta$  de la bomba

# REGULACIÓN CON BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE

Es posible también mantenerse sobre la **Curva de consigna**  $H = f(Q)$



**En este caso:**

$$\eta_{reg} = 1$$

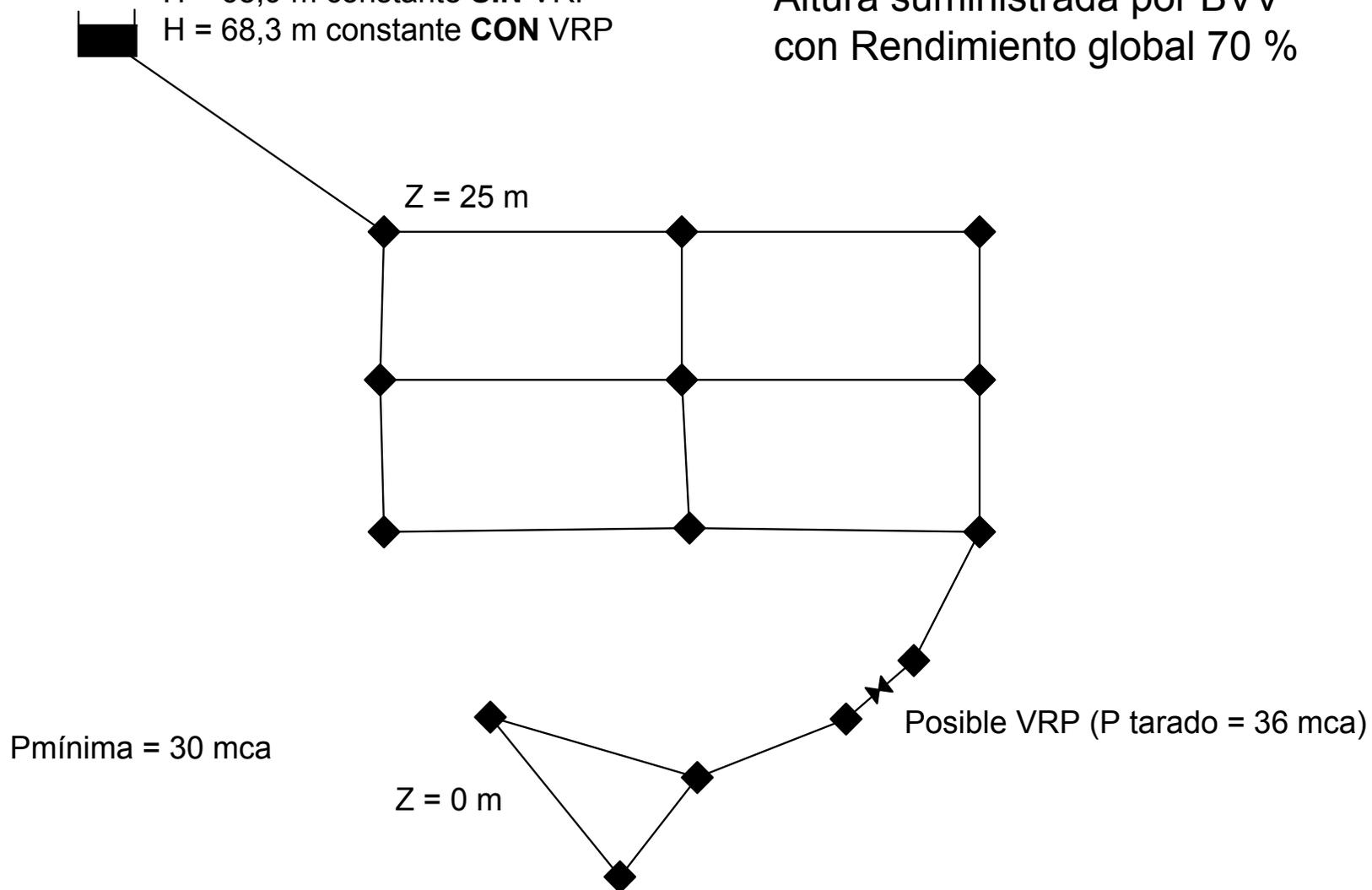
$$\eta_{global} = \eta_b \cdot \eta_{me}$$

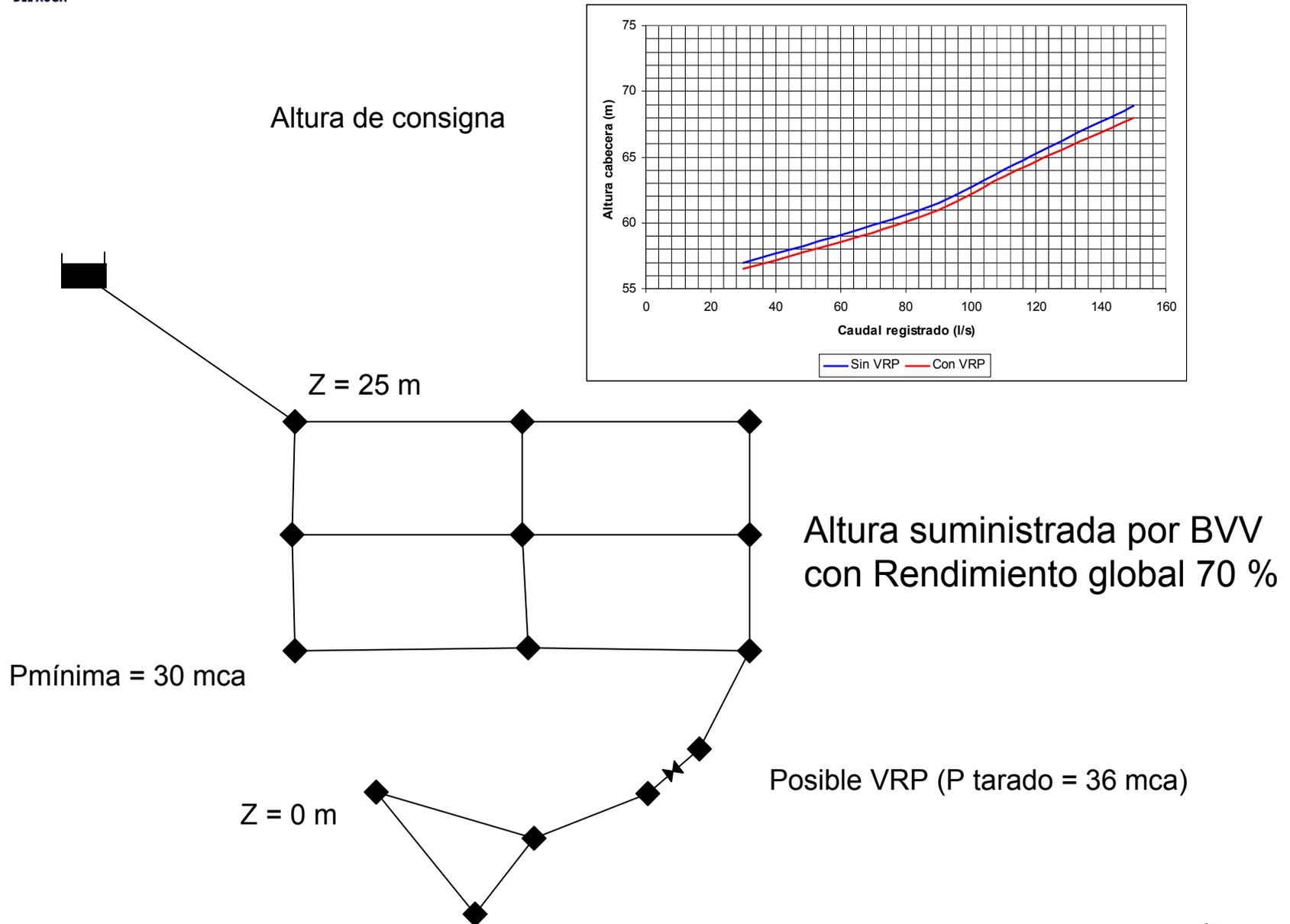
## Ejemplo: Red con 25 % aprox. de volumen fugado

