

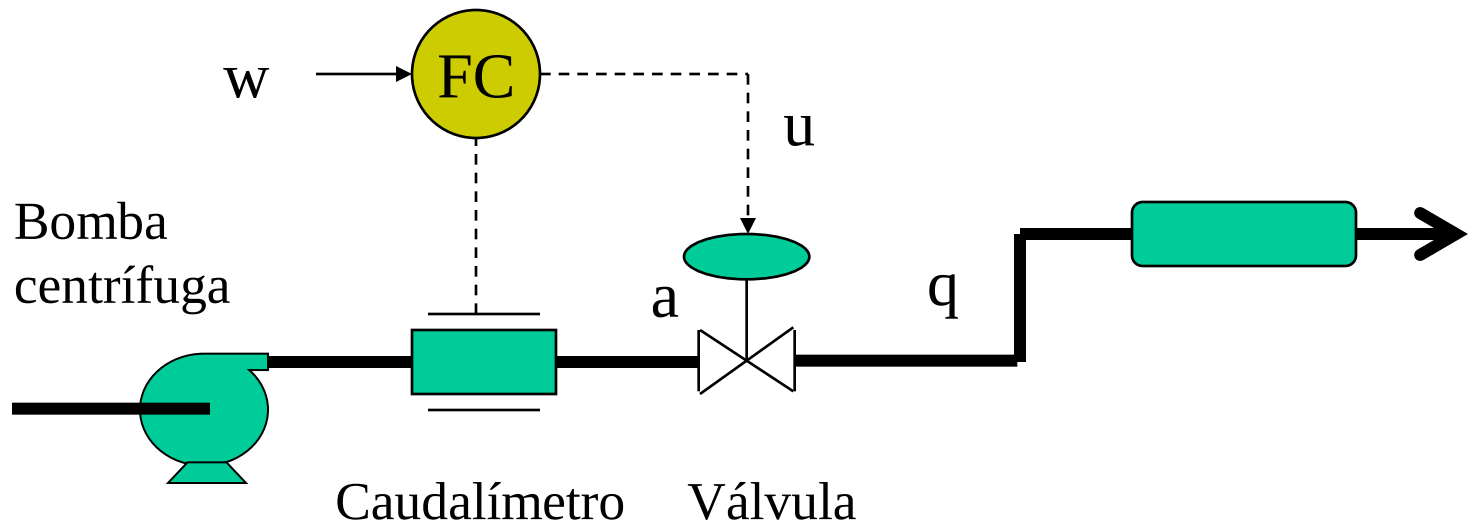
Lazos de control típicos

Prof. Cesar de Prada

Dpt. Ingeniería de Sistemas y Automática

Univ. De Valladolid

Control de flujo



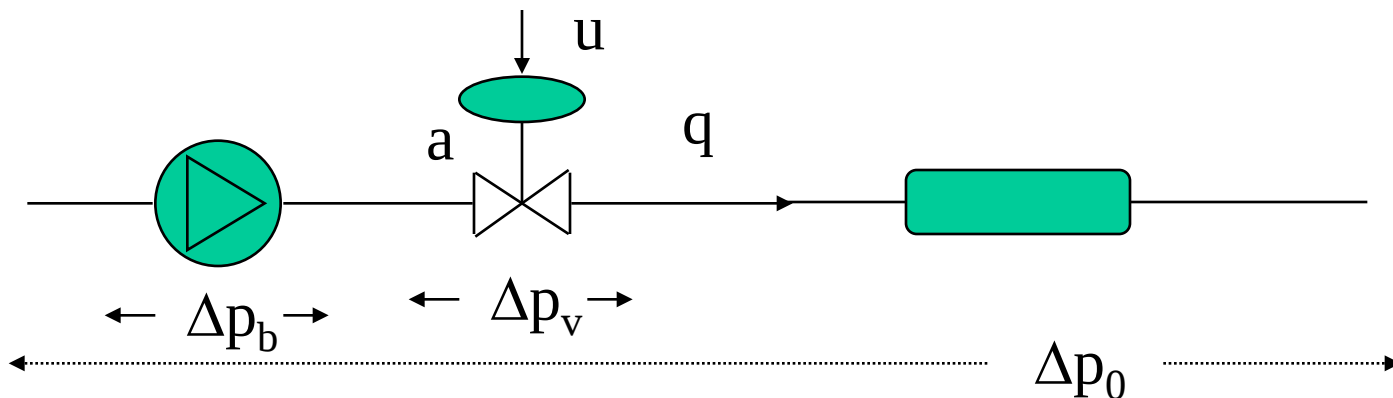
Bomba, valvula: dimensionamiento, posicionamiento

Caudalímetro: Tipo, rango

Orden: Bomba, caudalímetro, válvula
Prof. Cesar de Prada, ISA, UVA

Dimensionamiento

Desde el punto de vista del diseño deben escogerse válvulas grandes, pues tienen menores pérdidas de carga y permite el uso de bombas mas pequeñas. Sin embargo, válvulas mas pequeñas permiten mayores cambios de caudal y hacen el proceso mas controlable.

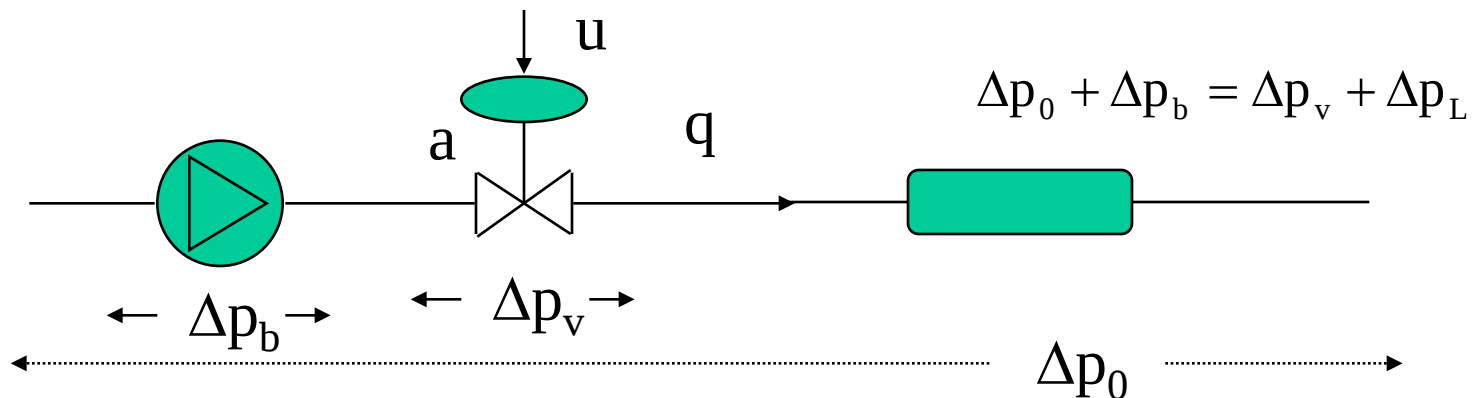


Ejemplo

Flujo en condiciones de diseño $q_s = 100$ gpm
perdidas en la linea de diseño $\Delta p_L = 40$ psi
presión entre extremos de diseño = -150 psi
densidad = 1 apertura deseada = 50%

Presion mayor
al final de la
linea

Caso 1: $\Delta p_v = 20$ psi Caso 2: $\Delta p_v = 80$ psi



Ejemplo

Caso 1: $\Delta p_v = 20$ psi
 $\Delta p_b = 150+40+20= 210$

Caso 2: $\Delta p_v = 80$ psi
 $\Delta p_b = 150+40+80= 270$

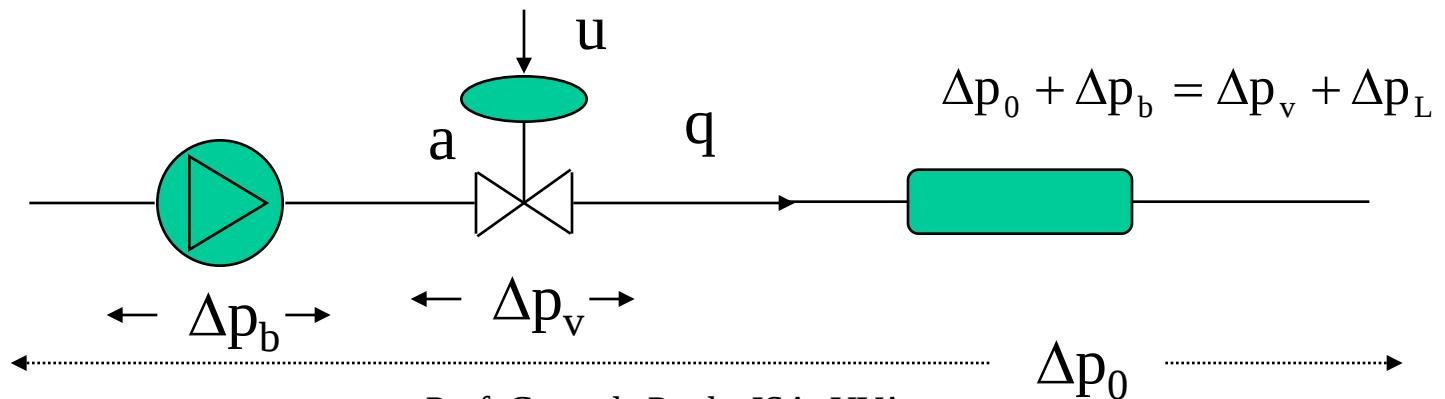
$$q_s = aC_v \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}}$$

$$100 = 0.5C_{v1} \sqrt{20}$$

$$C_{v1} = 44.72$$

$$100 = 0.5C_{v2} \sqrt{80}$$

$$C_{v2} = 22.36$$



Funcionamiento

Suponiendo que Δp_b es constante

Caso 1: $a=1$, $a=0.1$

$$\Delta p_v = \Delta p_0 + \Delta p_b - \Delta p_L$$

$$\Delta p_b + \Delta p_0 = 210 - 150 = 60$$

$$q_{\max 1} = 1C_{v1} \sqrt{60 - 40 \left(\frac{q_{\max 1}}{100} \right)^2}$$

$$q_{\max 1} = 115 \text{ gpm}$$

$$q_{\min 1} = 0.1C_{v1} \sqrt{60 - 40 \left(\frac{q_{\min 1}}{100} \right)^2}$$

$$q_{\min 1} = 33.3 \text{ gpm}$$

Caso 2: $a=1$, $a=0.1$

$$q = aC_v \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}}$$

$$\Delta p_b + \Delta p_0 = 270 - 150 = 120$$

$$q_{\max 2} = 1C_{v2} \sqrt{120 - 40 \left(\frac{q_{\max 2}}{100} \right)^2}$$

$$q_{\max 2} = 141 \text{ gpm}$$

$$q_{\min 2} = 0.1C_{v2} \sqrt{120 - 40 \left(\frac{q_{\min 2}}{100} \right)^2}$$

$$q_{\min 2} = 24.2 \text{ gpm}$$

La válvula mas pequeña tiene mas rango de variación de q

Diseño

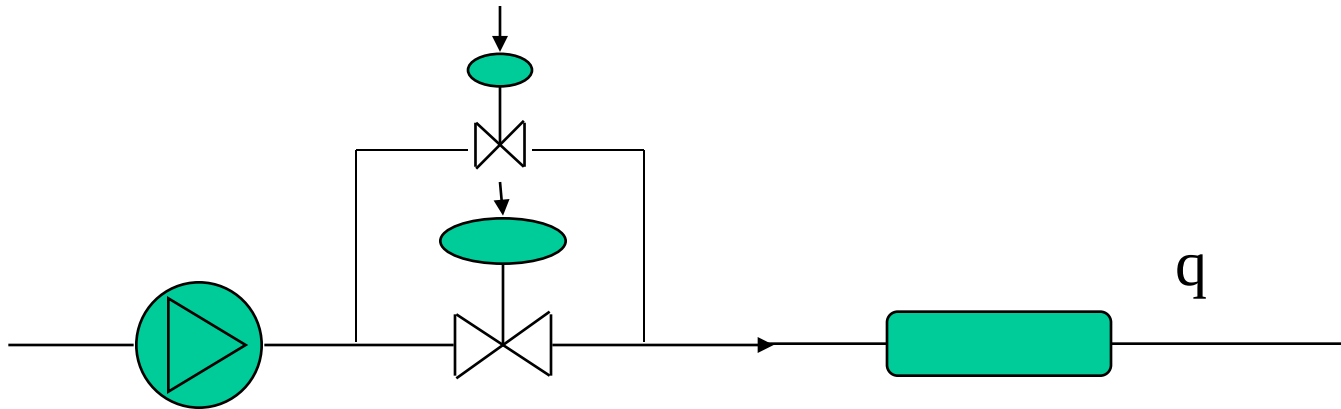
Dimensionar bomba (Δp_b) y válvula C_v en función de los caudales máximo y mínimo requeridos y los caudales q_s y pérdidas de carga Δp_0 , Δp_{Ls} de diseño, resolviendo:

$$q_{\max} = 1 \quad C_v \sqrt{\Delta p_0 + \Delta p_b - \Delta p_{Ls} \left(\frac{q_{\max}}{q_s} \right)^2}$$
$$q_{\min} = a_{\min} C_v \sqrt{\Delta p_0 + \Delta p_b - \Delta p_{Ls} \left(\frac{q_{\min}}{q_s} \right)^2}$$

