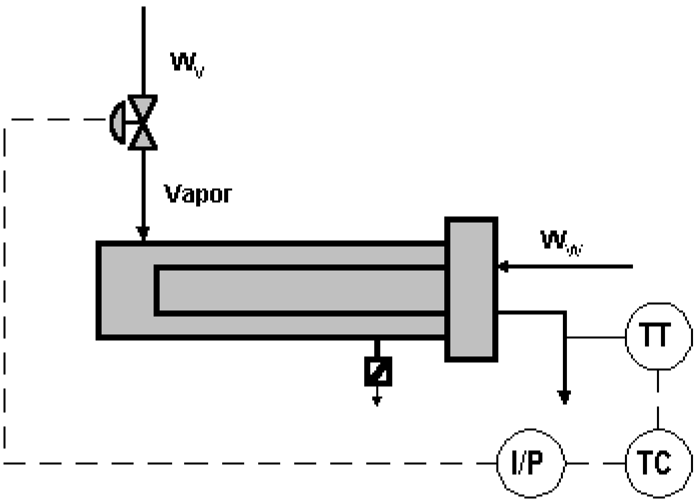
PROBLEMA – Sintonización robusta de un controlador

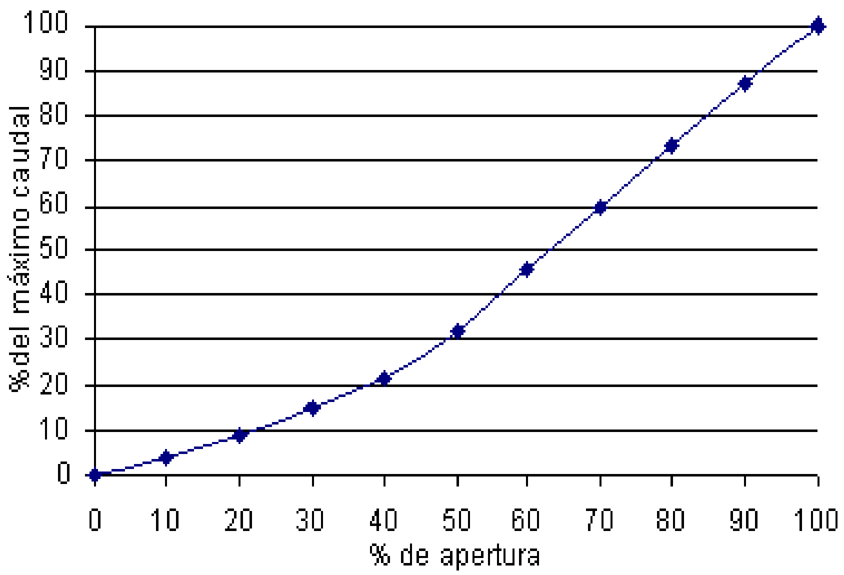
Un intercambiador de calor de tubos y coraza tendrá un sistema de control de temperatura como el que se muestra en la figura.



PROCESO.
El fluido calefactor es vapor saturado seco a 120 °C. El calor latente de vaporización es 526 kcal/kg. El fluido a calentar es agua a 20 °C. El caudal de agua varía entre 50 y 80 t/h. El valor deseado de la temperatura de salida es 80°C. Las pérdidas calóricas se estimaron en un 5 %.

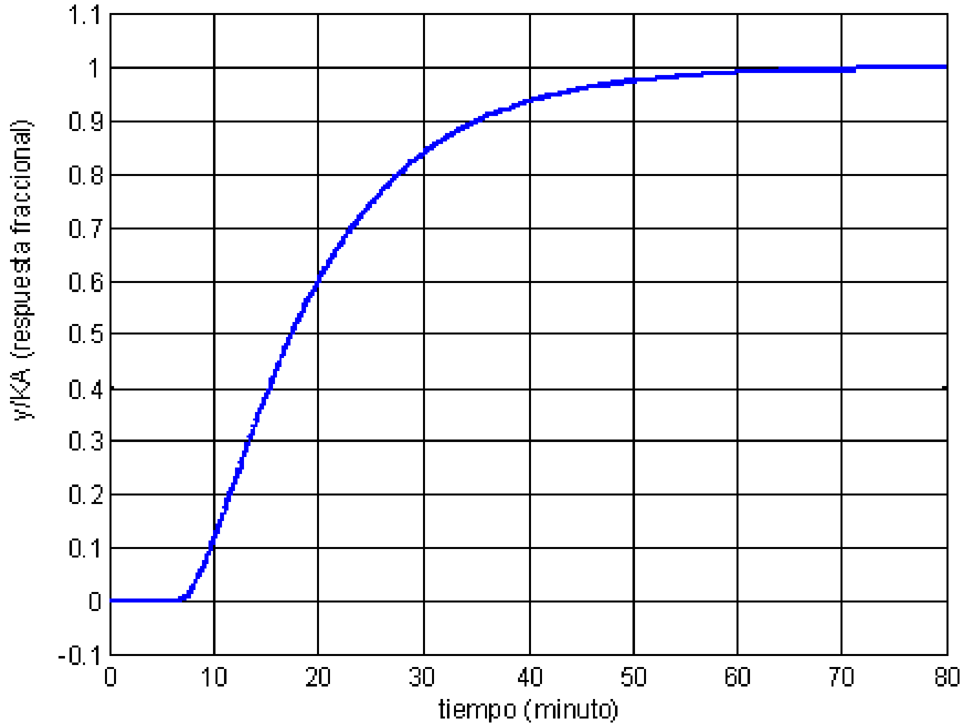
TRANSMISOR
El transmisor de temperatura tiene una termocupla tipo J en una vaina como elemento primario ajustado para medir en un rango de 60-100 °C y la salida es 4-20 mA.