H = 68,9 m constante **SIN** VRP

H = 68,3 m constante **CON** VRP

Altura suministrada por BVV  
 con Rendimiento global 70 %





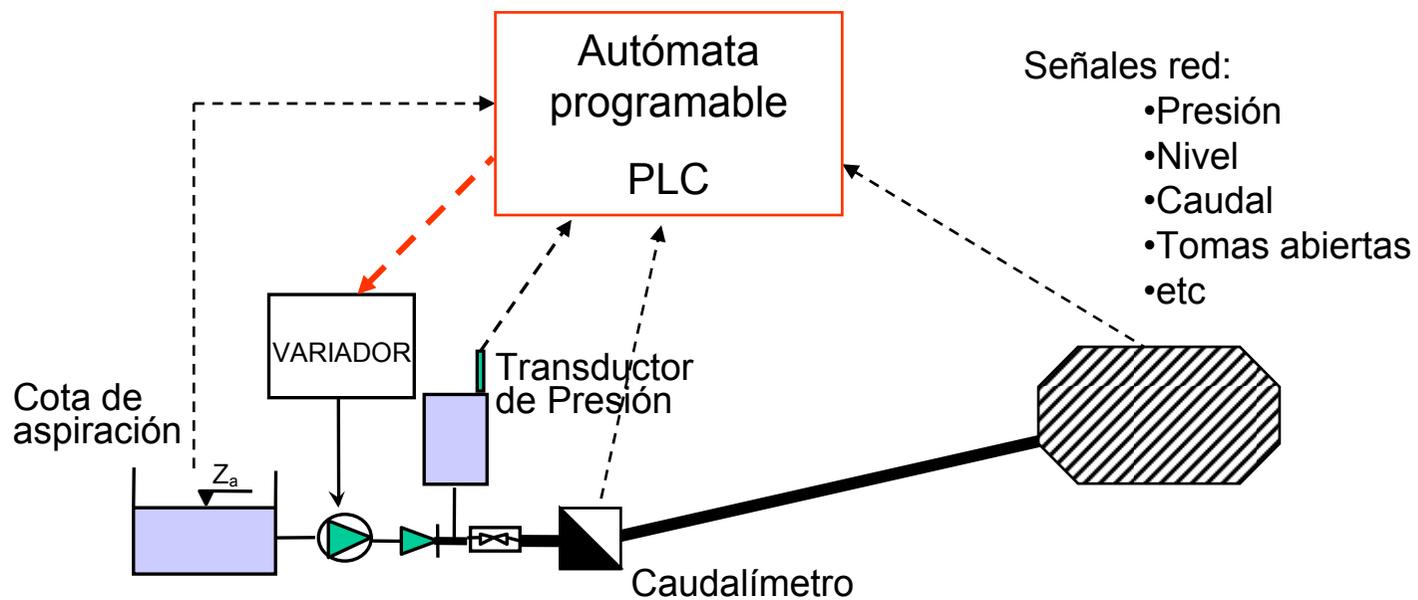
## Comparación Resultados

<b>Caso</b>	<b>Volumen total (m3/día)</b>	<b>Comparación Volumen</b>	<b>Energía (Kw.h/día)</b>	<b>Comparación Energía</b>
<b>H cte sin VRP</b>	10624,5	1,00	2849,7	1,00
<b>H CC sin VRP</b>	10230,8	0,96	2537,5	0,89
<b>H cte con VRP</b>	10226,6	0,96	2719,1	0,95
<b>H CC con VRP</b>	9936,3	0,94	2443,3	0,86

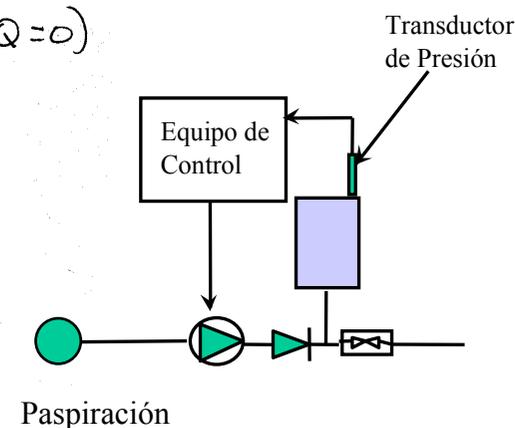
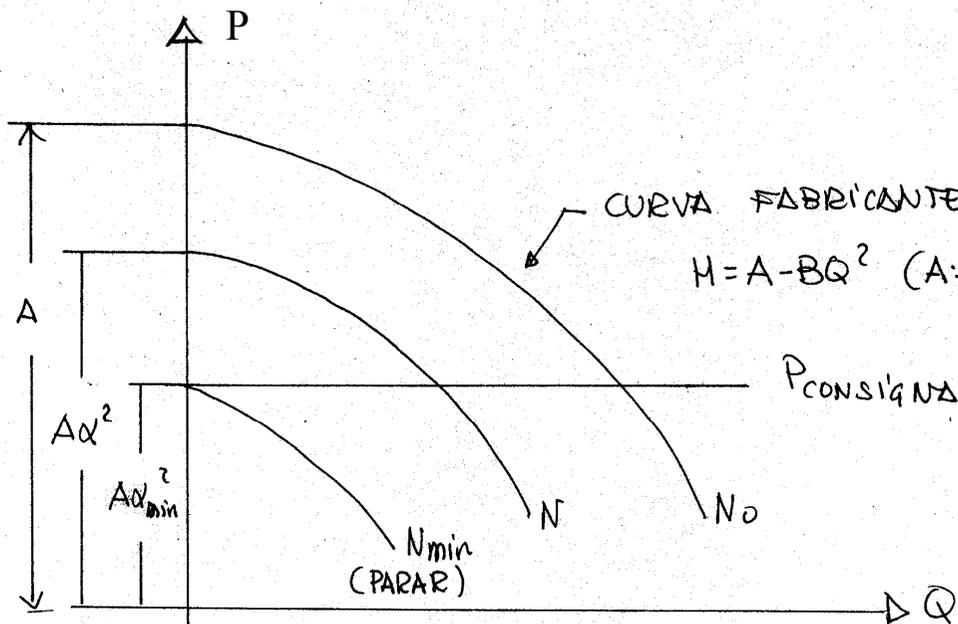
Reducción Volumen máxima = 6 %

Reducción Energía consumida máxima = 14 %

## TAMBIÉN ES POSIBLE UTILIZAR OTRAS VARIABLES COMO REFERENCIAS



## Velocidad mínima



Curva a No:  $H = A - BQ^2$

Curva a N:  $H = A\alpha^2 - BQ^2$  con  $\alpha = N/N_0$

Curva a No:  $H = A\alpha_{min}^2 - BQ^2$  con  $\alpha_{min} = N/N_0$

A  $N_{min}$ , el caudal  $Q=0$ . La altura, para esta situación, es  $A\alpha_{min}^2 = P_{consigna} - P_{aspiración}$ .

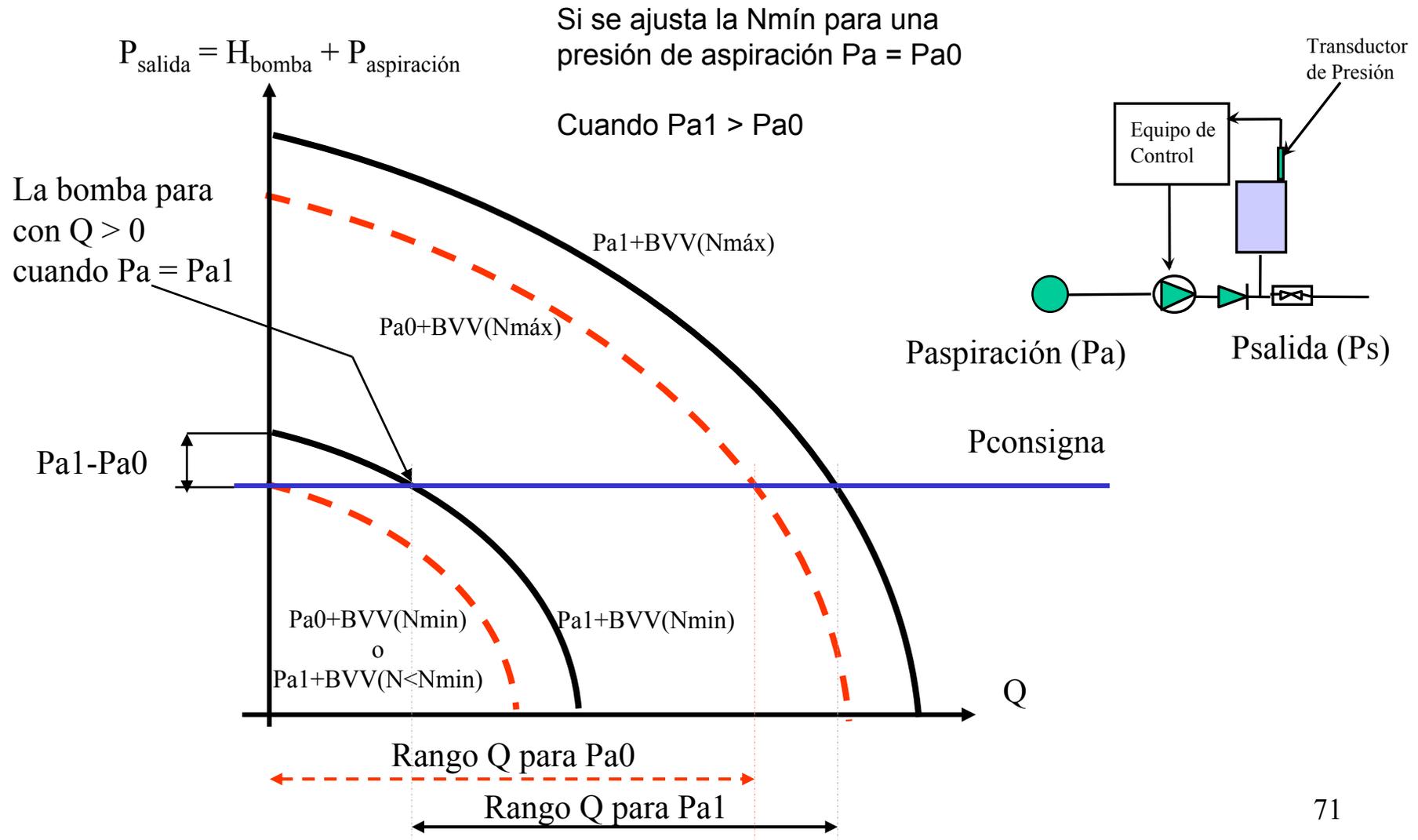
$$\alpha_{min} = \sqrt{\frac{P_{consigna} - P_{aspiración}}{A}}$$

$A = 80 \text{ mca}$   
 $P_{aspiración} = 0$   
 $P_{consigna} = 50 \text{ mca}$