Diseño

Existe solución si $\frac{a_{\min} q_{\max}}{q_{\min}} < 1$

En caso contrario usar una estructura de rango partido

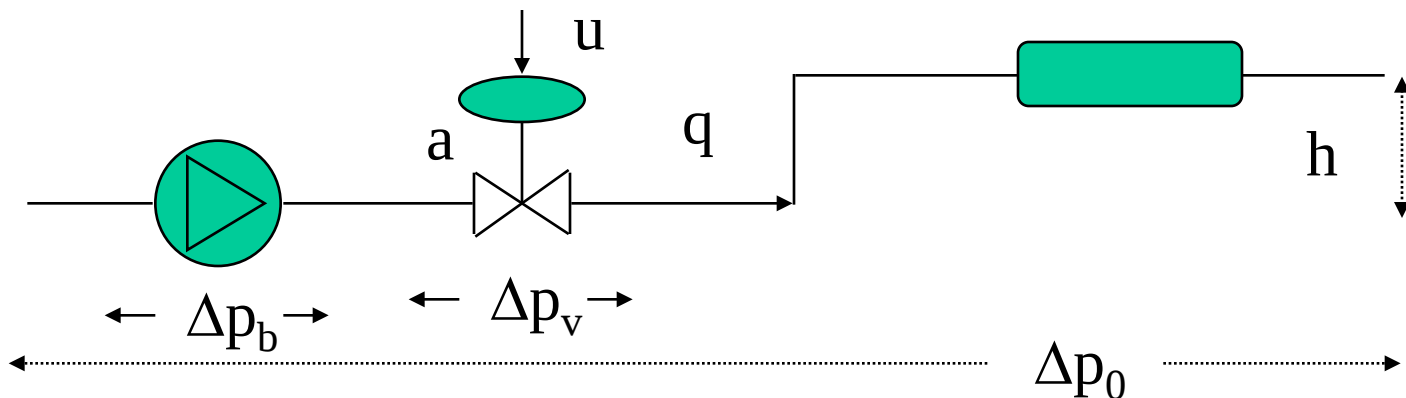


Control de flujo

$$\frac{dm}{dt} = A(\Delta p_0 + \Delta p_b) - A\Delta p_v - AfL\rho v^2 - Ah\rho g$$

$$\Delta p_v = \frac{1}{a^2 C_v^2} \rho q^2 \quad m = AL\rho \quad q = Av \quad \Delta p_b = \rho(\alpha\omega^2 - \beta q^2)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{A}{L} \left[\frac{\Delta p_0}{\rho} + \alpha\omega^2 - \left(\beta + \frac{1}{a^2 C_v^2} + \frac{fL}{A^2} \right) q^2 - gh \right]$$



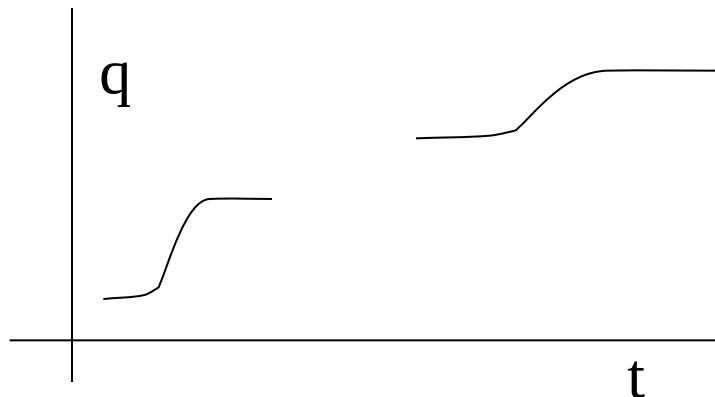
Modelo linealizado

$$\begin{aligned}\frac{dq}{dt} &= \frac{A}{L} \left[\frac{\Delta p_0}{\rho} + \alpha \omega^2 - \left(\beta + \frac{1}{a^2 C_v^2} + \frac{fL}{A^2} \right) q^2 - gh \right] \\ \frac{d\Delta q}{dt} &= \frac{A}{L} \left[\frac{\Delta(\Delta p_0)}{\rho} - \left\{ \left(\beta + \frac{1}{a^2 C_v^2} + \frac{fL}{A^2} \right) 2q \right\}_0 \Delta q + \left\{ \frac{2}{a^3 C_v^2} q^2 \right\}_0 \Delta a \right] \\ \frac{1}{\left\{ \frac{A}{L} \left(\beta + \frac{1}{a^2 C_v^2} + \frac{fL}{A^2} \right) 2q \right\}_0} \frac{d\Delta q}{dt} + \Delta q &= \\ = \frac{1}{\left\{ \rho \left(\beta + \frac{1}{a^2 C_v^2} + \frac{fL}{A^2} \right) 2q \right\}_0} \left[\Delta(\Delta p_0) + \left\{ \frac{2}{a^3 C_v^2} \rho q^2 \right\}_0 \Delta a \right] \\ \tau \frac{d\Delta q}{dt} + \Delta q &= K_1 \Delta(\Delta p_0) + K_2 \Delta a\end{aligned}$$

Cambios del punto de operación

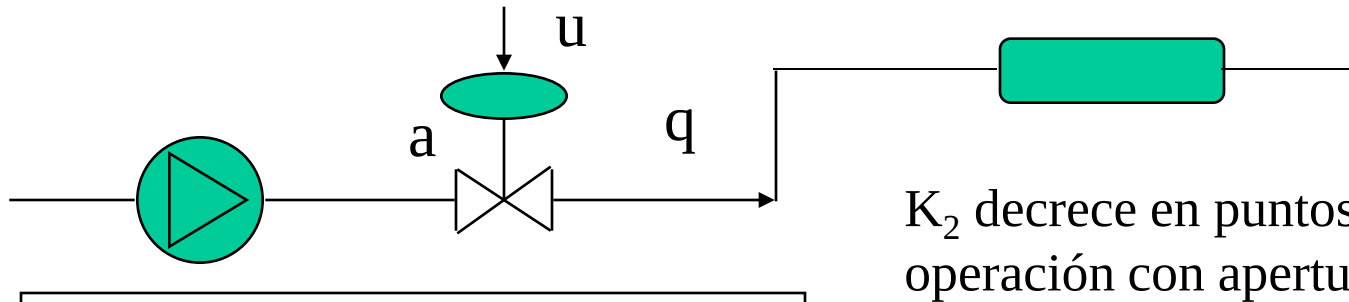
$$\tau \frac{d\Delta q}{dt} + \Delta q = K_1 \Delta(\Delta p_0) + K_2 \Delta a$$

$$\tau = \frac{1}{\left\{ \frac{A}{L} \left(\beta + \frac{1}{a^2 C_v^2} + \frac{fL}{A^2} \right) 2q \right\}_0} \quad K_2 = \left\{ \frac{q}{a \left(\beta a^2 C_v^2 + 1 + \frac{fLa^2 C_v^2}{A^2} \right)} \right\}_0$$

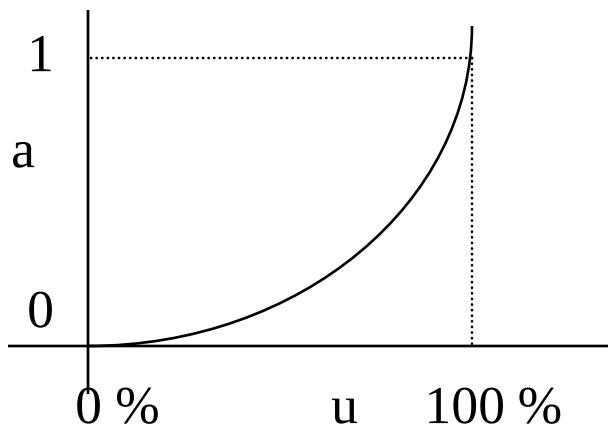


τ crece en puntos de operación
con apertura alta
 K_2 decrece en puntos de
operación con apertura alta

Modelo linealizado



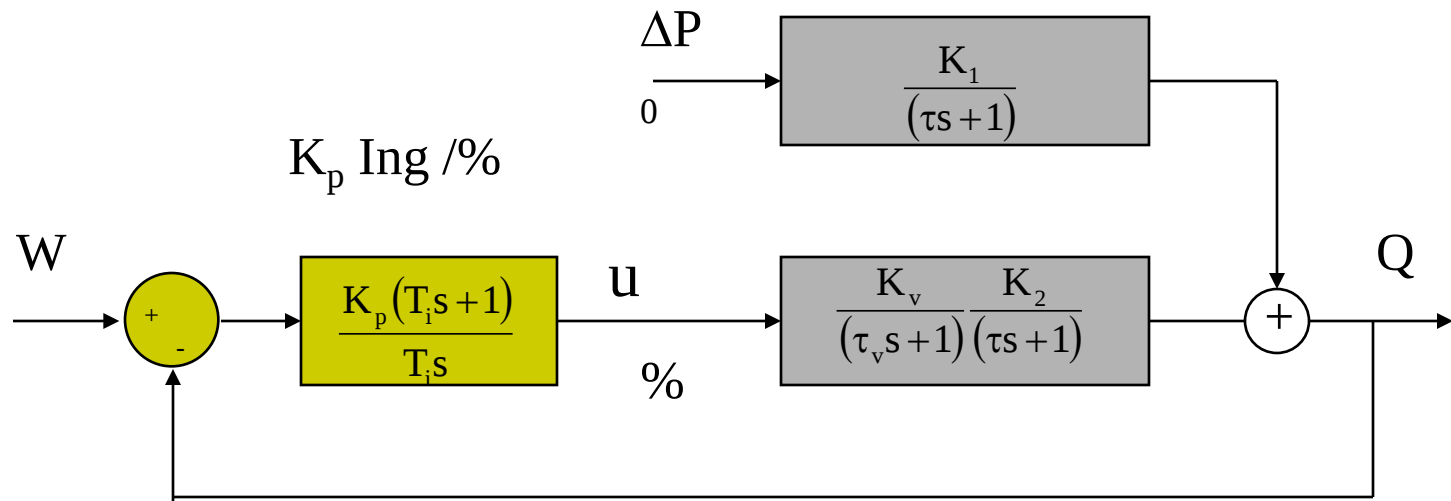
Una válvula **isoporcentual** compensa el cambio de ganancia



La dinámica de la válvula no debe despreciarse, la aproximaremos por:

$$\tau_v \frac{d \Delta a}{d t} + \Delta a = K_v \Delta u$$

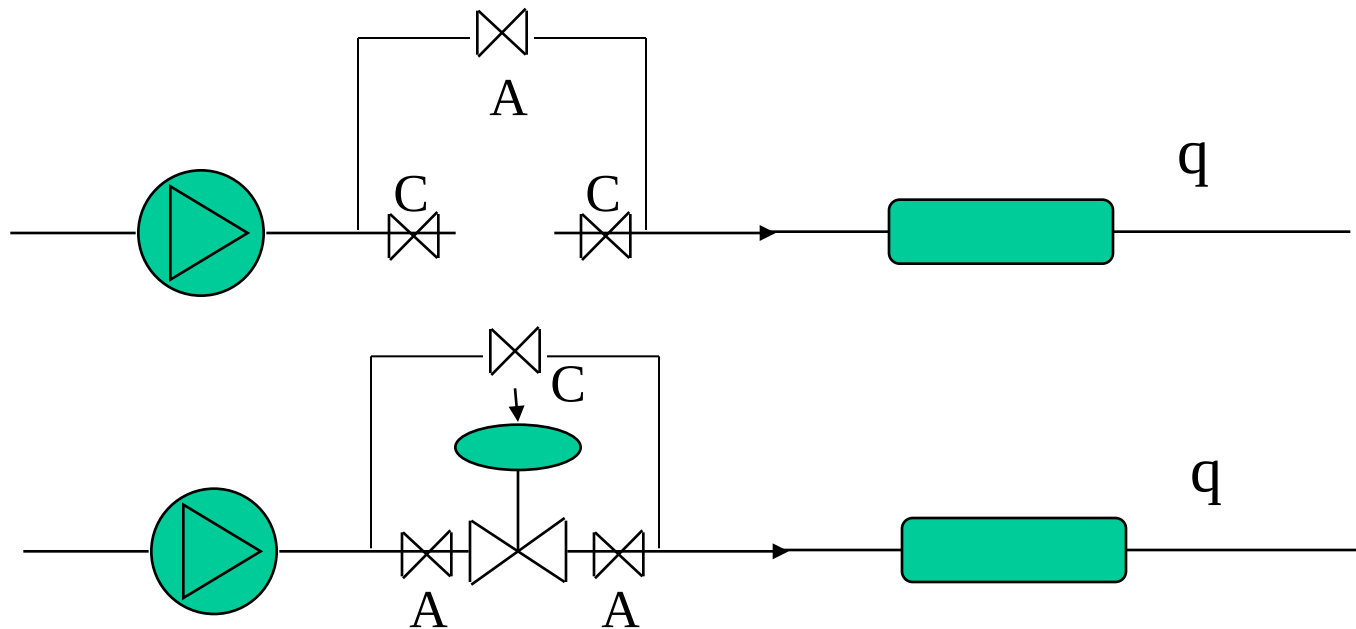
Diagrama de bloques



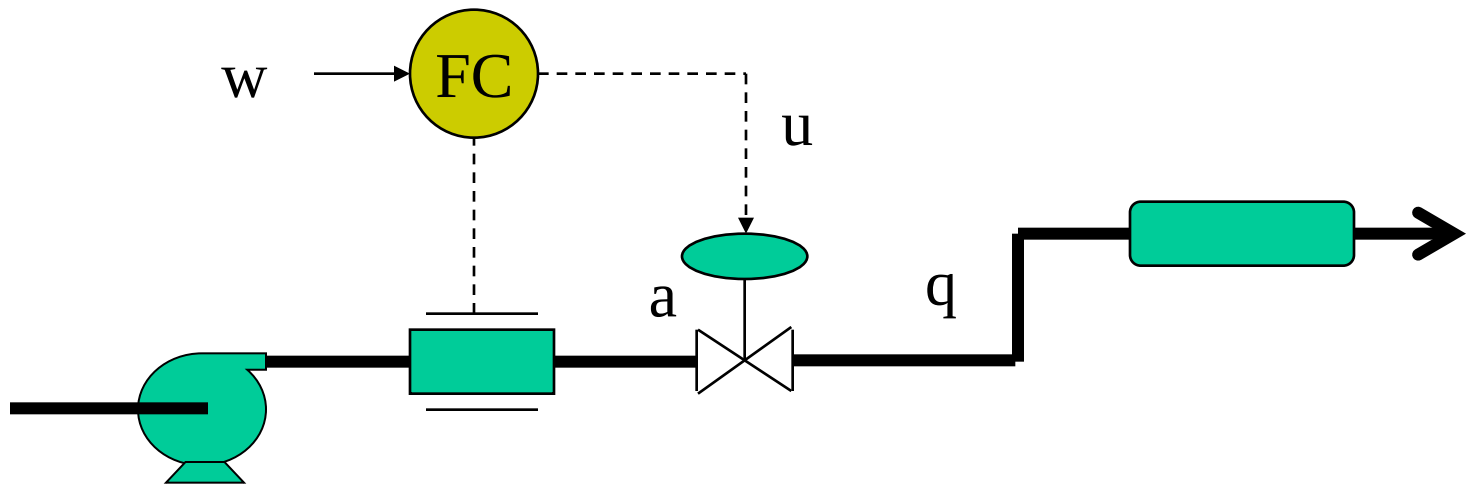
Se desprecia la dinámica del transmisor
Escoger su rango de acuerdo al rango de caudal máximo admisible

Instalación

Las válvulas manuales permiten la sustitución de la válvula de regulación para mantenimiento sin interrumpir el funcionamiento del proceso



Control de flujo



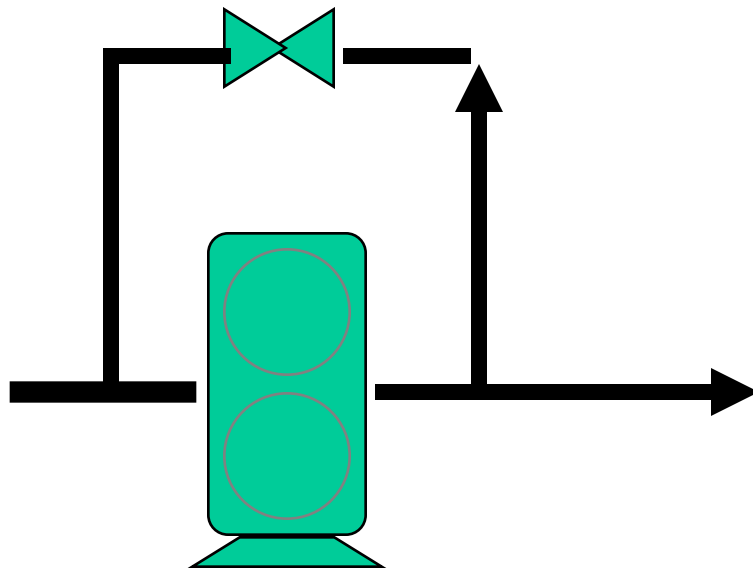
PI

Sistema ruidoso y rápido

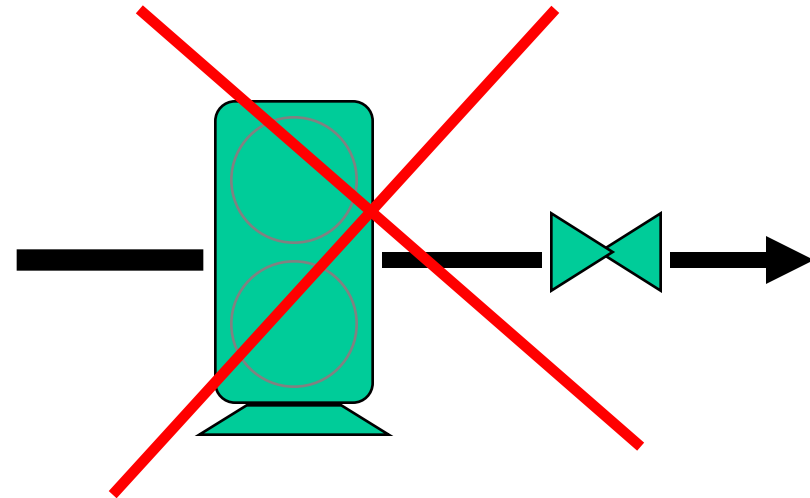
K_p baja para eliminar el efecto del ruido (0.6 %/%)

T_i baja para eliminar error estacionario pronto (0.1 min)

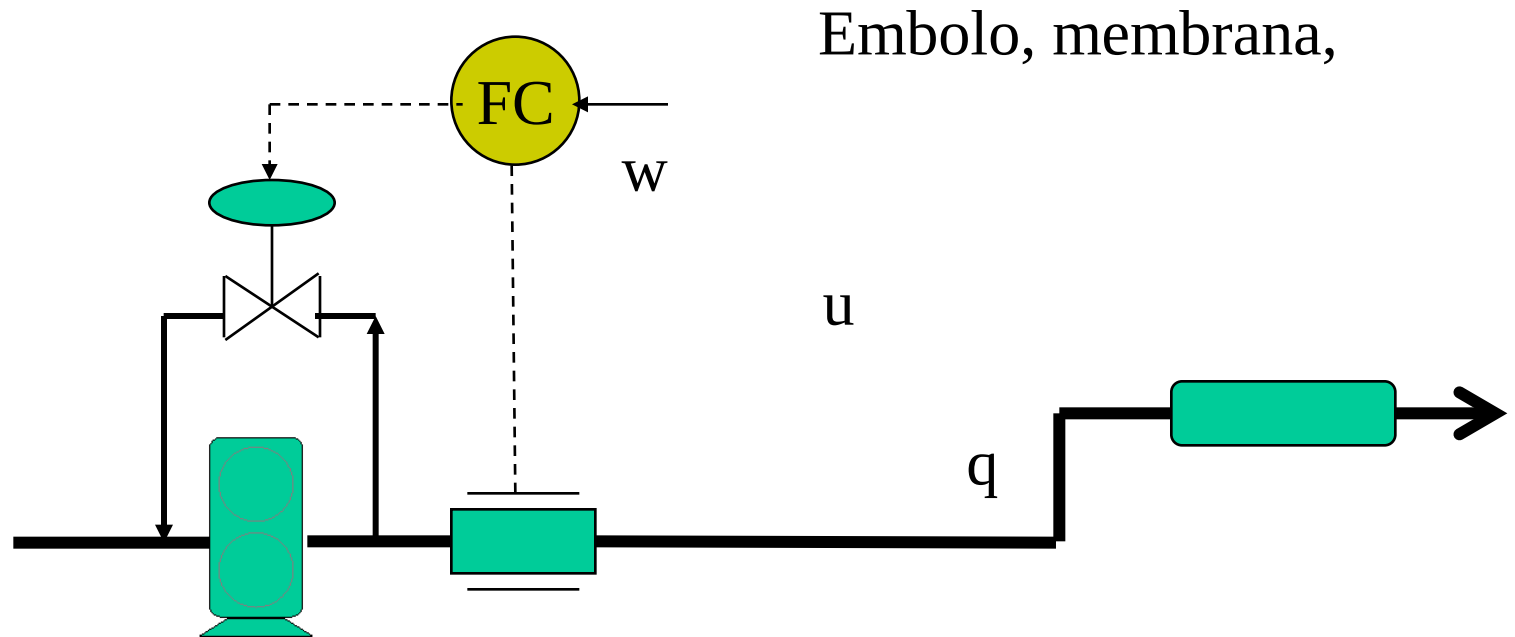
Bombas de desplazamiento positivo



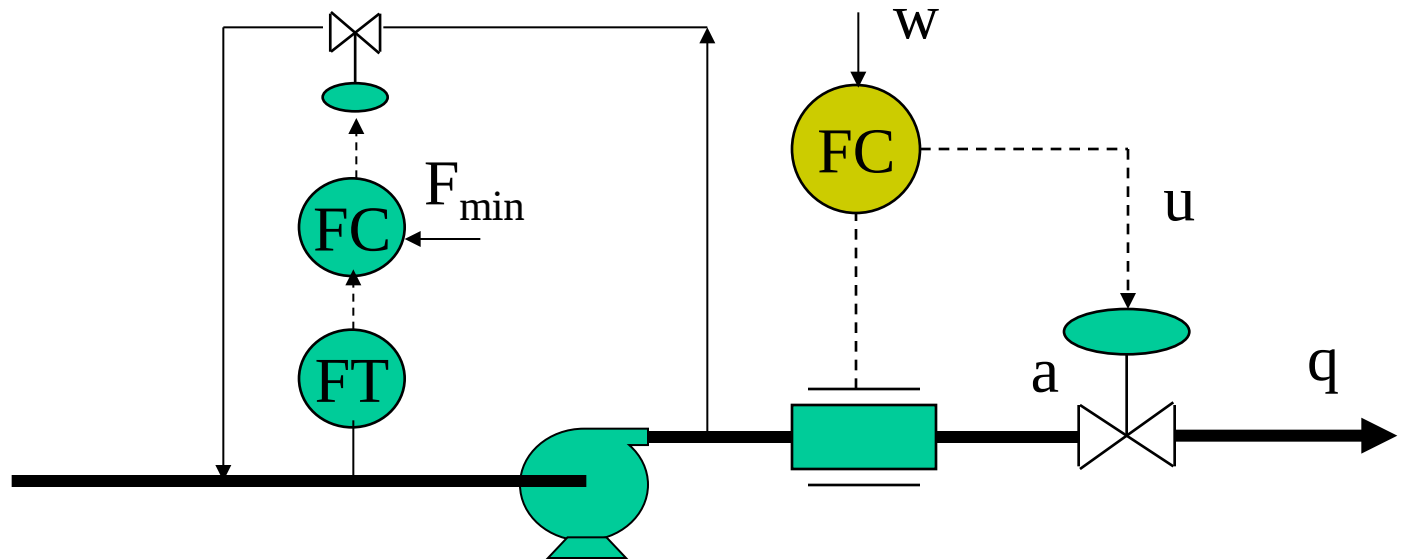
Embolo, membrana...