ELEMENTO FINAL DE CONTROL
Se dispone de una válvula mariposa HP de 3 pulgadas de diámetro con actuador neumático. Como el flujo es de vapor, la pérdida de carga la línea donde está instalada la válvula es despreciable. El diámetro de la cañería es de 3 pulgadas. La capacidad de la válvula es de 12 t/h. La característica de flujo de la válvula instalada es la que se muestra en la figura.



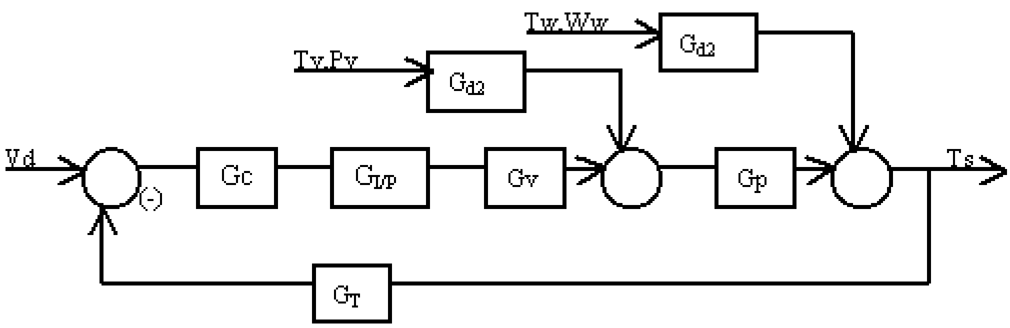
CONTROLADOR
Controlador PID electrónico y trabaja con señales en el rango 4-20 mA.

La respuesta fraccional de la señal medida ante escalones en la señal que va al transductor electro-neumático de la válvula es siempre la misma como se muestra en la figura.



(a) Realice el diagrama en bloques del sistema de control. Indique las perturbaciones más significativas.
(b) Escriba la función de transferencia de la planta: del transductor-válvula-proceso Analice si esa planta es lineal.
(c) Elija la acción de válvula y controlador
(d) Sintonice el controlador con acción proporcional.
(e) Empleando la Respuesta en Frecuencia, estime el comportamiento transitorio que tendrá la temperatura en los distintos estados de carga cuando la presión aguas arriba de la válvula varia en forma de escalón unitario.
(f) Calcule el error de estado estacionario cuando el caudal de líquido alimentado al intercambiador cambia de 60 a 58 t/h.

(a)



Perturbaciones:

- Caudal de agua de alimentación (Ww)
- Temperatura de agua de alimentación (Tw)
- Temperatura del vapor calefactor (Tv)
- Presión de vapor aguas arriba de la válvula (Pa)

(b)

Ganancia del transmisor

$$K_T = \frac{20-4}{100-60} = 0{,}4 \left[\frac{mA}{°C}\right] \quad ; \quad K_{I/P} = \frac{15-3}{20-4} = 0{,}75 \left[\frac{psi}{mA}\right]$$