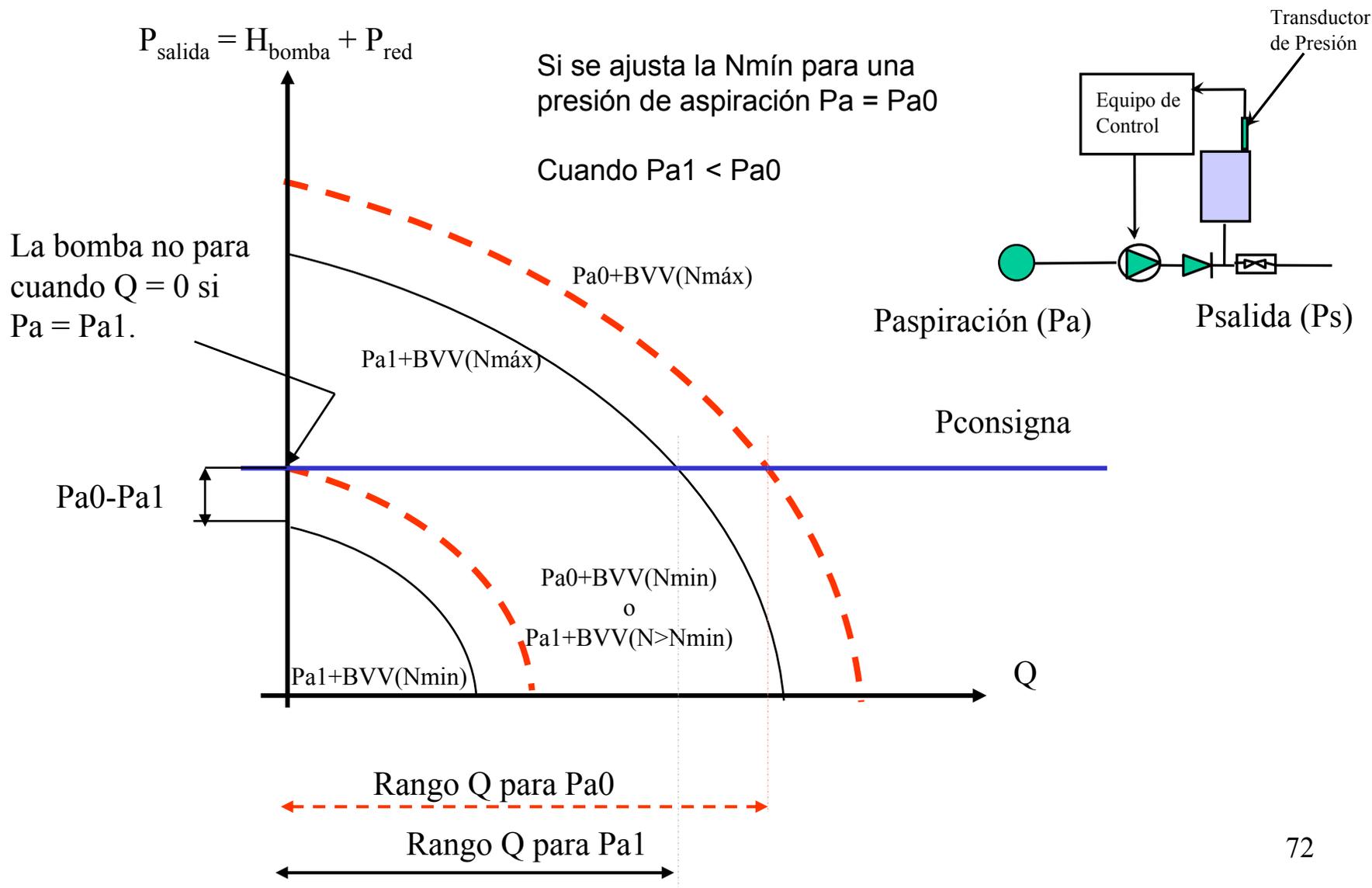
$$\alpha_{min} = \sqrt{\frac{50}{80}} = 0,79$$

$$f = 50 \times 0,79 = 39,5 \text{ Hz.}$$

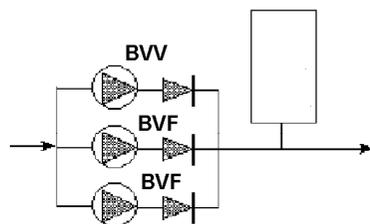
## INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE ASPIRACIÓN INCREMENTO DE LA PRESIÓN DE ASPIRACIÓN



## INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE ASPIRACIÓN DISMINUCIÓN DE LA PRESIÓN DE ASPIRACIÓN



## Diferentes modos de regular con BVF y BVV en paralelo Tres Bombas iguales

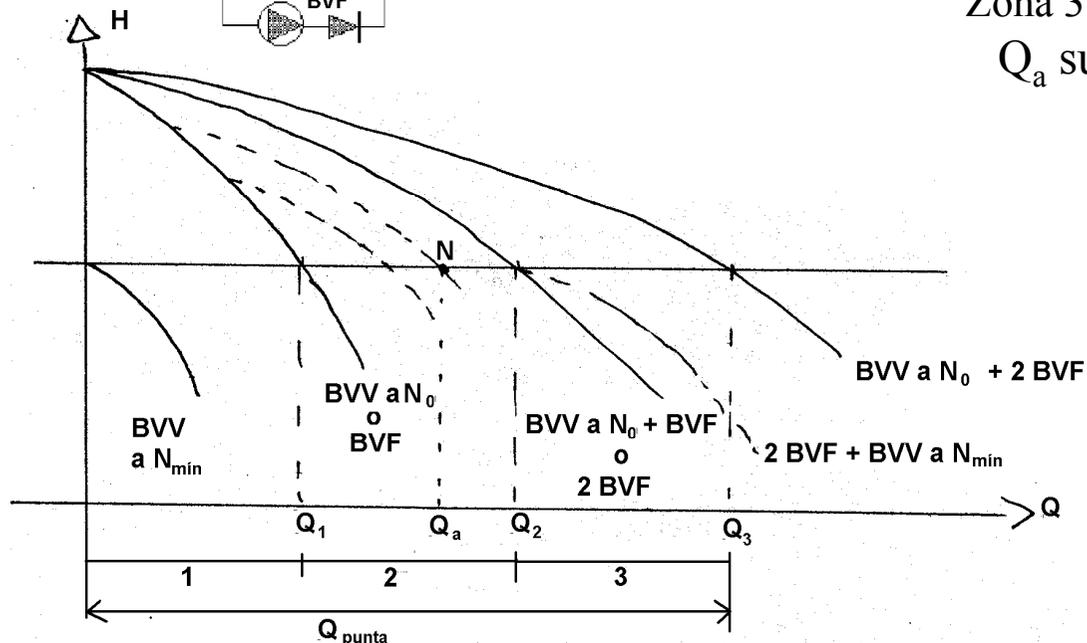


Zona 1: 1 BVV

Zona 2: 1 BVV + 1 BVF

Zona 3: 1 BVV + 2 BVF

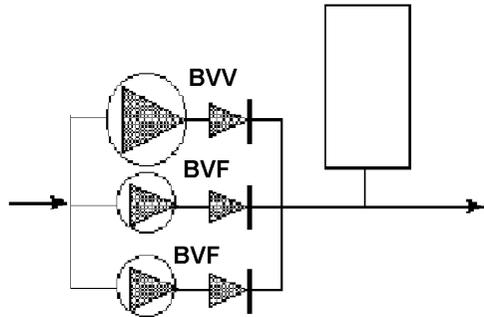
$Q_a$  suministrado por 1 BVF + 1 BVV a  $N$



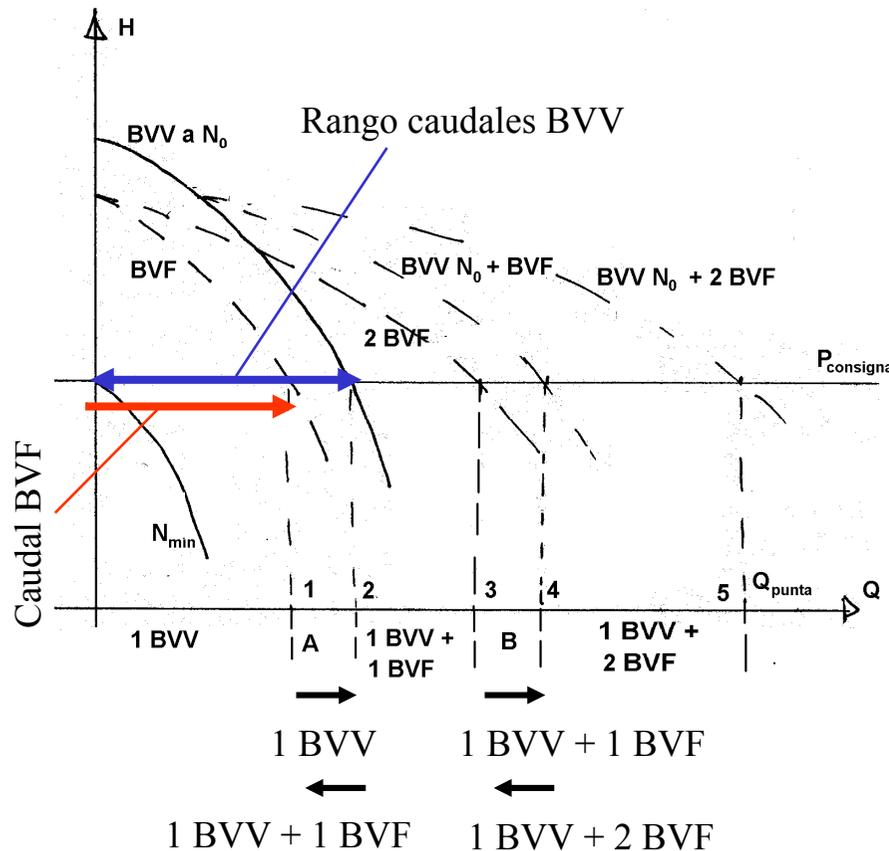
Problema:  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  inestables

Solución: Calderín acumulador  
Solapamiento

El calderín aumenta la "Inercia" del sistema y lamina (desde el punto de vista de la red) las sobrepresiones y depresiones originadas por los arranques y paros de las BVF.