Bombas de desplazamiento positivo

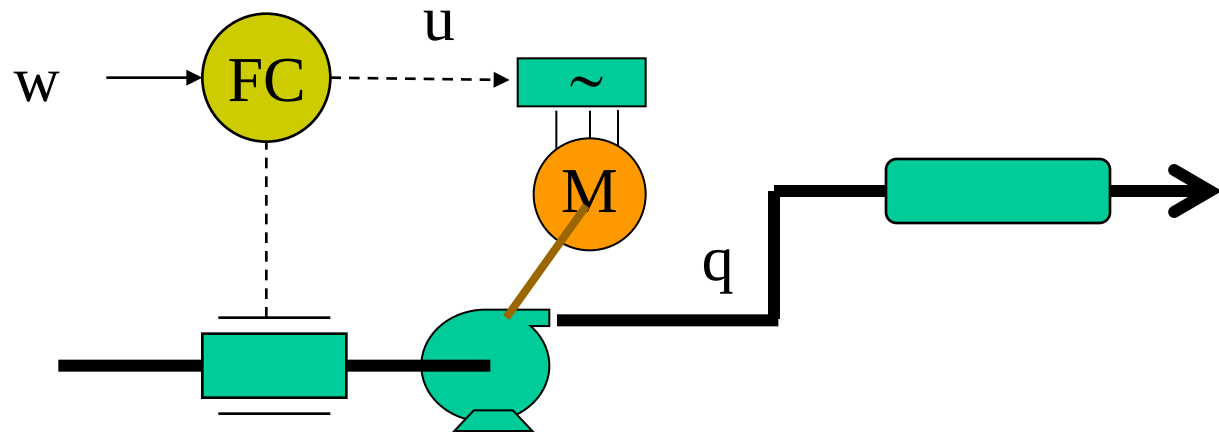


Reciclo mínimo



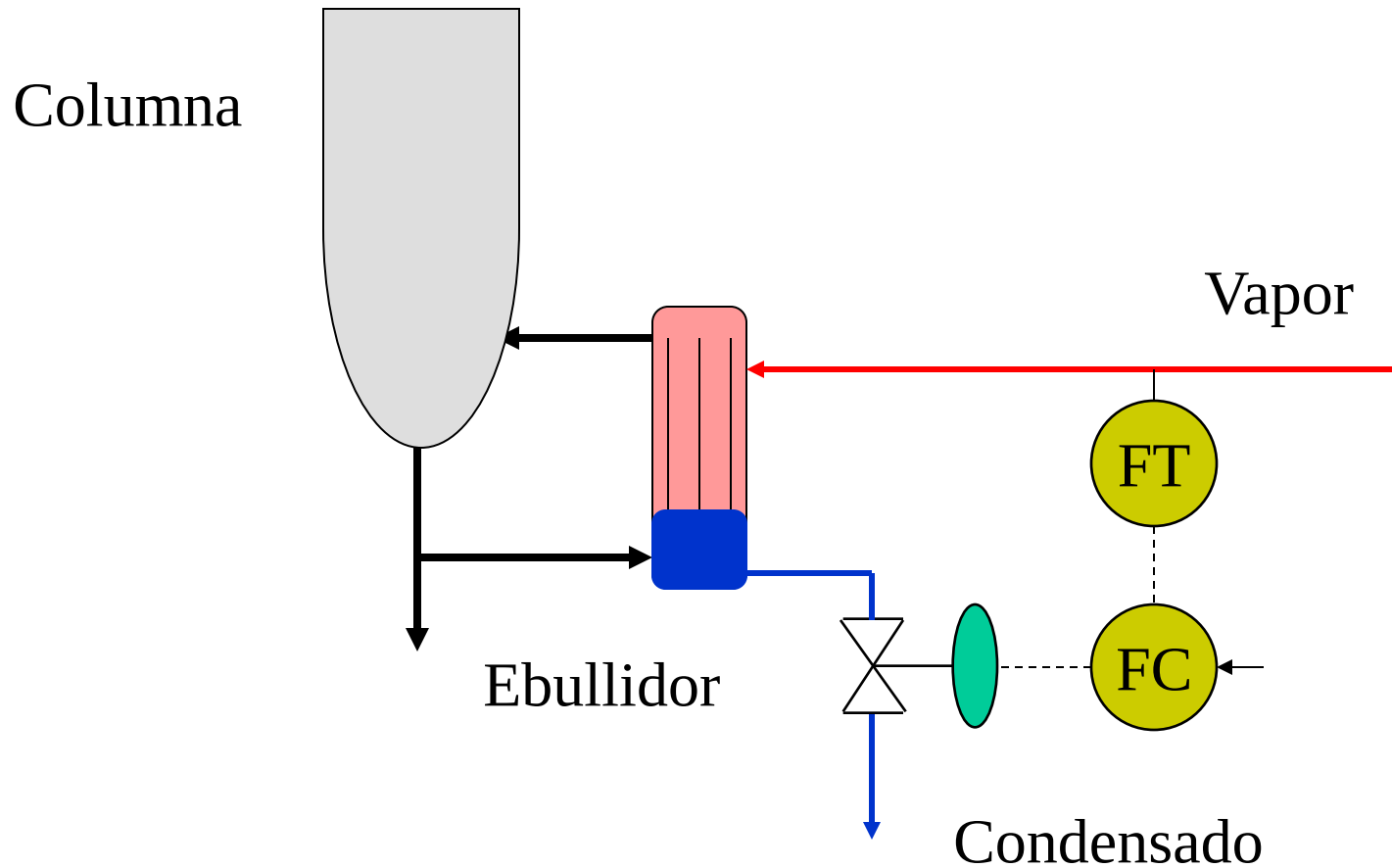
Puede añadirse un lazo extra de regulación de caudal mínimo en la bomba. Cuando $w < F_{min}$ se abre la recirculación para garantizar el caudal mínimo en la bomba. Cuando $w > F_{min}$ la válvula de recirculación estará cerrada.

Control de flujo

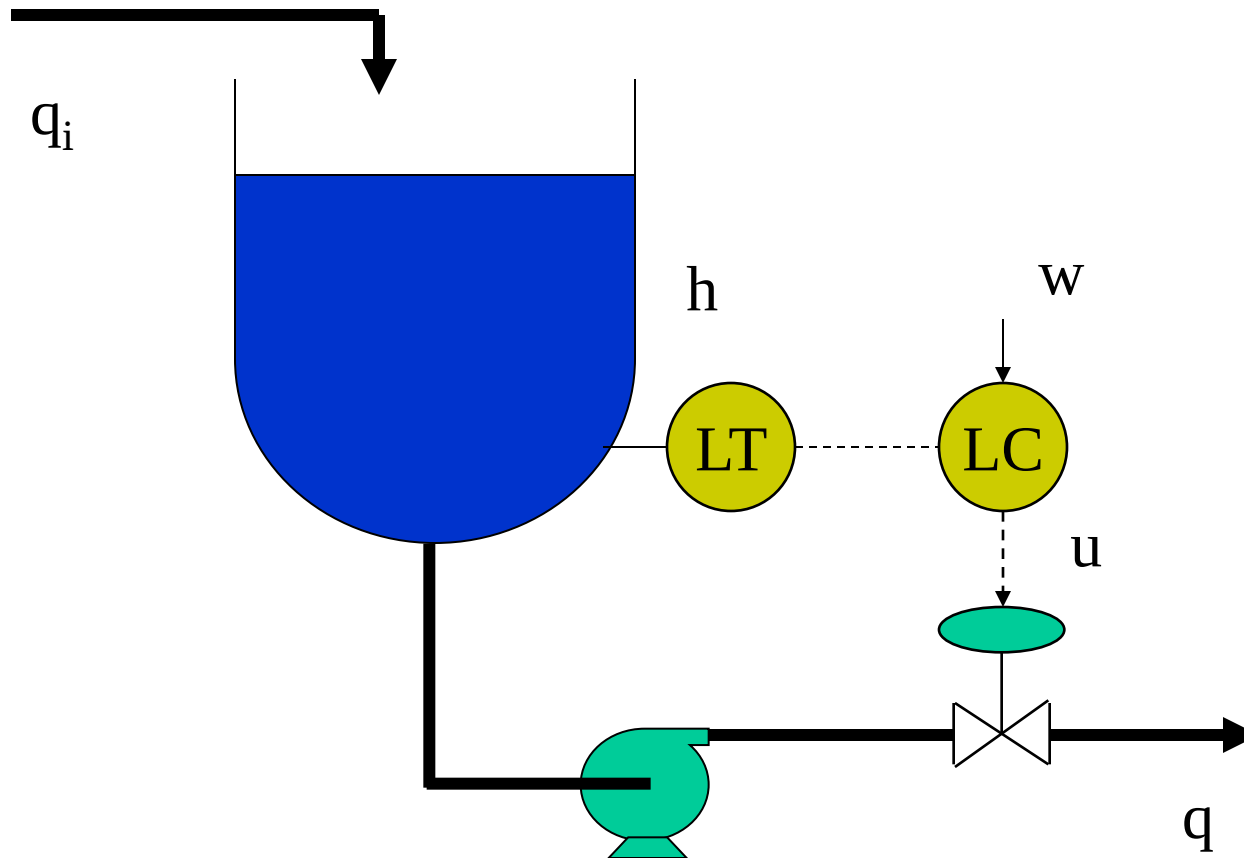


Para caudales altos, una alternativa económica al uso de válvulas de regulación es el empleo de bombas de velocidad variable. Se requiere un variador de velocidad acoplado al motor de la bomba.

Control de flujo



Control de nivel



Selección del tipo de transmisor

Control de nivel

$$\frac{dm}{dt} = q_i \rho - q \rho \quad m = Ah\rho$$

$$A \frac{dh}{dt} = q_i - q \quad A \frac{d\Delta h}{dt} = \Delta q_i - \Delta q$$

$$\tau \frac{d\Delta q}{dt} + \Delta q = K_1 \Delta(\Delta p_0) + K_2 \Delta a$$

$$\Delta p_0 = p_{at} + \rho gh - p_f \quad \Delta(\Delta p_0) = \rho g \Delta h - \Delta p_f$$

$$\tau_v \frac{d\Delta a}{dt} + \Delta a = K_v \Delta u$$

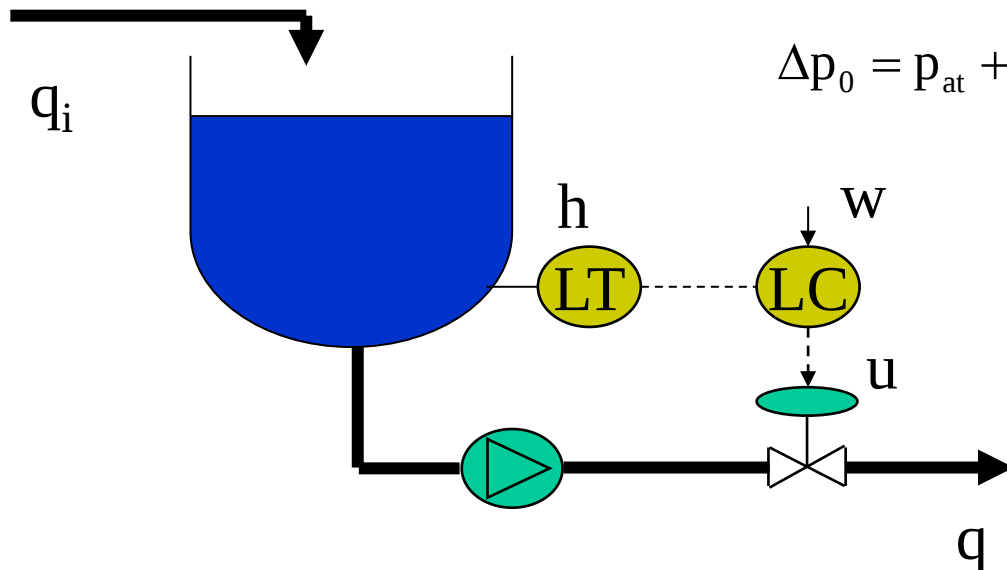


Diagrama de bloques

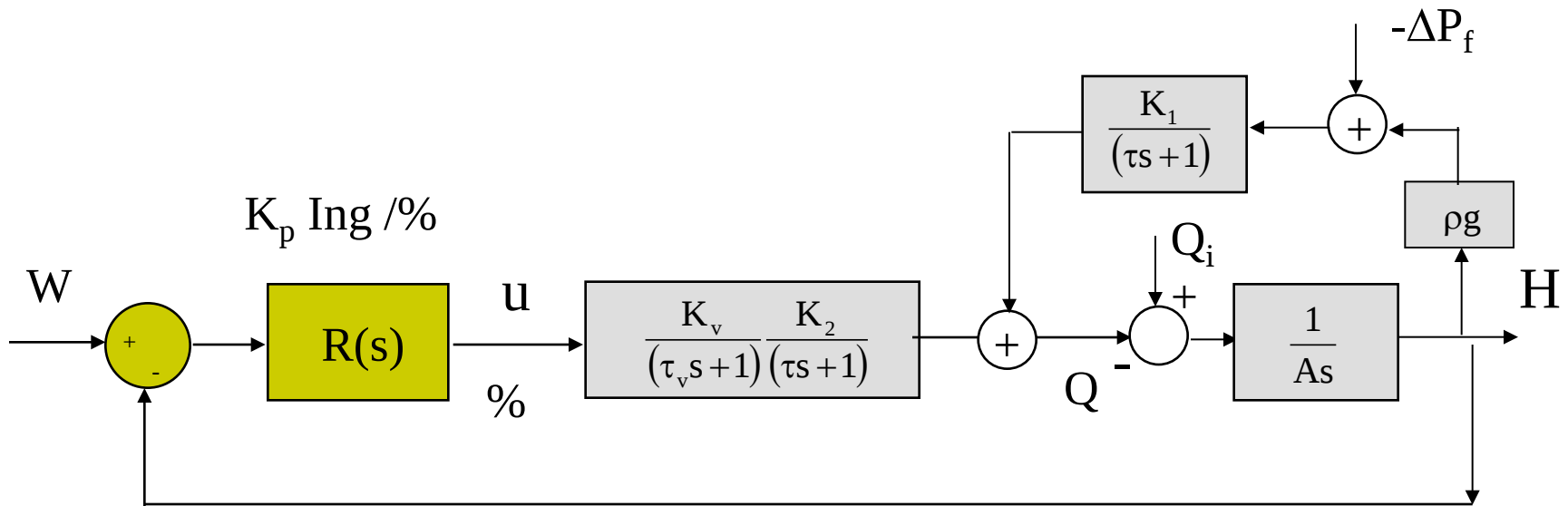
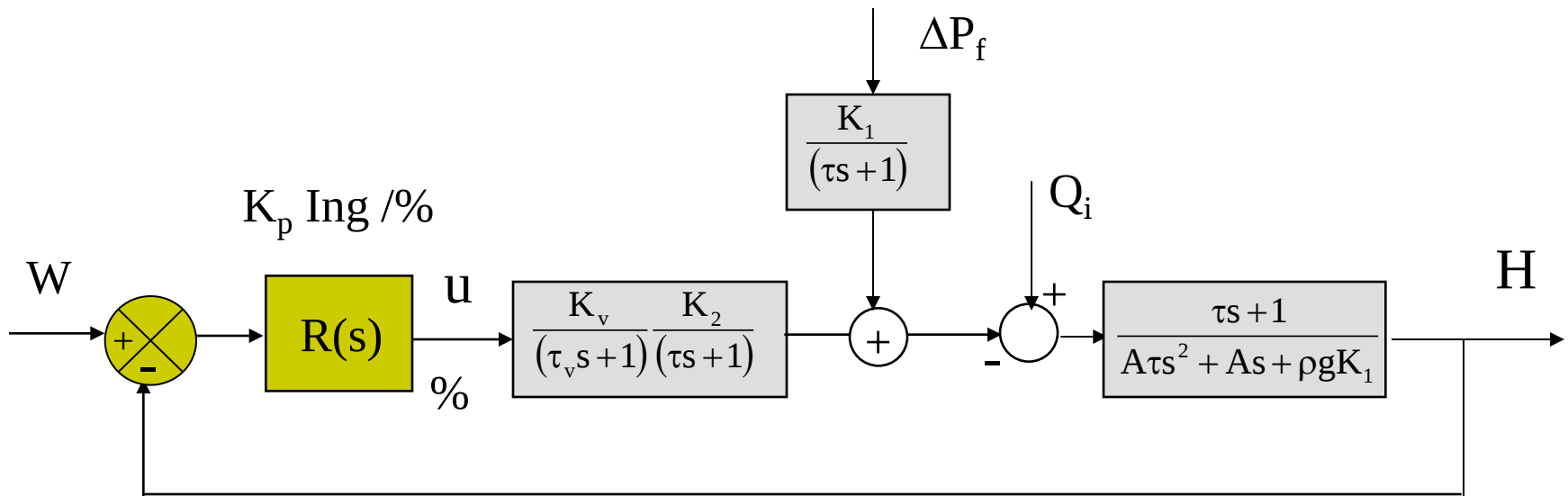