Ganancia de la válvula

$$BE)ee: Ww \cdot cp \cdot (Ts - Tw) = \eta \cdot \lambda_V \cdot Wv \Rightarrow Wv = \frac{Ww \cdot cp \cdot (Ts - Tw)}{\eta \cdot \lambda_V}$$

$$Wv = \frac{1 \cdot 60}{0{,}95 \cdot 526} \cdot Ww = 0{,}12 \cdot Ww$$

$$Wv = \begin{cases} Wv_1 = 6000 \left[\frac{kg}{h}\right] = 6 \left[\frac{Tn}{h}\right] \Rightarrow \frac{Wv_1}{Wmax} = 0{,}5 \Rightarrow \%Ap = 63{,}5 \\ Wv_2 = 9606 \left[\frac{kg}{h}\right] = 9{,}6 \left[\frac{Tn}{h}\right] \Rightarrow \frac{Wv_2}{Wmax} = 0{,}8 \Rightarrow \%Ap = 84{,}7 \end{cases}$$

Para las condiciones normales de trabajo, la válvula instalada una característica de flujo lineal, entonces:

$$Kcuerpo = \frac{9{,}6-6}{84{,}7-63{,}5} = 0{,}17 \left[\frac{Tn/h}{\%Ap}\right]$$

$$Kact = \frac{100-0}{15-3} = \frac{100}{12} \left[\frac{\%Ap}{psi}\right] \text{; la acción ante fallas es SAC, por lo tanto } Kact > 0.-$$

$$Kv = Kcuerpo \cdot Kact = 0{,}17 \cdot \frac{100}{12} = 1{,}42 \left[\frac{Tn/h}{psi}\right]$$

Ganancia del proceso

$$BE)ee: Ww \cdot cp \cdot Tw - Ww \cdot cp \cdot Ts + \lambda_V \cdot \eta \cdot Wv = 0$$

Diferenciando:

$$-Ww \cdot dTs + \frac{\lambda_V \cdot \eta}{cp} \cdot dWv = 0 \Rightarrow \frac{\partial Ts}{\partial Wv} = \frac{\lambda_V \cdot \eta}{cp \cdot Ww}$$

$$Kp = \frac{\partial Ts}{\partial Wv} = \frac{\lambda_V \cdot \eta}{cp \cdot Ww} = \frac{526 \cdot 0{,}95}{Ww \cdot 1} = \frac{500}{Ww} \left[\frac{°C}{Tn/h}\right]$$

Ganancia de la planta

$$K = Kp \cdot K_{I/P} \cdot K_T \cdot Kv = \frac{500}{Ww}\left[\frac{°C}{Tn/h}\right] \cdot 0{,}75\left[\frac{psi}{mA}\right] \cdot 0{,}4\left[\frac{mA}{°C}\right] \cdot 1{,}42\left[\frac{Tn/h}{psi}\right] = \frac{213}{Ww}$$

Función de transferencia de la planta

Identificando la planta por el método de los dos puntos de Smith resulta:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-L \cdot s}}{\tau \cdot s + 1} \qquad \tau = 19\ [min] \quad L = 7{,}5\ [min]$$

La función de transferencia de involucra VÁLVULA+PROCESO+TRANSMISOR resulta:

$$G(s) = \frac{213/Ww \cdot e^{-7{,}5\,s}}{19 \cdot s + 1}$$

La planta presenta una no-linealidad estática, ya que la ganancia global resulta ser proporcional en forma inversa al caudal de vapor.

(c)

La válvula se escoge FC (Fail Close) o sea, ante una falla en el suministro de aire cerrará. Como

$$Kp \cdot Kv \cdot K_T \cdot K_{I/P} > 0$$

y se tiene que cumplir que

$$\prod Ki > 0 \Rightarrow Kc > 0$$

por lo tanto la acción del controlador es inversa.

(d)

Para la sintonización del controlador se empleará el método de Ziegler y Nichols de las oscilaciones sostenidas.

Como la relación

$$\frac{L}{\tau} = \frac{7{,}5}{19} = 0{,}395$$

se puede utilizar la aproximación de Fuentes:

$$\omega_n = \frac{\pi}{2 \cdot L} + \frac{1}{2 \cdot \tau} = 0{,}236\left[\frac{1}{min}\right] \Rightarrow \rho_C = \frac{Kcu \cdot K}{\tau \cdot \omega_n} = 1 \Rightarrow Kcu = \frac{\tau \cdot \omega_n}{K} = \frac{19 \cdot 0{,}236}{213/Ww}$$

$$Kcu = 2{,}1 \cdot 10^{-2} \cdot Ww \begin{cases} Ww_1 = 50\,[tn/h] \Rightarrow Kcu_1 = 1{,}052 \\ Ww_2 = 80\,[tn/h] \Rightarrow Kcu_2 = 1{,}684 \end{cases}$$

Se elige la menor de las ganancias últimas para sintonizar el controlador, ya que eso garantiza que el Margen de Ganancia será siempre mayor que 2.