## DIFERENTES MODOS DE REGULAR CON BVF Y BVV EN PARALELO



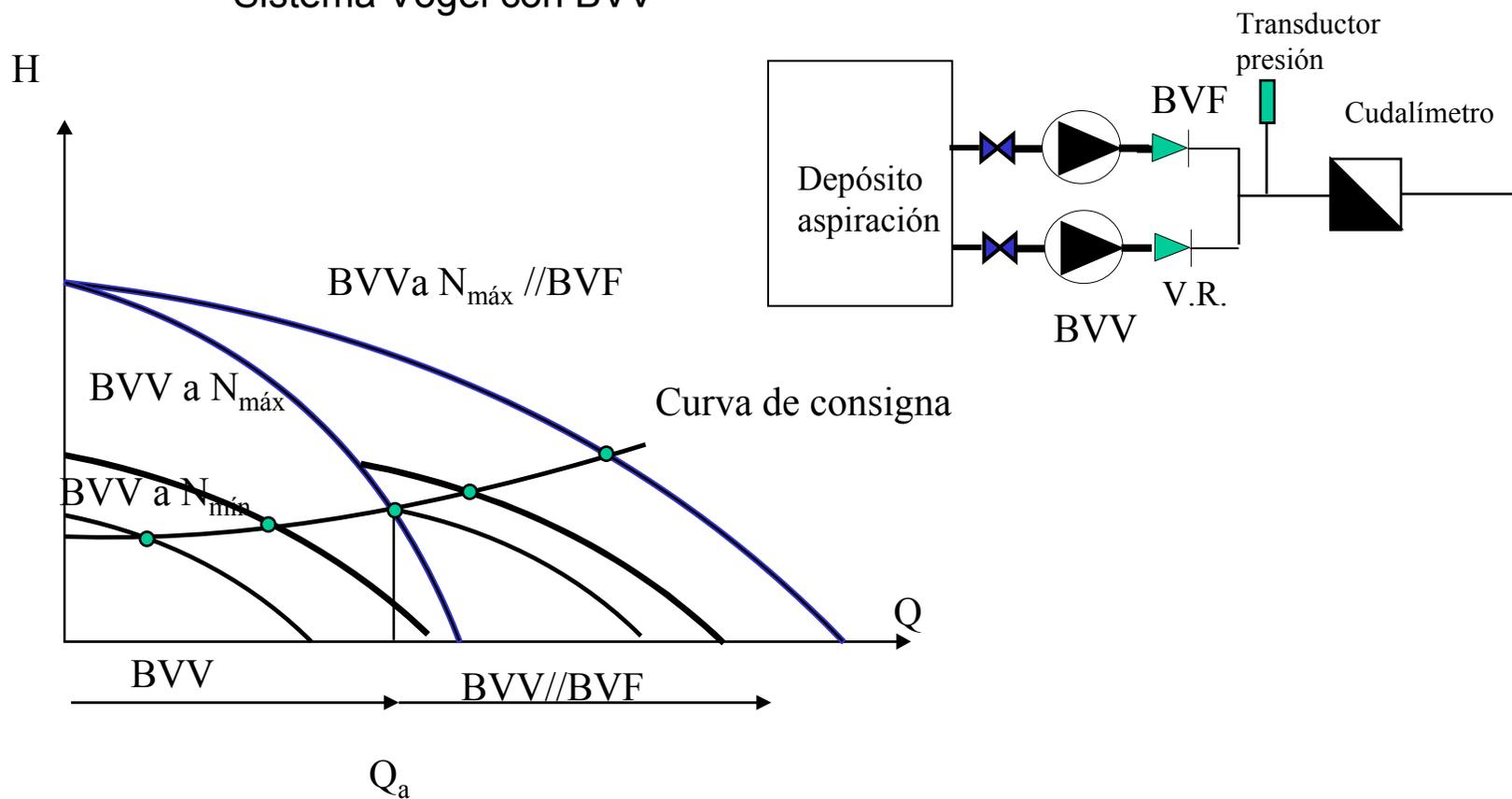
### Solapamiento

- Una bomba de mayor potencia
- Tres bombas iguales pero permitir alimentación de BVV por encima de 50 Hz (Atención potencia variador y motor)

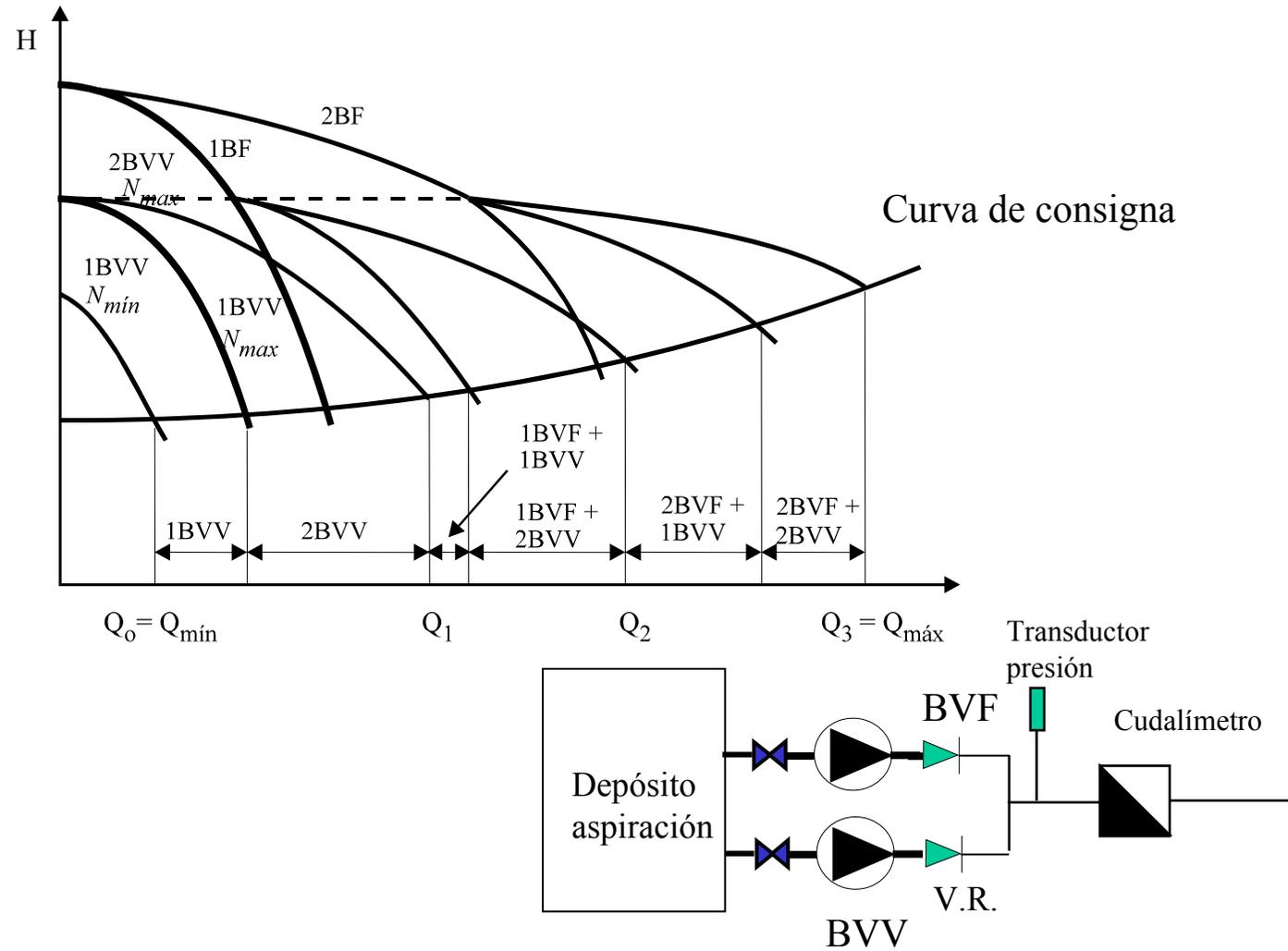
$$\frac{P(N)}{P(N_0)} = \alpha^3$$

Si  $\alpha_{m\acute{a}x} = 1,1$  (55 Hz), hay que incrementar la potencia en un 33 %.