Diagrama de bloques



Control de nivel

$$\frac{dm}{dt} = q_i \rho - q \rho \quad m = Ah\rho$$

$$A \frac{dh}{dt} = q_i - q \quad A \frac{d\Delta h}{dt} = \Delta q_i - \Delta q$$

$$\tau \frac{d\Delta q}{dt} + \Delta q = K_1 \Delta(\Delta p_0) + K_2 \Delta a$$

si K_1 es muy pequeño : $\tau \frac{d\Delta q}{dt} + \Delta q = K_2 \Delta a$

$$\tau_v \frac{d\Delta a}{dt} + \Delta a = K_v \Delta u$$

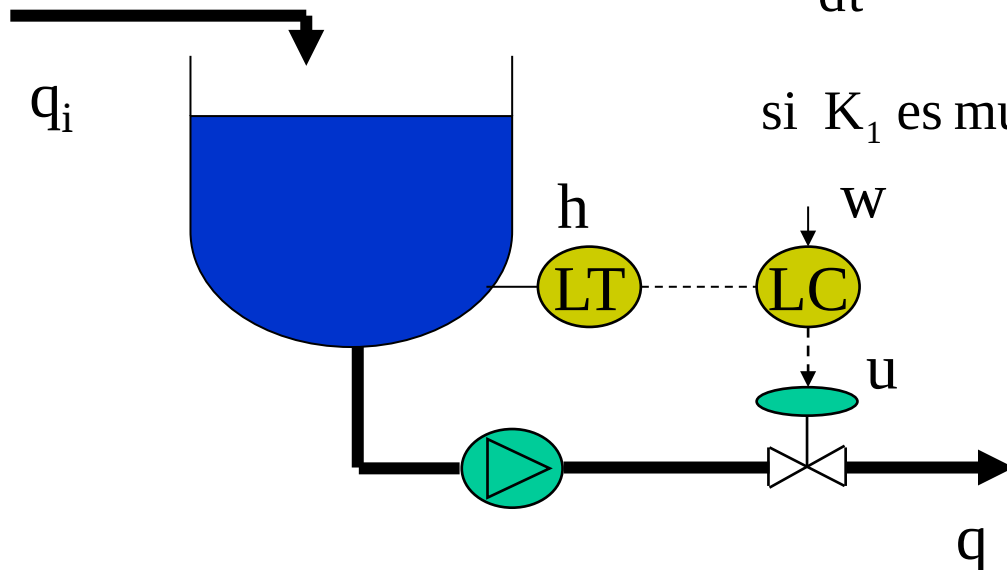
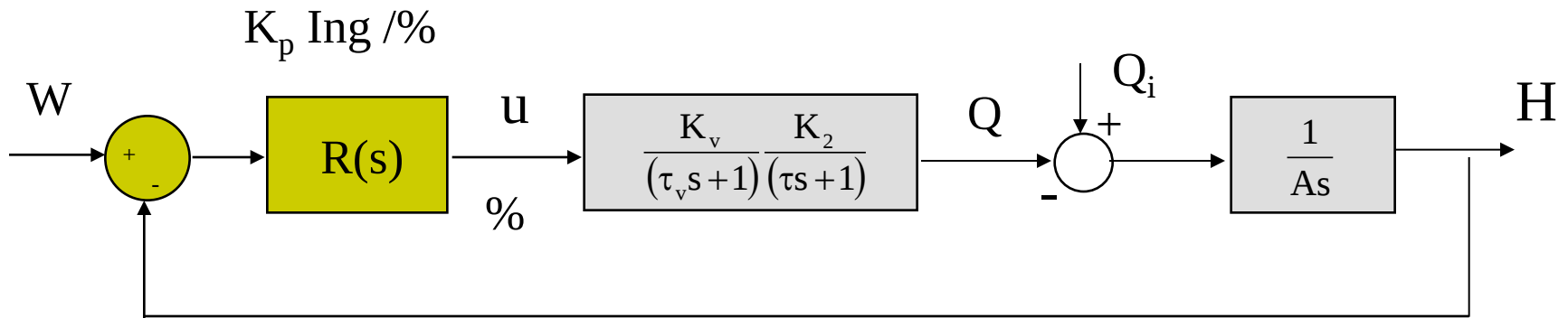
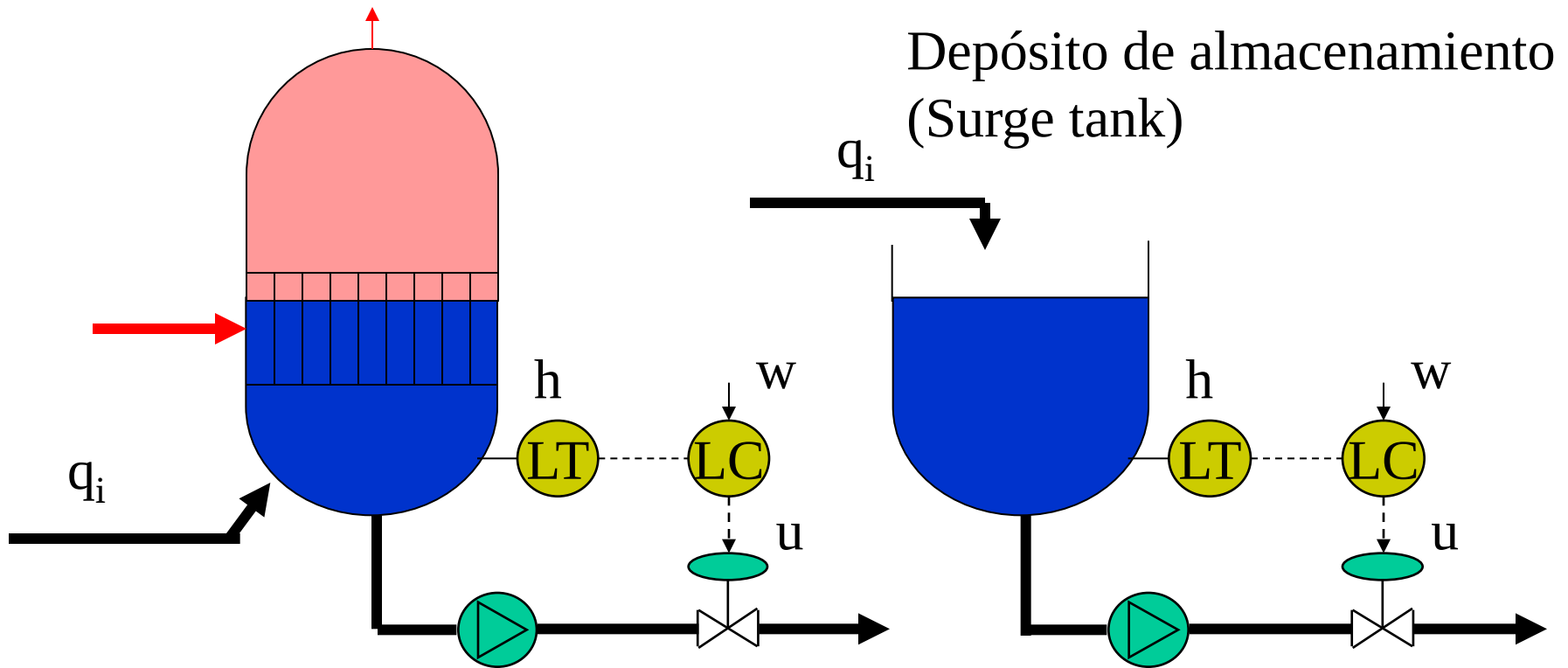


Diagrama de bloques



En la practica se comporta como un sistema con un integrador

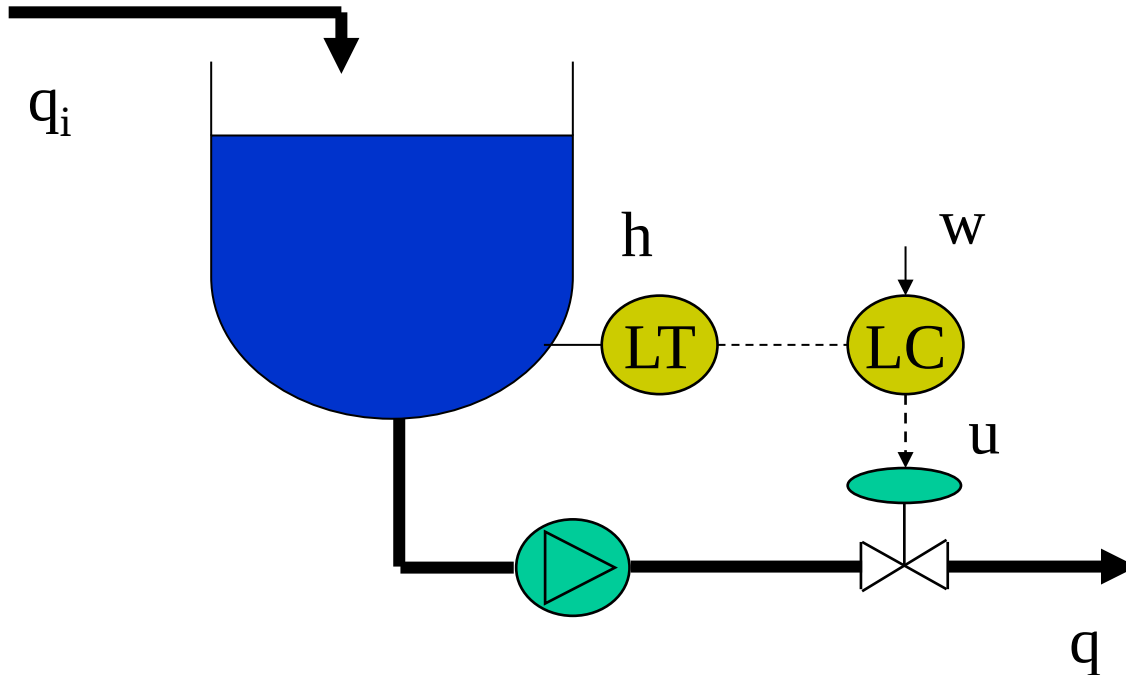
Tight /average control



El nivel debe mantenerse de forma precisa: PI con sintonía “activa”

Absorber perturbaciones en q_i + reserva: P con sintonía “suave”