$$Kc = \frac{Kcu}{2} = \frac{1{,}052}{2} = 0{,}526$$

(e)

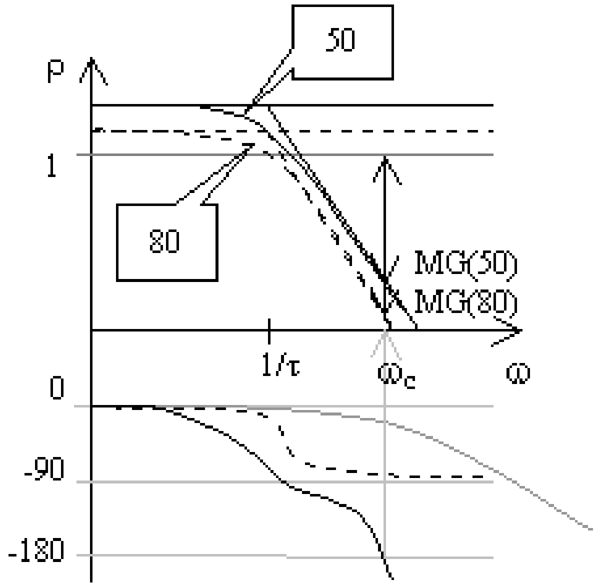
Estimación de la forma en la que el lazo responde a perturbaciones.

$$\frac{\Delta y}{\Delta Pv} = \frac{Kd \cdot \dfrac{Kp \cdot e^{-Ls}}{\tau \cdot s + 1}}{1 + Kc \cdot K' \cdot \dfrac{Kp \cdot e^{-Ls}}{\tau \cdot s + 1}}$$

$$Gc \cdot G_{I/P} \cdot Gv \cdot Gp \cdot G_T = Kc \cdot K' \cdot \frac{Kp \cdot e^{-Ls}}{\tau \cdot s + 1}$$

$$Kp = \frac{500}{Ww}$$

Ww (t/h)	ω_C (min^{-1})	MG
50	0.236	2.0
80	0.236	3.2



- Como el MG es menor Ww = 50 t/h, la respuesta es menos atenuada a caudales bajos.
- Como la frecuencia crítica permanece constante, la frecuencia propia cambiará sólo por efecto de la atenuación de la respuesta. Cuanto mayor atenuación (mayor MG), menor será la frecuencia propia de oscilación. La frecuencia propia es menor a medida que se trabaja con caudales más altos.

(f)

Error de estado estacionario

$$\frac{\Delta T}{\Delta Ww} = \frac{Kd \cdot e^{-Ls}}{\tau \cdot s + 1}$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta Ww} = \frac{\dfrac{K_T \cdot Kd \cdot e^{-Ls}}{\tau \cdot s + 1}}{1 + \dfrac{Kc \cdot K \cdot e^{-Ls}}{\tau \cdot s + 1}}$$

$$\Delta y(s) = \left[\frac{\dfrac{K_T \cdot Kd \cdot e^{-Ls}}{\tau \cdot s + 1}}{1 + \dfrac{Kc \cdot K \cdot e^{-Ls}}{\tau \cdot s + 1}} \right] \cdot \frac{A}{s}$$

$$ee = \lim_{t\to\infty} \Delta y(t) = \lim_{s\to 0}\left[s\cdot \Delta y(s)\right] = \lim_{s\to 0}\left\{ s\cdot\left[\frac{\dfrac{K_T\cdot Kd\cdot e^{-Ls}}{\tau\cdot s+1}}{1+\dfrac{Kc\cdot K\cdot e^{-Ls}}{\tau\cdot s+1}}\right]\cdot\frac{A}{s}\right\}$$

$$ee = -\frac{A\cdot Kd\cdot K_T}{1+Kc\cdot K}$$

$$Kd = \frac{T_W^0 - T_S^0}{Ww} = -\frac{60}{Ww}\begin{cases} Ww = 50\left[tn/h\right] \Rightarrow Kd_1 = -1{,}2 \\ Ww = 80\left[tn/h\right] \Rightarrow Kd_2 = -0{,}75 \end{cases}$$

$$ee = \begin{cases} ee_1 = \dfrac{1{,}2}{1+4{,}26\cdot 0{,}526} = 0{,}37 \quad \text{para } Ww = 50\left[tn/h\right] \\ ee_2 = \dfrac{0{,}75}{1+2{,}66\cdot 0{,}526} = 0{,}31 \quad \text{para } Ww = 80\left[tn/h\right] \end{cases}$$