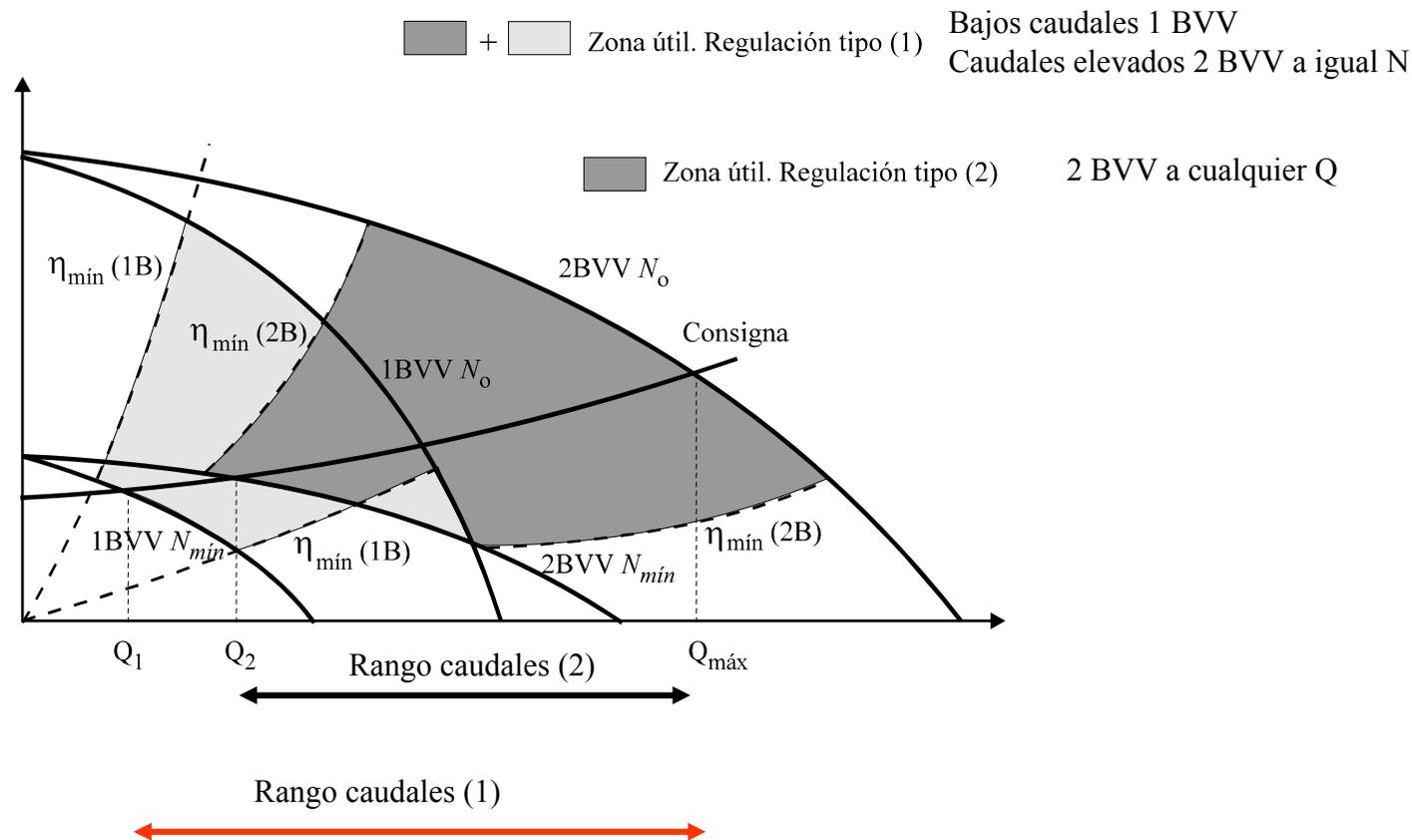
### Sistema Vogel con BVV



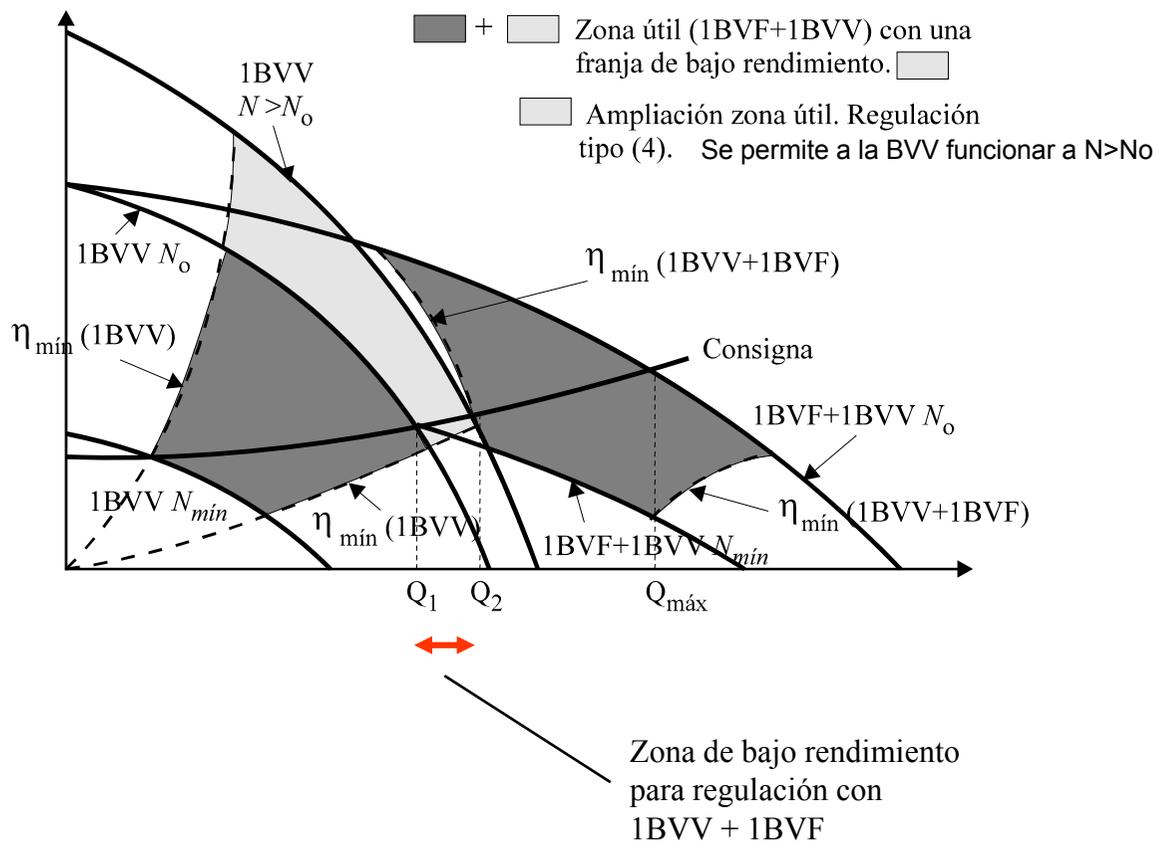
La BVF arranca cuando BVV a vel. Máxima o cuando  $Q > Q_a$   
 La BVF para cuando BVV está a vel. Mínima o cuando  $Q < Q_a$



## REGULACIÓN COMPARTIDA 2 BVV



## REGULACIÓN ESCALONADA 1 BVV + 1 BVF



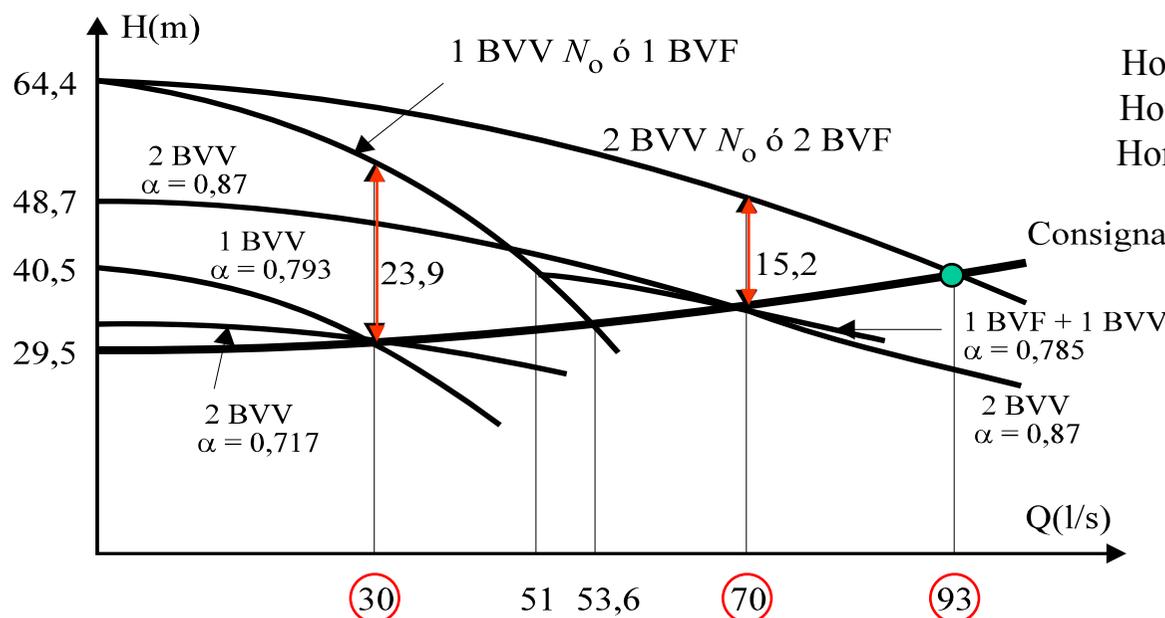
## EJEMPLO. COMPARATIVA ECONÓMICA. DIFERENTES REGULACIONES

$$H = 64,4 - 10895 Q^2$$

$$\eta = 32,2 Q - 322 Q^2$$

Curva consigna

$H_c$ (m)	30,7	32,1	33,1	35,9	37,4	38,9	40,7
Q (l/s)	30	45	53	70	78	85	93



Horas valle 8 horas Consumo  $Q_v = 30$  l/seg.  
 Horas llano 12 horas Consumo  $Q_{ll} = 70$  l/seg.  
 Horas punta 4 horas Consumo  $Q_p = 93$  l/seg.

↑ Presiones por encima del valor de consigna al trabajar sin BVV

● En horas punta se trabaja en el punto de consigna

- Siempre se trabaja en el punto de consigna.
- Los diferentes costes son debidos a los diferentes rendimientos en los puntos de trabajo de las bombas.