Control promedio



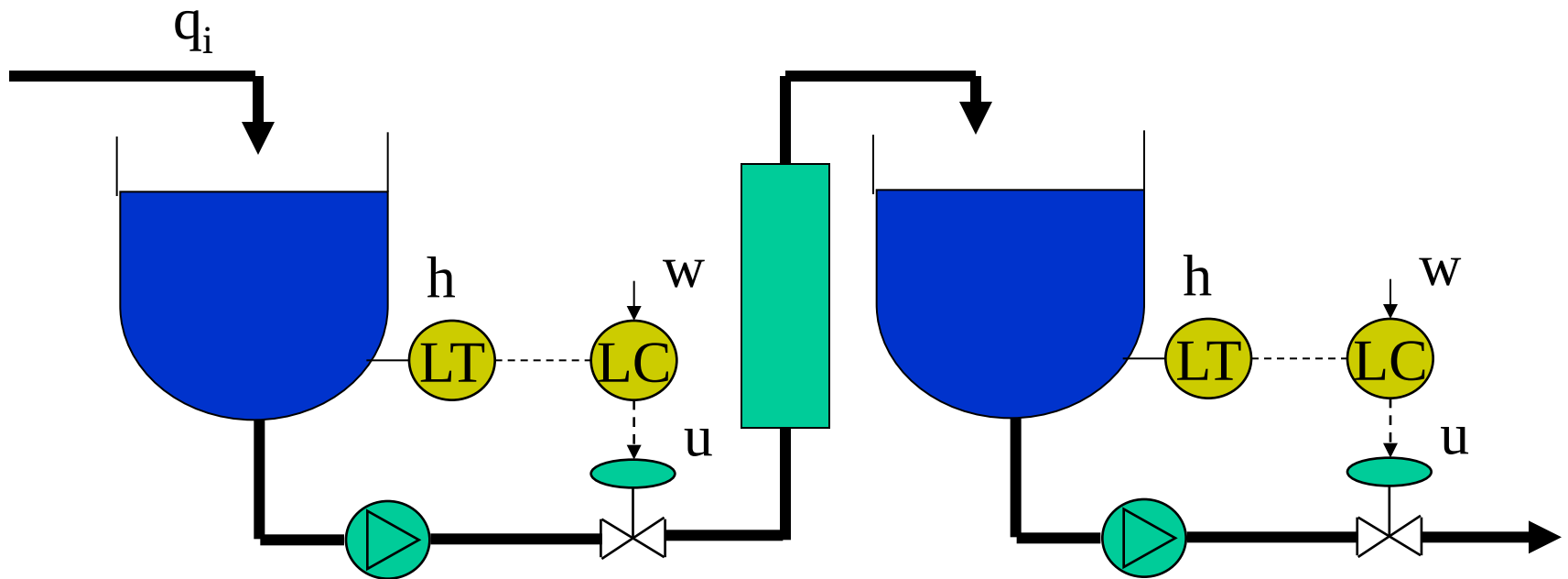
Suavizar perturbaciones.

Control P con baja K_p :
Nivel oscila con error
estacionario, pero q
varia suavemente

$$u = K_p e + \text{bias}$$

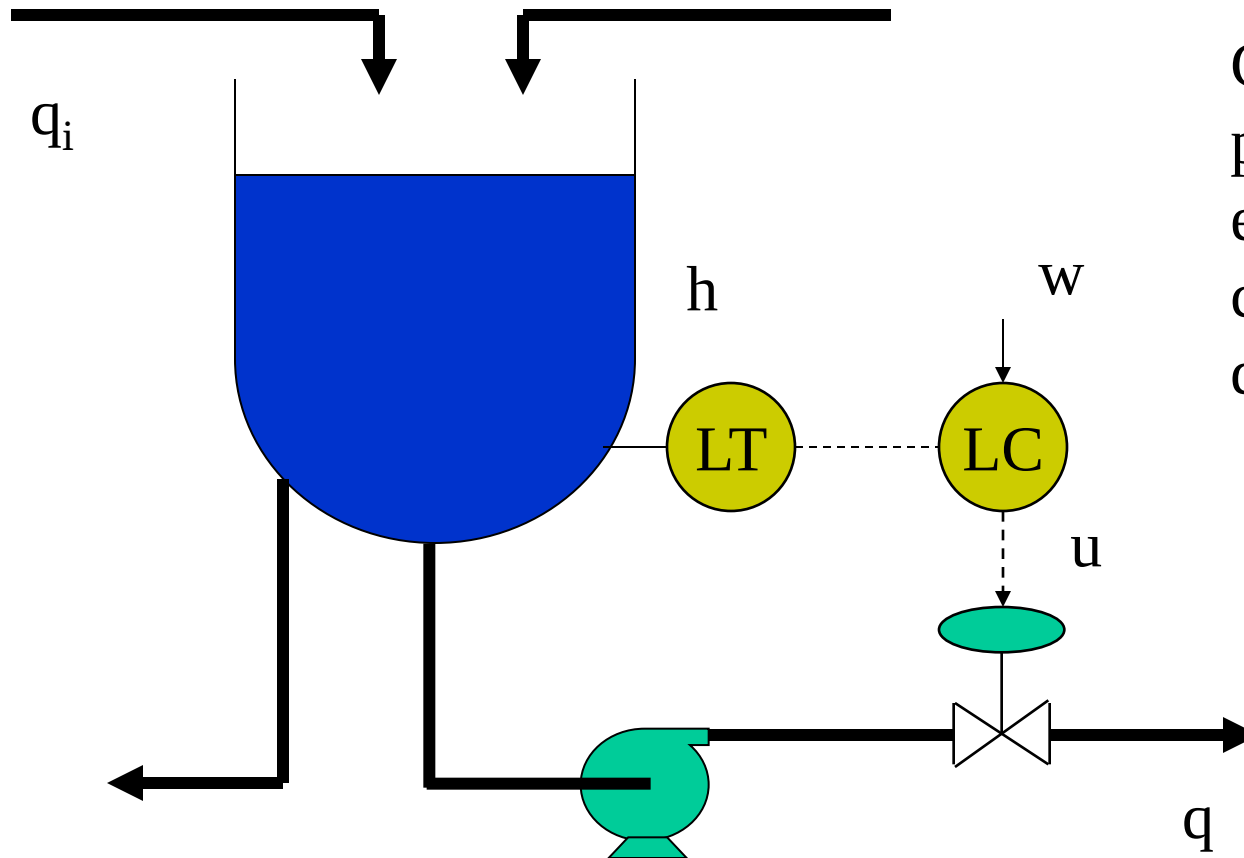
Si $w = 50\%$, $K_p = 1$ y $\text{bias} = 50\%$
 $u = 100$ si $h = 100\%$, $u = 0$ si $h = 0$

Unidades en serie



Lazos de nivel en el mismo sentido

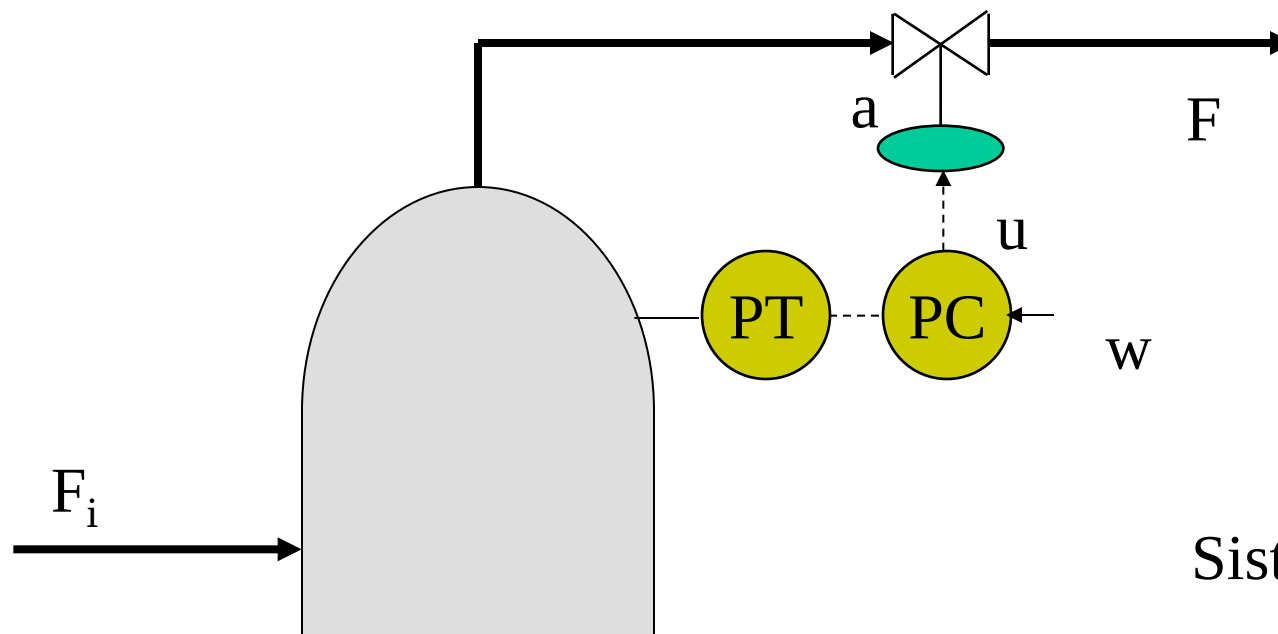
Varias corrientes



Cuando sea posible debe escogerse para el control la mayor de las corrientes

Selección del tipo de transmisor

Control de presión



Variedad de dinámicas y objetivos

Sistema rápido

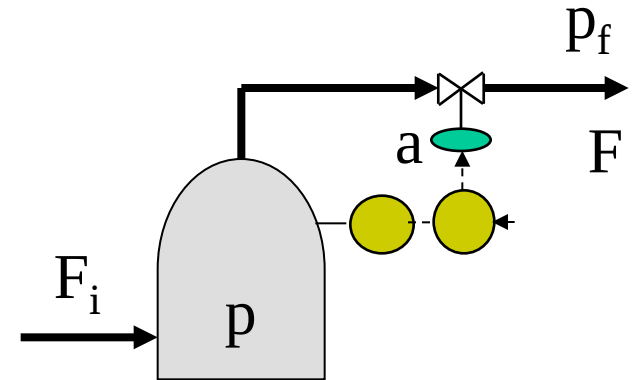
PI con sintonía
“activa”

Control de presión

$$\frac{dm}{dt} = F_i - F = F_i - aC_v \sqrt{p^2 - p_f^2}$$

$$m = V\rho \quad p = \frac{\rho}{M} RT \quad \text{tanque isoterma}$$

$$\frac{VM}{RT} \frac{dp}{dt} = F_i - aC_v \sqrt{p^2 - p_f^2}$$

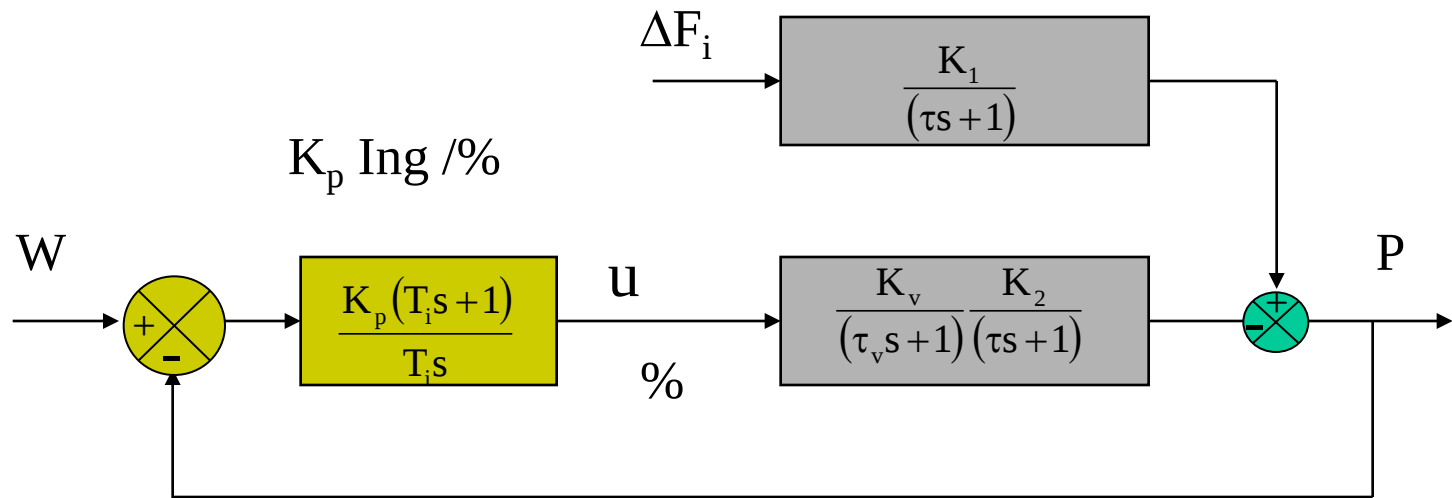


$$\left\{ \frac{VM}{RT} \right\}_0 \frac{d\Delta p}{dt} = \Delta F_i - \left\{ C_v \sqrt{p^2 - p_f^2} \right\}_0 \Delta a - \left\{ aC_v \frac{p}{\sqrt{p^2 - p_f^2}} \right\}_0 \Delta p$$