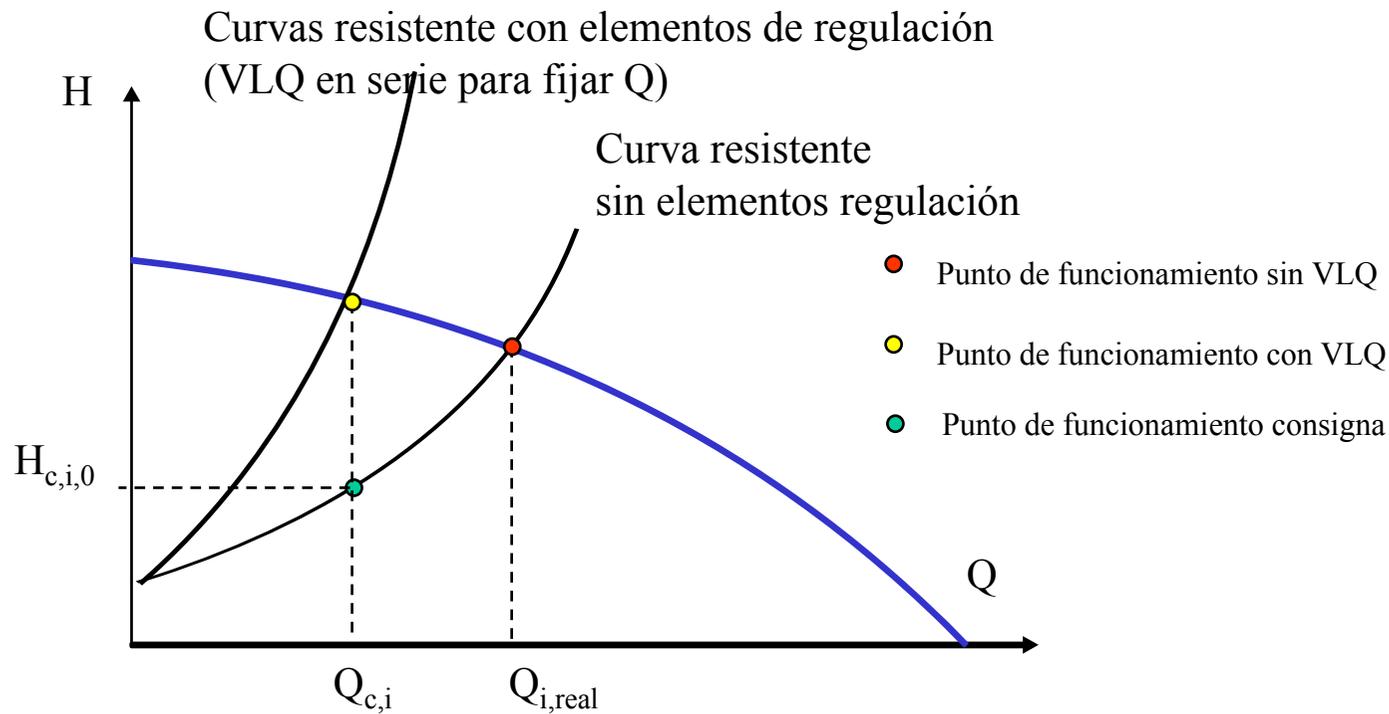
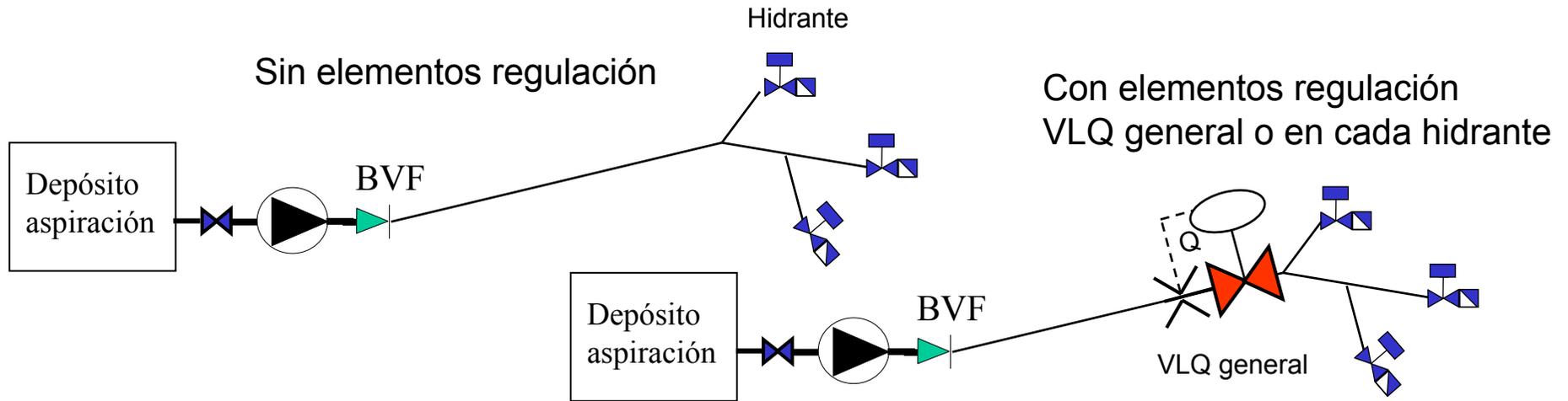
- a.- 2 BVV
- b.- Valle 1 BVV - llano y punta 2 BVV
- c.- Valle 1 BVV - Llano y punta 1 BVF + 1 BVV
- d.- Valle 1 BVF - Llano y punta 2 BVF

46,23 €/día

45,15 €/día

46,67 €/día

59,99 €/día



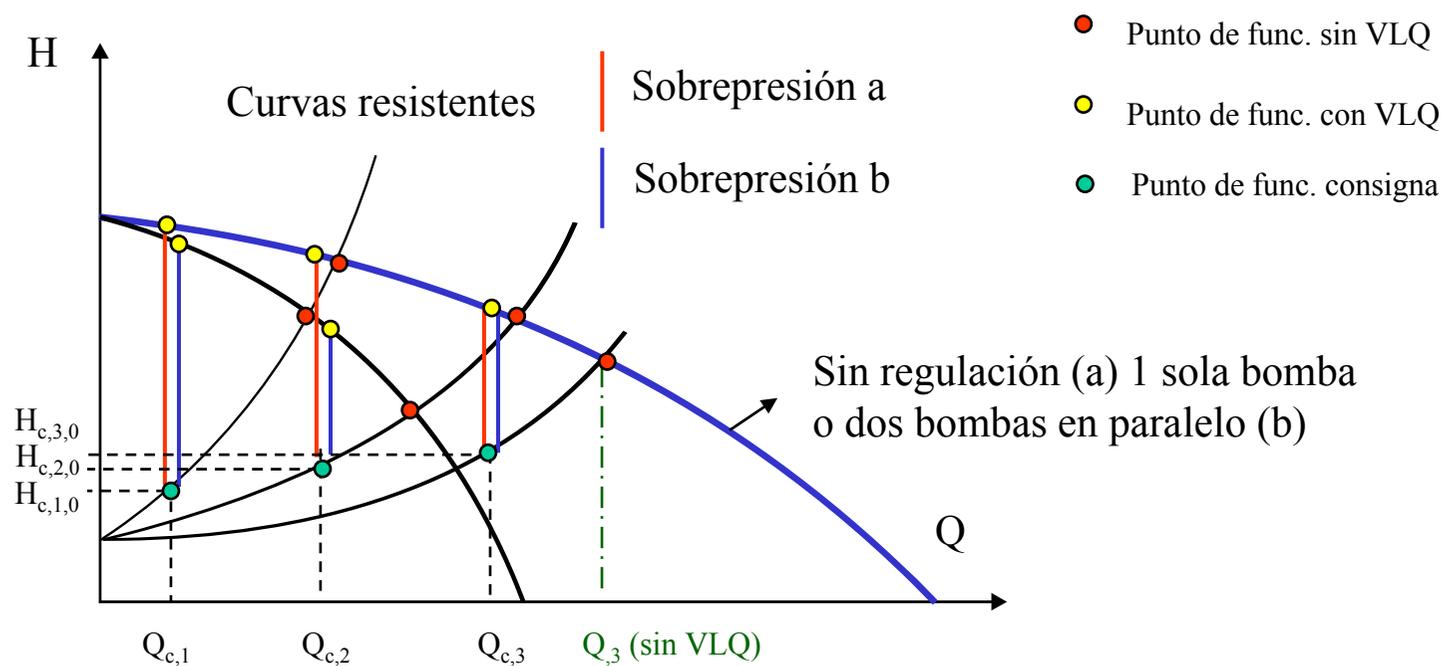
## Riego programado (1)

Perfecto conocimiento del sistema. Para cada situación i:

- Conocido  $Q_{c,i}$  (Caudal necesario)
- Conocida la altura de consigna  $H_{c,i}$  en cabecera ( $H_{c,i,0}$ ) o en red ( $H_{c,i,r}$ )

a.- Sin regulación. 1 sola BVF para todo el sistema

b.- Con dos BVF en paralelo. 1 o 2 BVF según el sector



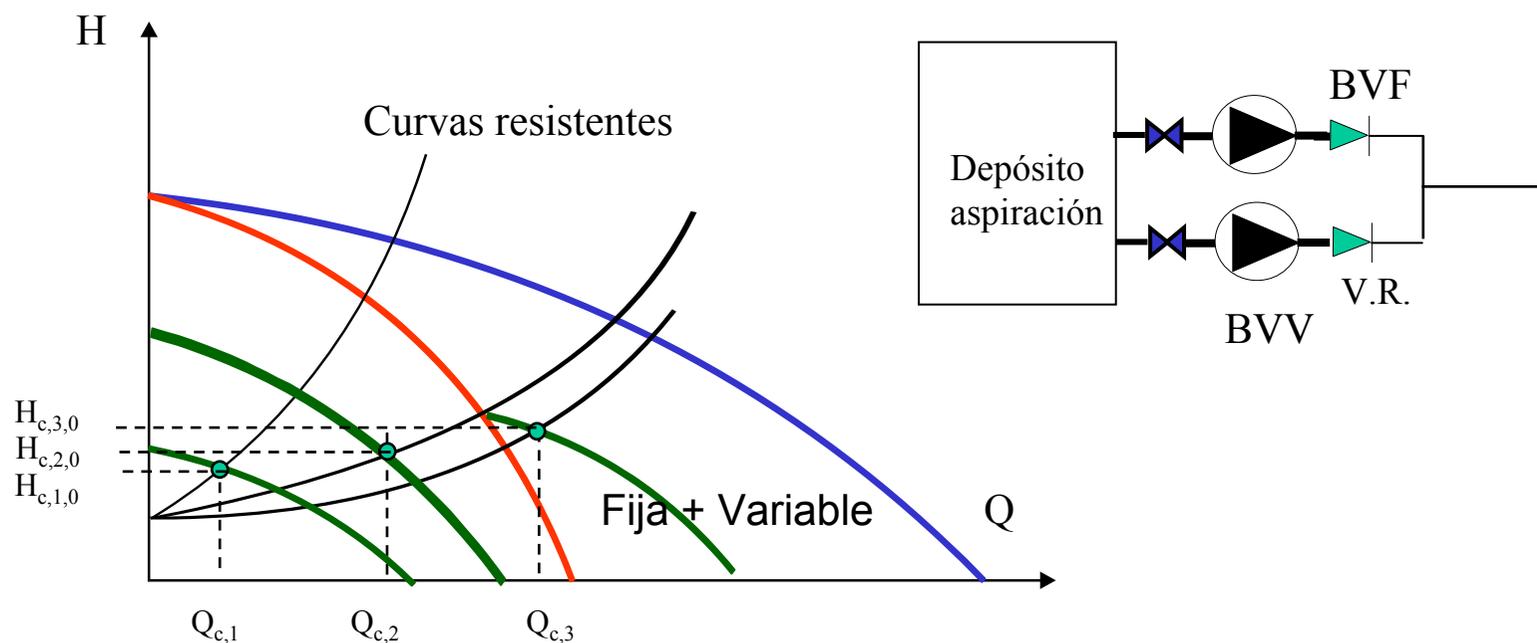
En todos los casos hay una VLQ (limitadora de caudal) para fijar el caudal del sector

## Riego programado (2)

**c.- Con una BVF y una BVV. Fijando número de bombas y velocidad de giro**

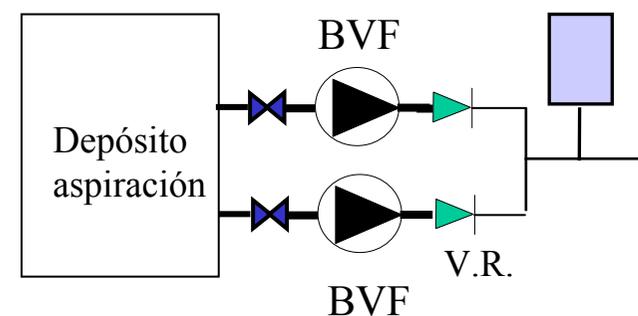
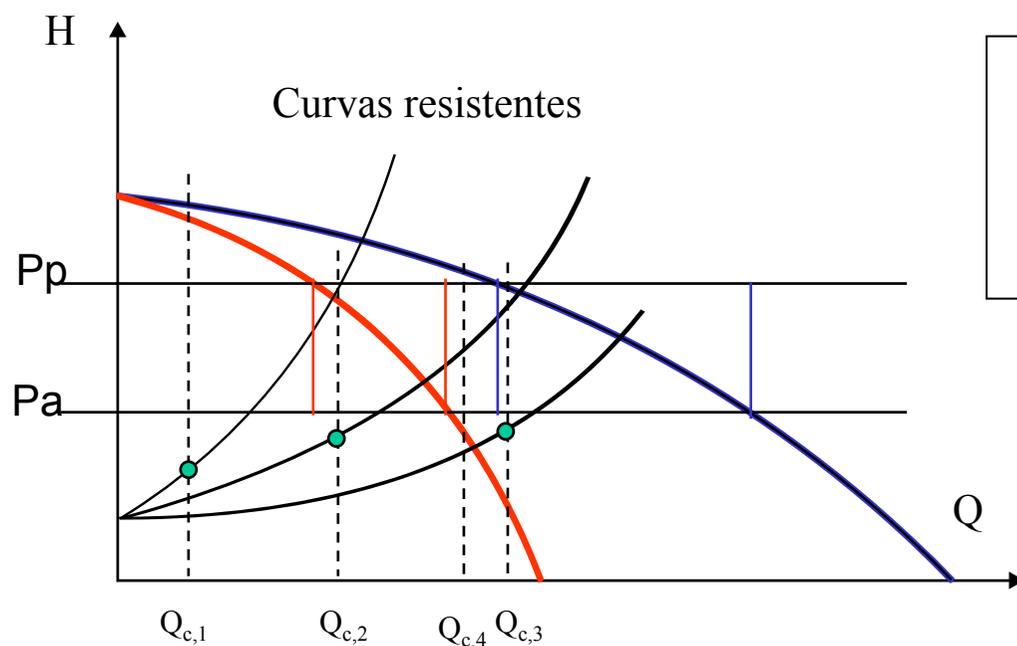
En este caso es posible estar en el punto de consigna en cada caso

No es necesario intercalar elementos de regulación en cabecera de redes (VLQ)



## Riego programado (3) (Riego a la demanda)

**d.- Mantener  $\Delta H$  con arranques y paradas de bombas (presostatos).  
Necesidad de Calderín**



Con VLQ

Sector 1.- Funcionamiento arrancando y parando la 1ª bomba

Sector 2 y 3.- Funcionamiento estable

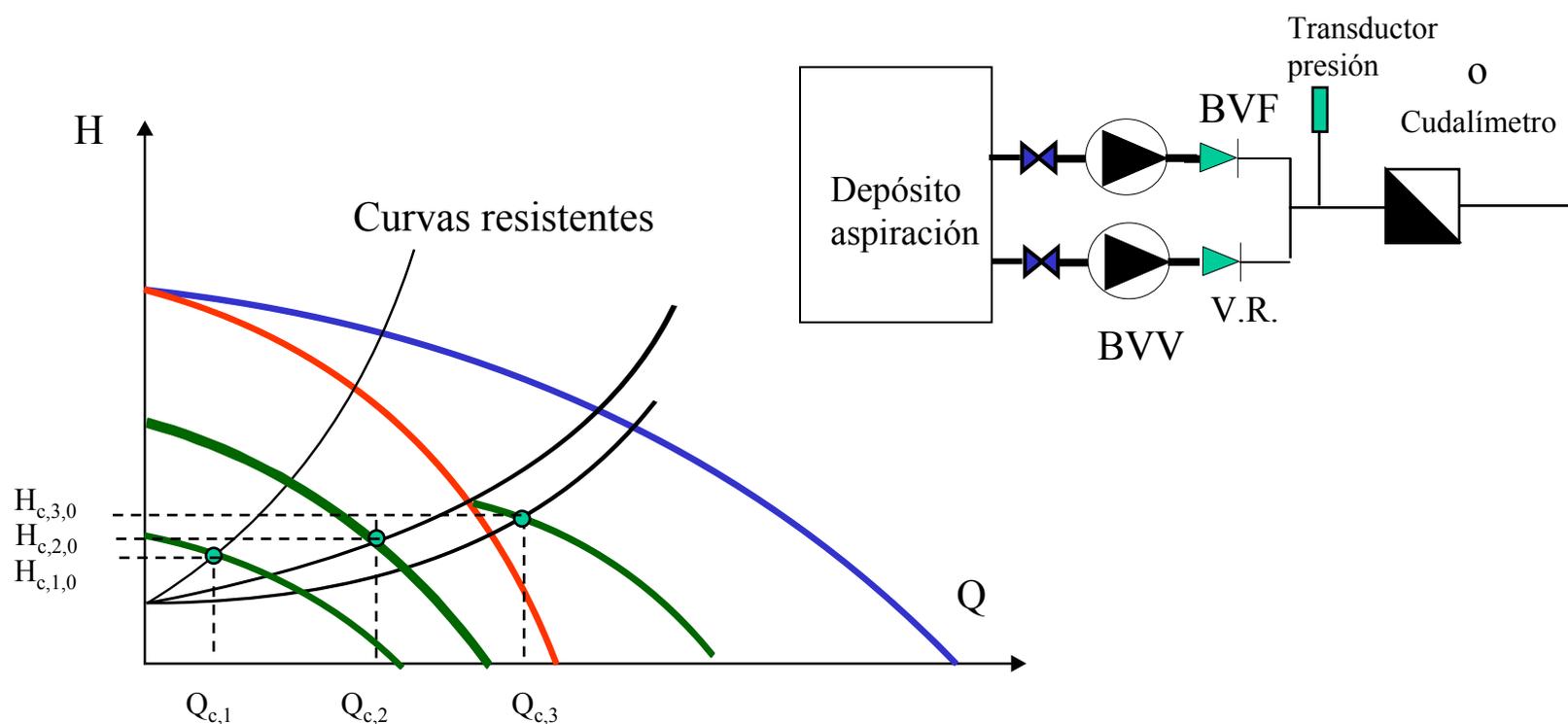
Sector 4.- Funcionamiento arrancando y parando la 2ª bomba

## Riego programado (4)

**e.- Mantener  $H = H_{c,i}$  para cada Sector o mantener  $Q = Q_{c,i}$  para cada Sector**

En este caso es posible estar en el punto de consigna en cada caso

No es necesario intercalar elementos de regulación en cabecera de redes (VLQ)