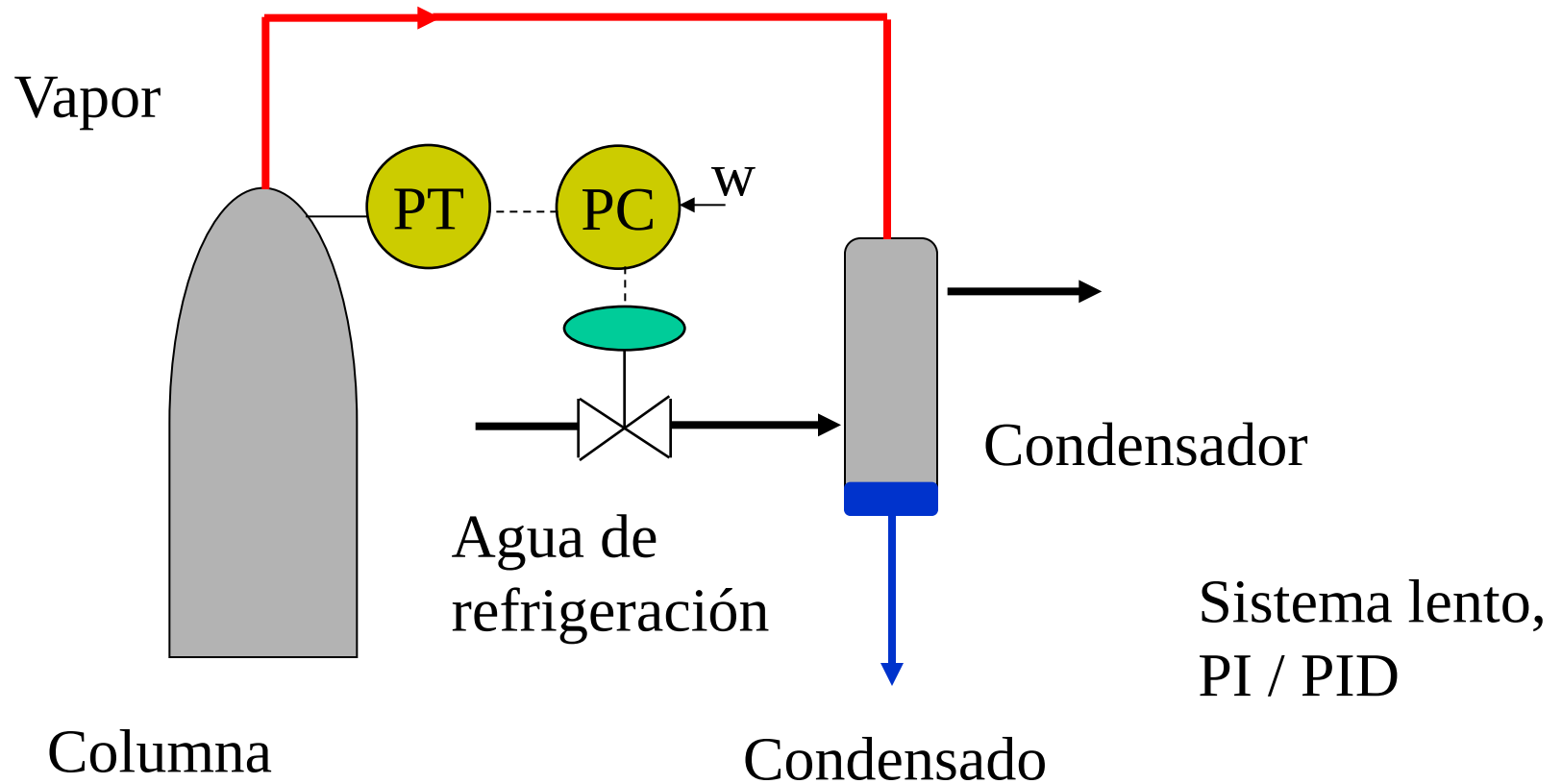
$$\left\{ \frac{VM \sqrt{p^2 - p_f^2}}{RT a C_v p} \right\}_0 \frac{d\Delta p}{dt} + \Delta p = \left\{ \frac{\sqrt{p^2 - p_f^2}}{a C_v p} \right\}_0 \Delta F_i - \left\{ \frac{p^2 - p_f^2}{a p} \right\}_0 \Delta a$$

$$\tau \frac{d\Delta p}{dt} + \Delta p = K_1 \Delta F_i - K_2 \Delta a \quad \text{Válvula:} \quad \tau_v \frac{d\Delta a}{dt} + \Delta a = K_v \Delta u$$

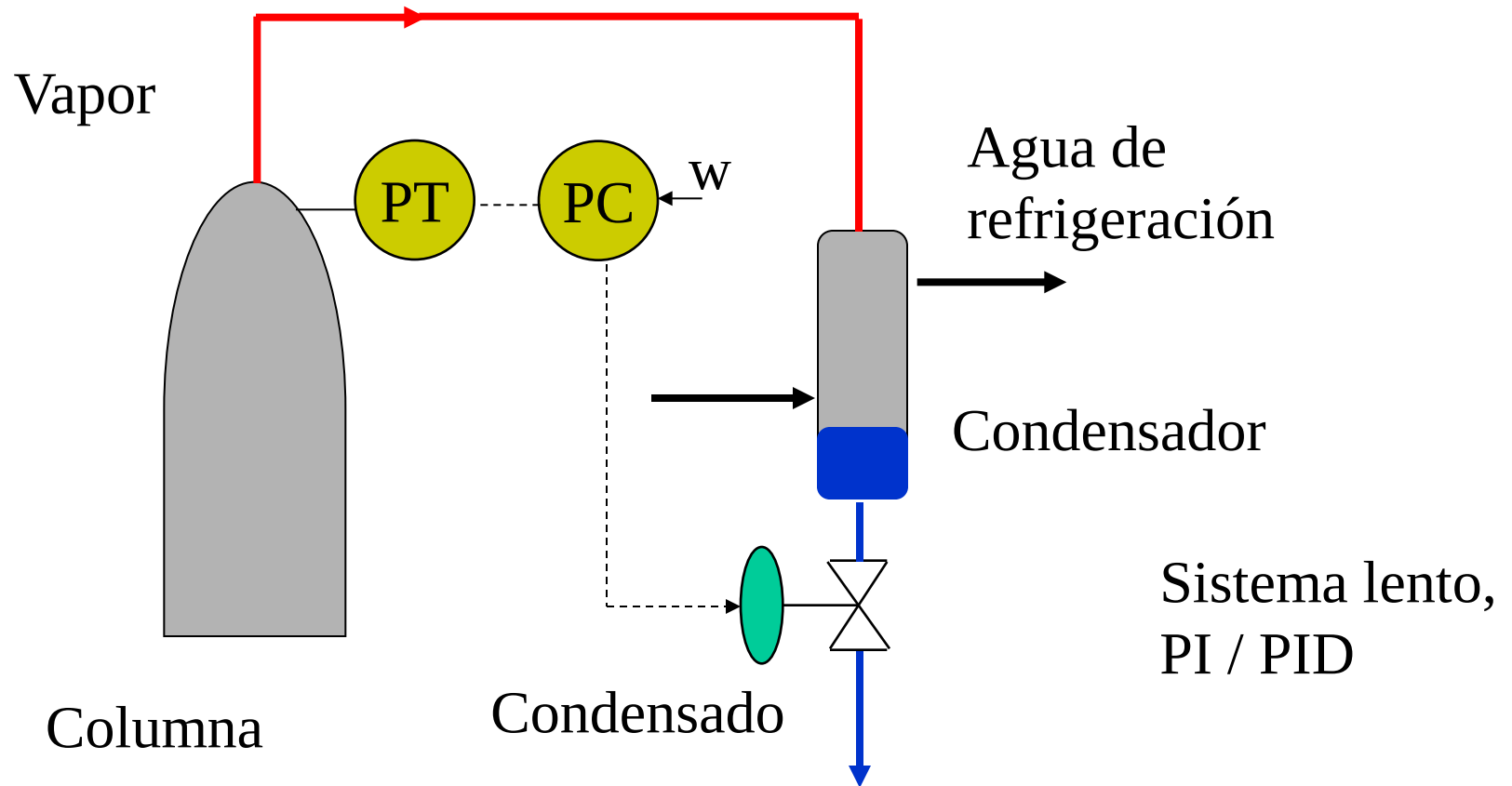
Diagrama de bloques



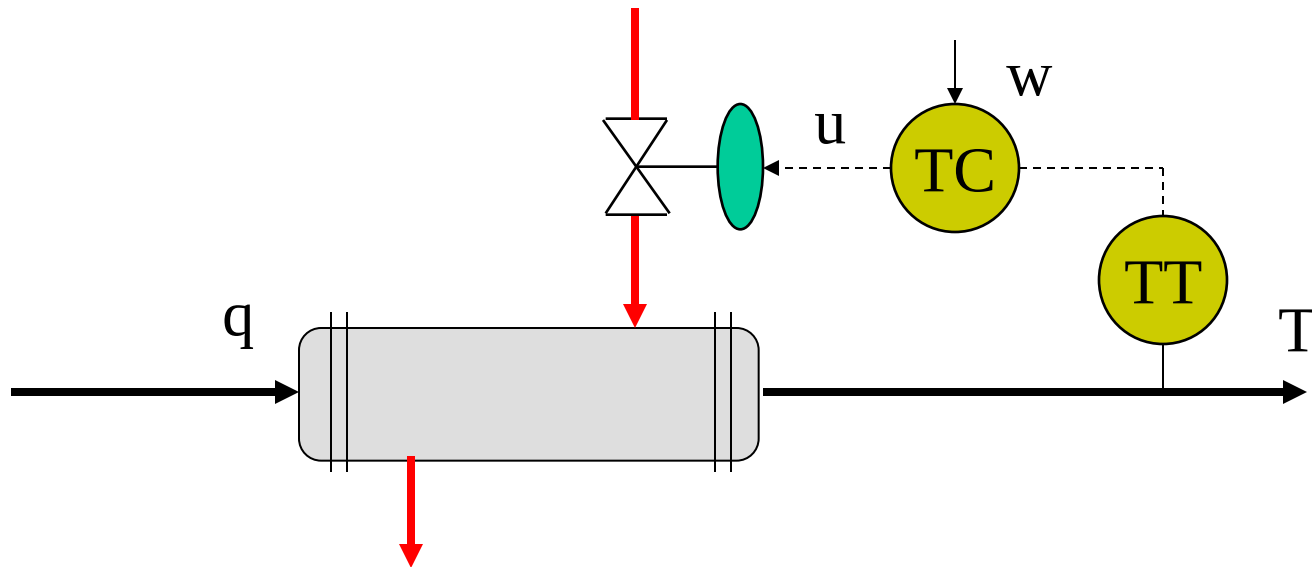
Control de presión



Control de presión



Control de temperatura



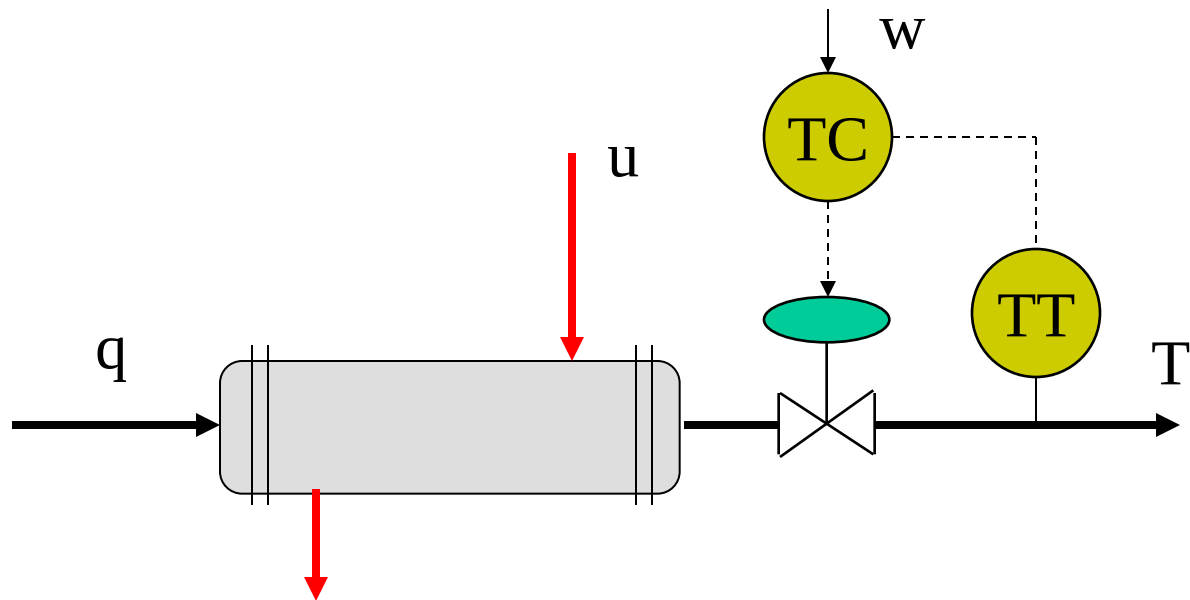
Muchas arquitecturas / procesos

Proceso lento PID

La dinámica del transmisor debe considerarse

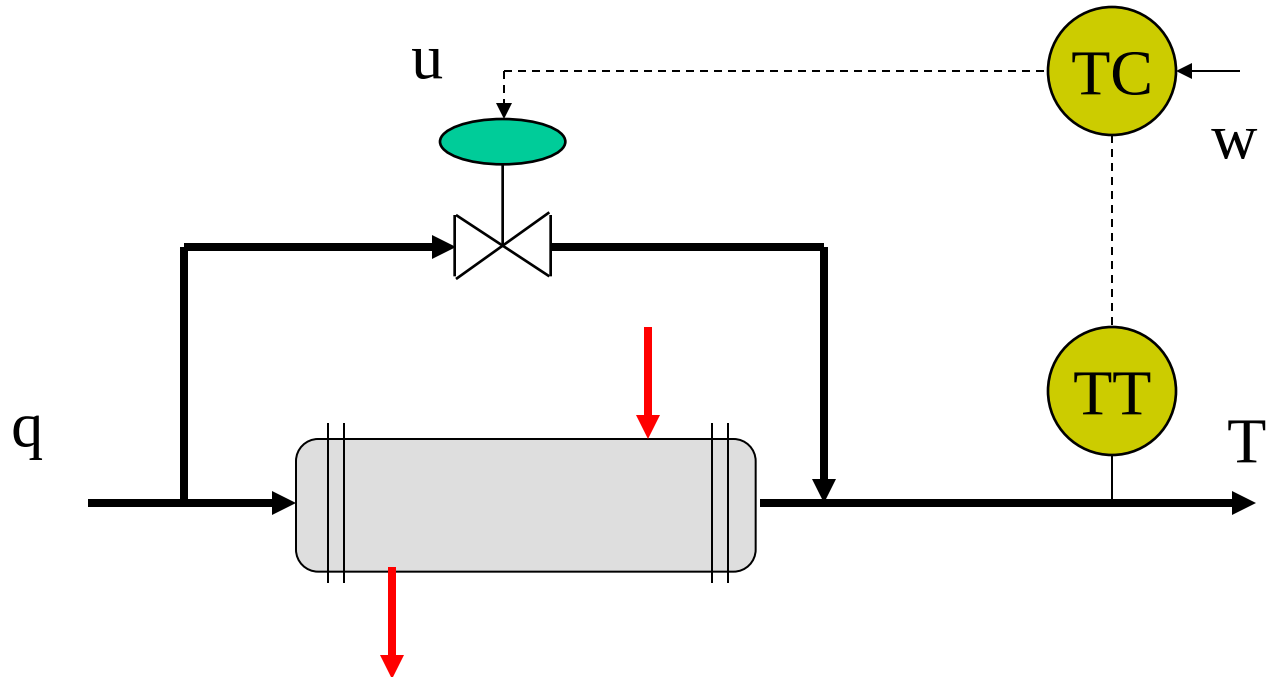
Posibles retardos por la colocación del transmisor

Control de temperatura



De esta forma se varia el flujo del producto

Control de temperatura

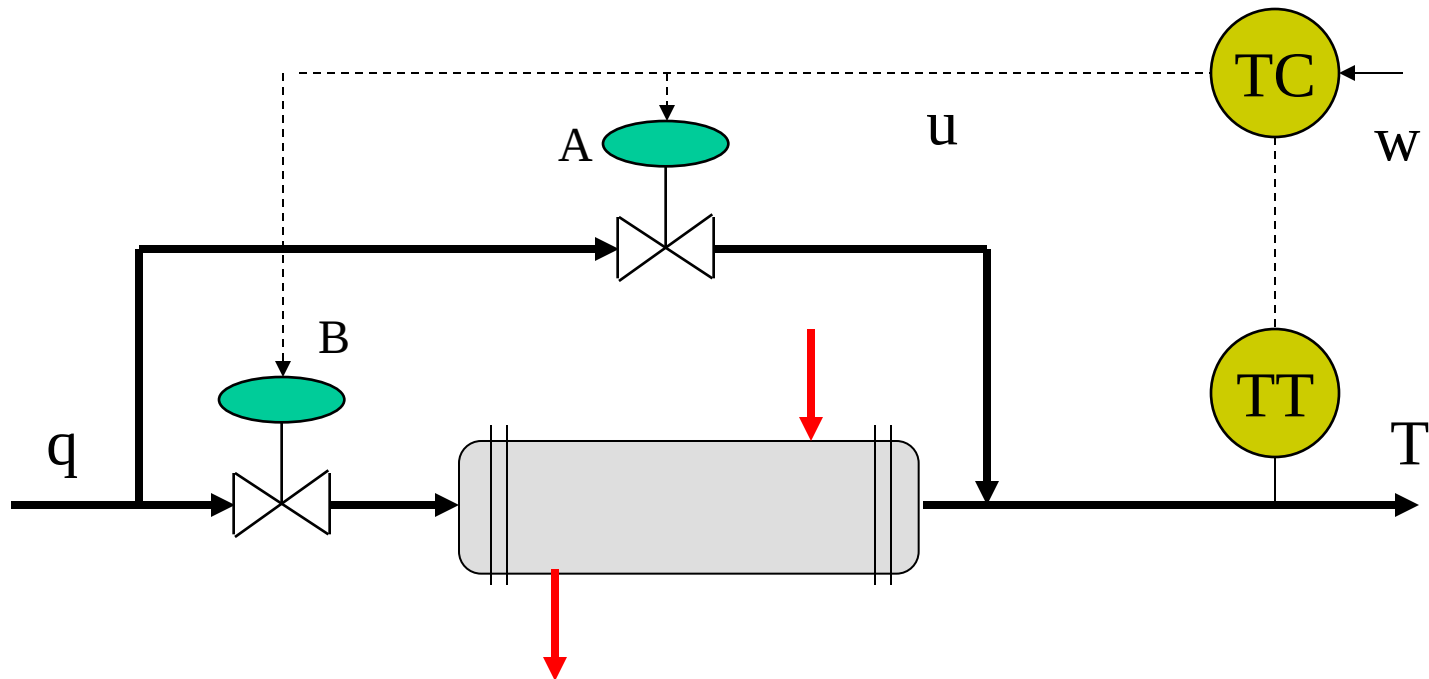


By-pass al producto

No se altera el flujo de producto

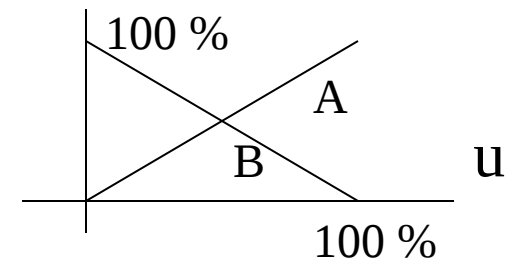
Dinámica rápida, baja controlabilidad

Control de temperatura

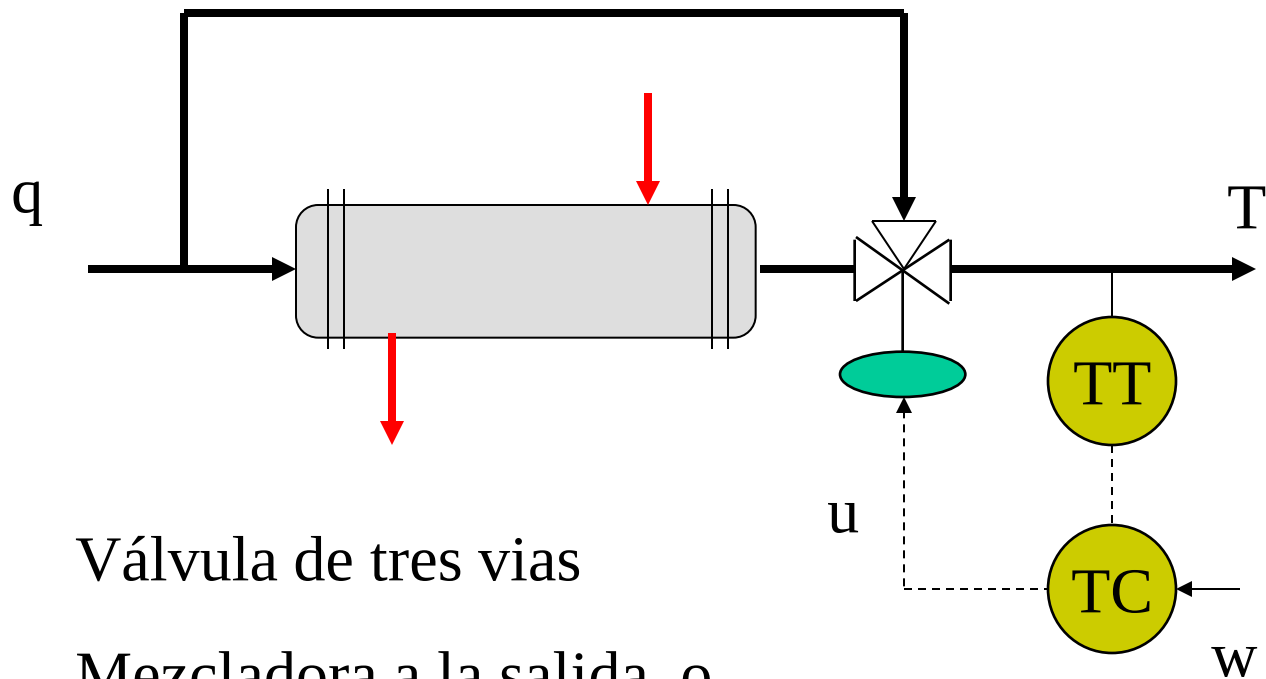


Las válvulas trabajan en oposición

Una aire-abre, otra aire-cierra



Control de temperatura



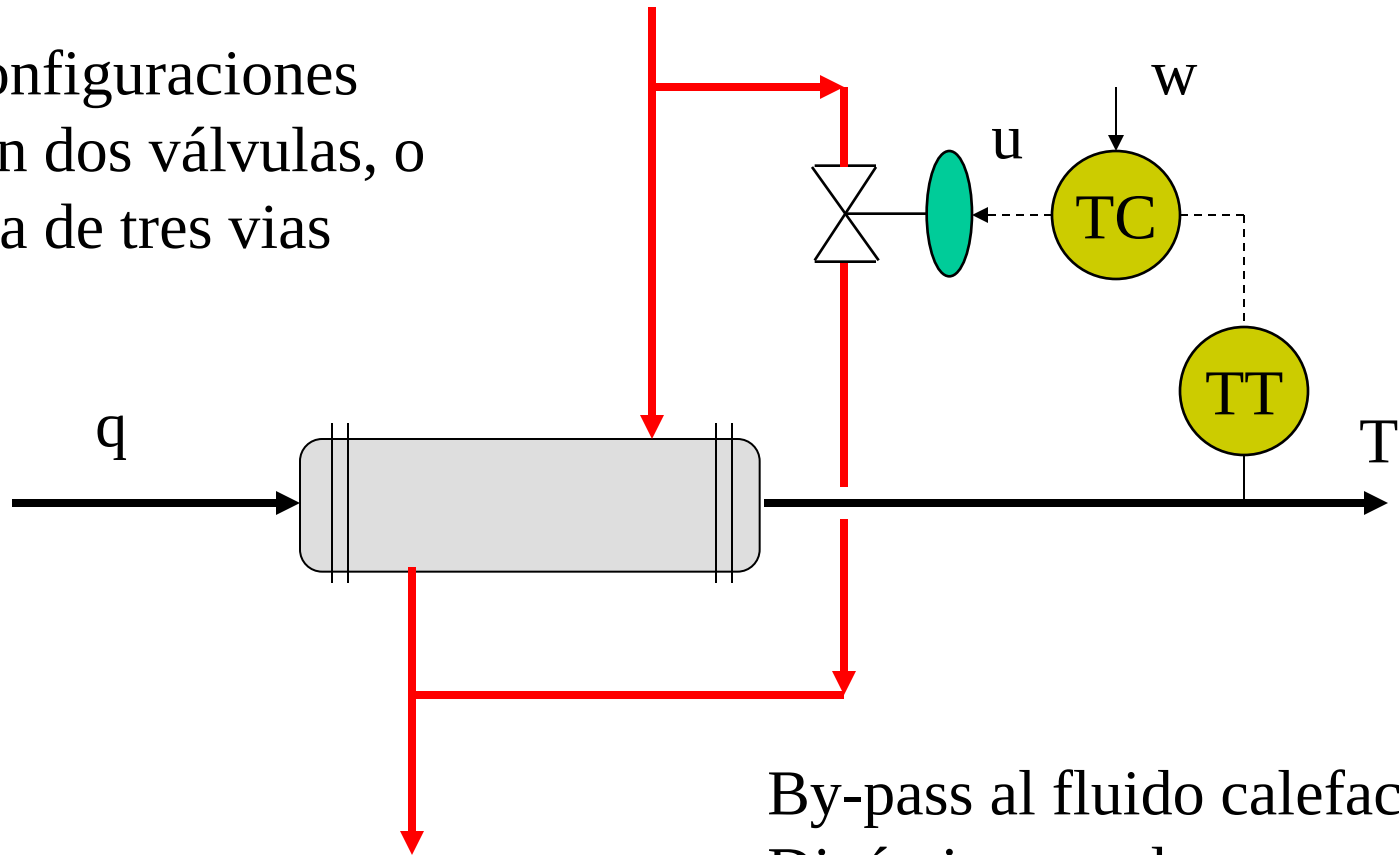
Válvula de tres vías

Mezcladora a la salida, o

Separadora a la entrada

Control de temperatura

Configuraciones
con dos válvulas, o
una de tres vias



By-pass al fluido calefactor
Dinámica mas lenta

Control de temperatura