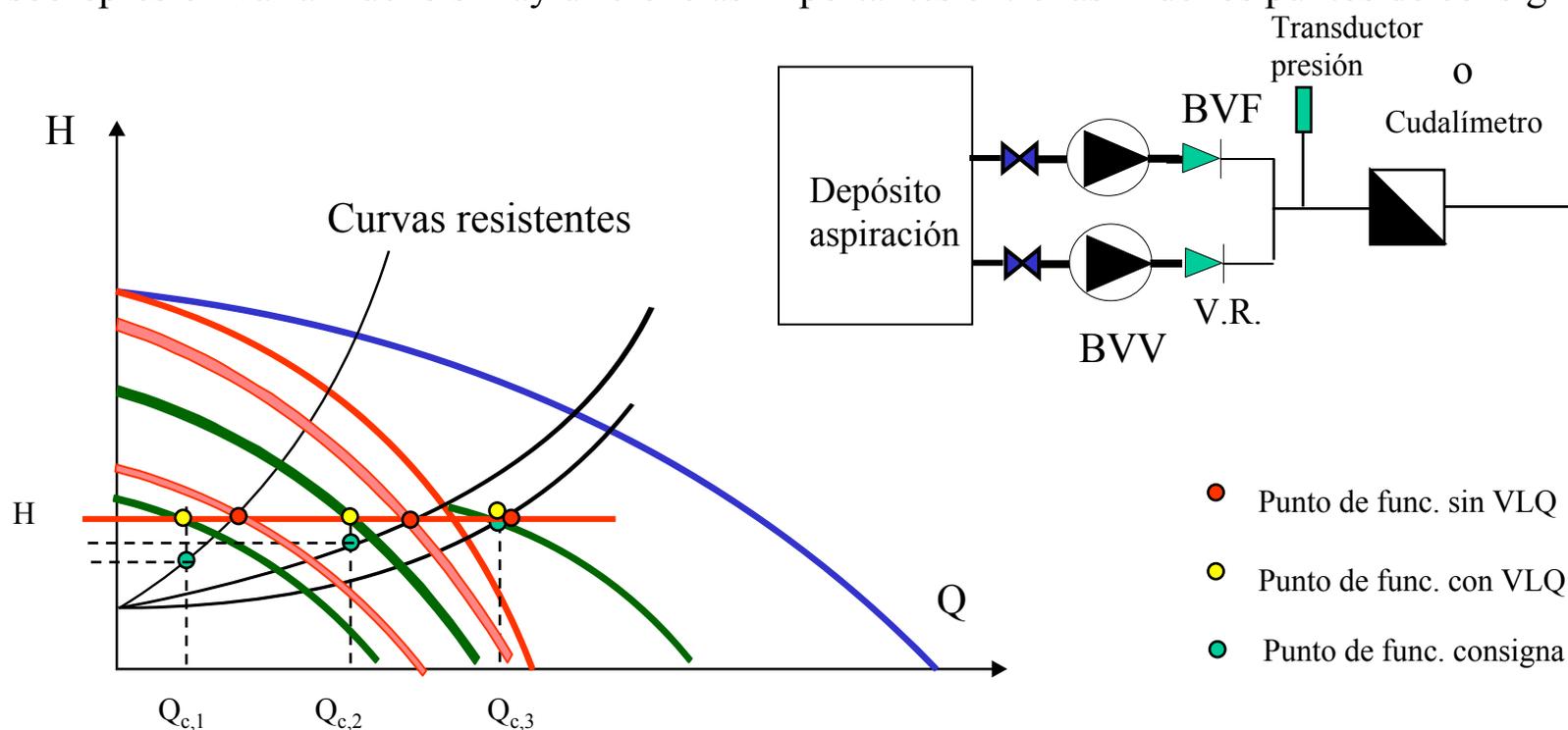


### f.- Mantener H constante igual para todos los Sectores

En este caso no es posible estar en el punto de consigna en cada caso

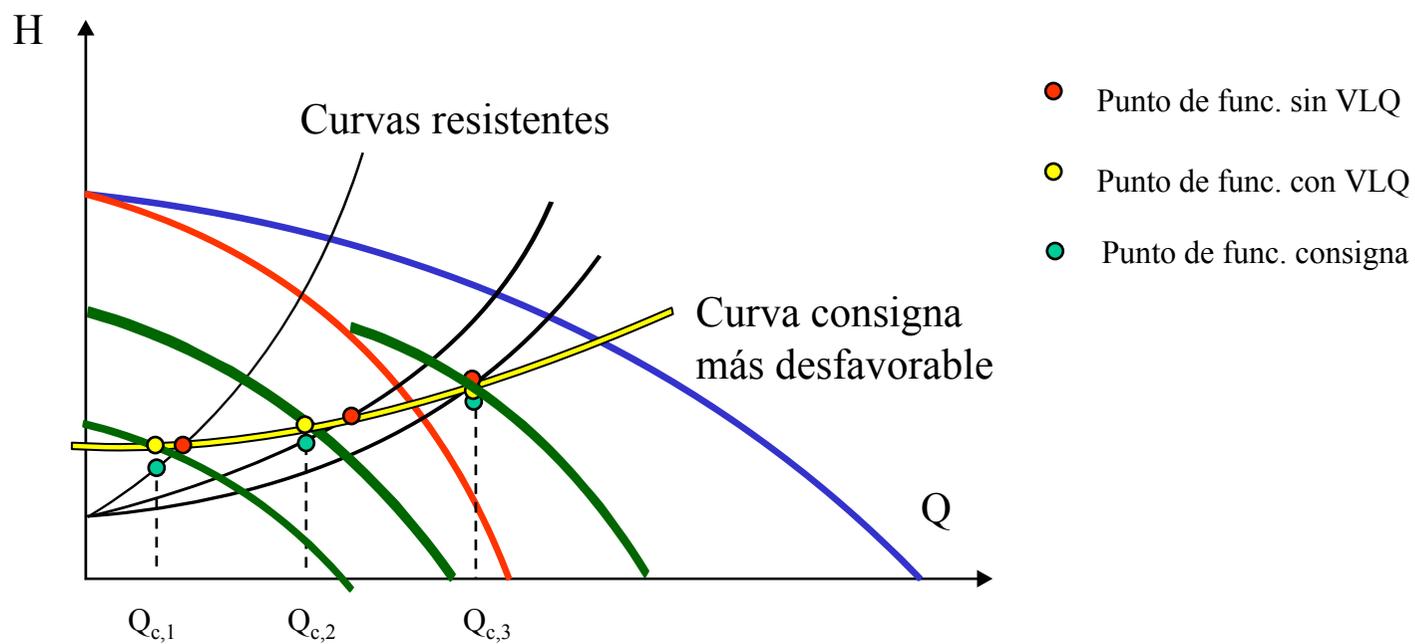
Es necesario intercalar elementos de regulación en redes (VLQ) para mantener Q diseño, en caso contrario el caudal se obtiene de la intersección de  $H = \text{cte}$  y curva resistente.

La sobrepresión varía mucho si hay diferencias importantes entre las H de los puntos de consigna



## Riego programado (6) (Riego a la demanda)

g.- Fijar una curva de consigna  $H = f(Q)$  regulando con BVF + BVV



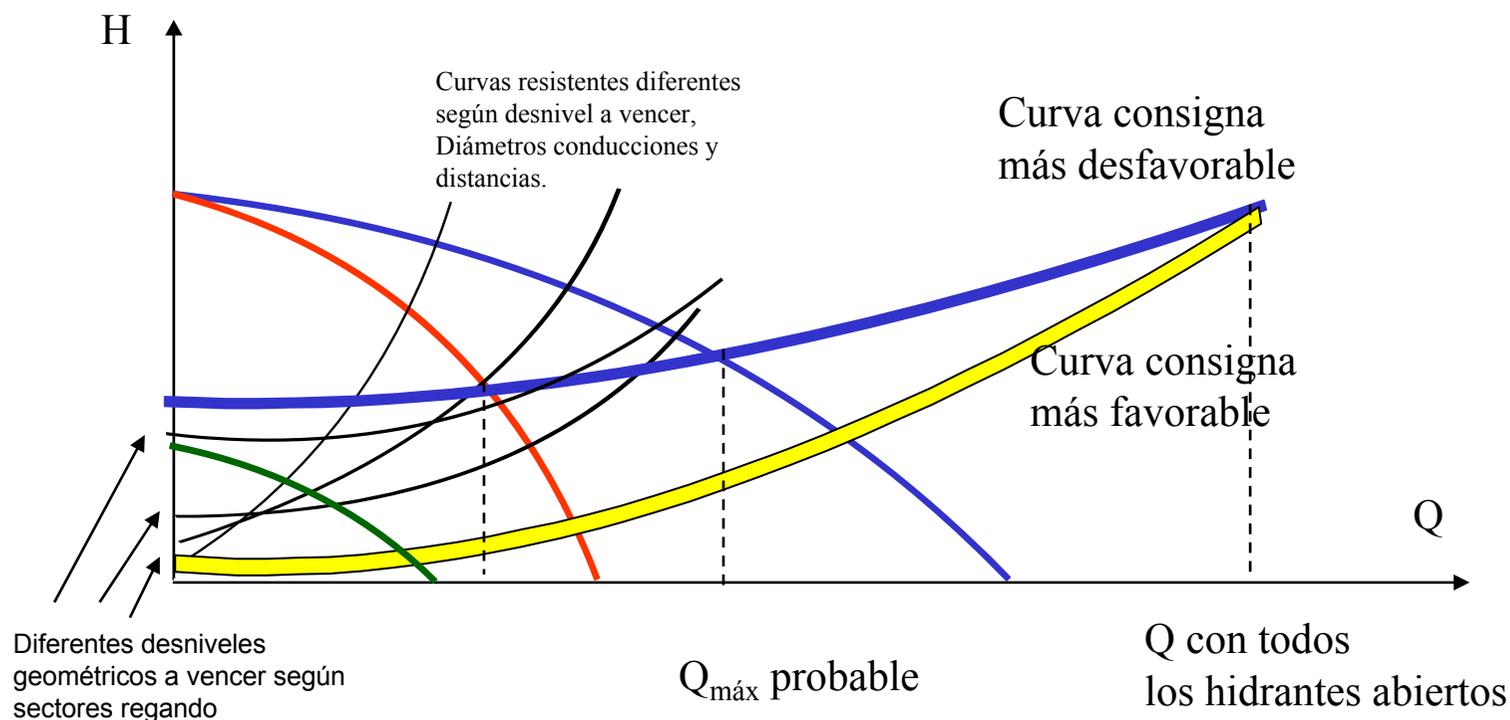
## Riego a la demanda

Se pueden utilizar los sistemas d, f, g.

Puede ser complicado definir la curva de consigna.

Si los hidrantes no tienen VLQ el caudal puede ser muy variable

Hay que elegir unas condiciones “máximas” de funcionamiento



Para cada Q necesario hay H cabecera diferente en función de qué sectores se rieguen  
 Para no desequilibrar el sistema si hay importantes desniveles hay que instalar VLQ