



Control de Procesos Industriales

5. Control Regulatorio Básico

por
Pascual Campoy
Universidad Politécnica Madrid

1



Control Regulatorio Básico

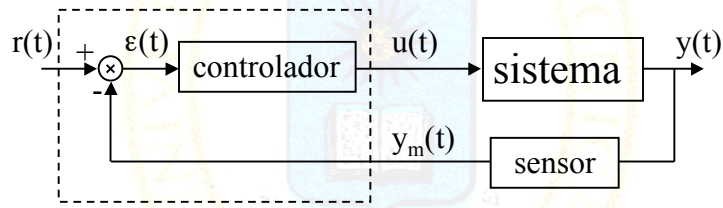
- Estructura básica de control
- Acciones básicas de control
- Tipos de controladores PID
- Ajuste de controladores en sistemas aproximables a primer orden
- Ajuste empírico de controladores en sistemas de orden superior





Estructura básica de control

Control por realimentación de la salida



¿cuánto debe valer $u(t)$ en función de $\varepsilon(t)$?



Control Regulatorio Básico

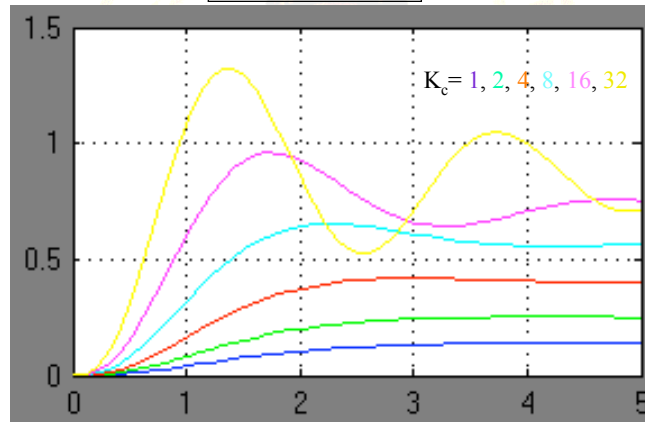
- Estructura básica de control
- Acciones básicas de control
- Tipos de controladores PID
- Ajuste de controladores en sistemas aproximables a primer orden
- Ajuste empírico de controladores en sistemas de orden superior





Acciones básicas de control: Acción proporcional

$$u(t) = K_c \varepsilon(t)$$



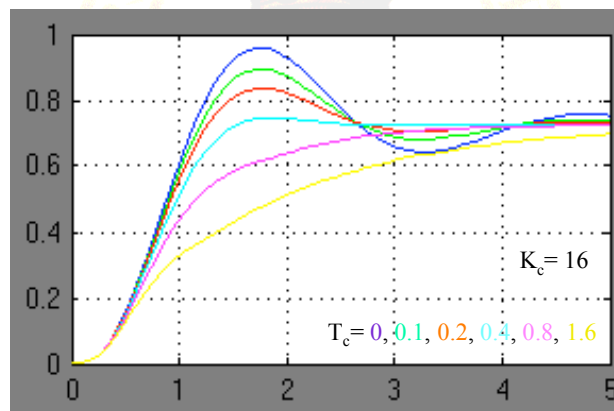
Control de Procesos Industriales

5



Acciones básicas de control: acción proporcional-derivativa

$$U(s) = K_c(1+T_d s) \varepsilon(s)$$



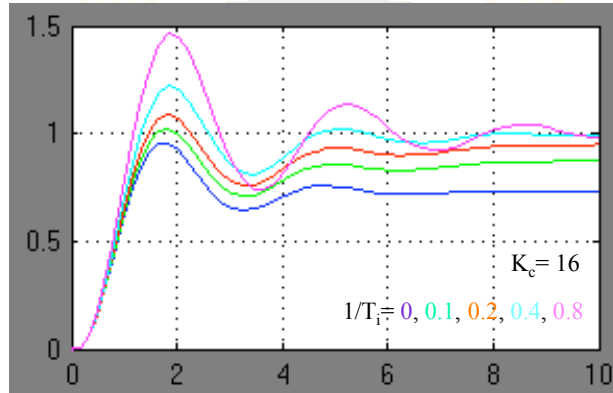
Control de Procesos Industriales

6



Acciones básicas de control: acción proporcional-integral

$$U(s) = K_c(1+1/T_i s)\epsilon(s)$$



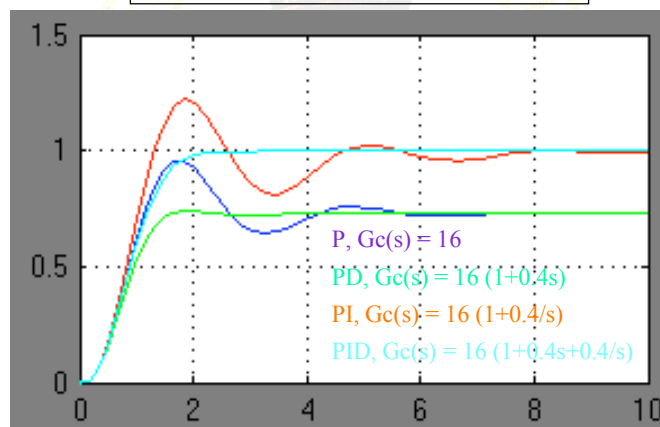
Control de Procesos Industriales

7



Acciones básicas de control: proporcional-integral-derivativa

$$U(s) = K_c(1+T_d s+1/T_i s)\epsilon(s)$$

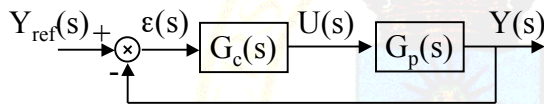


Control de Procesos Industriales

8



F.d.T. de un C.R.B.



$$\frac{Y(s)}{Y_{ref}(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)}$$

dinámica:

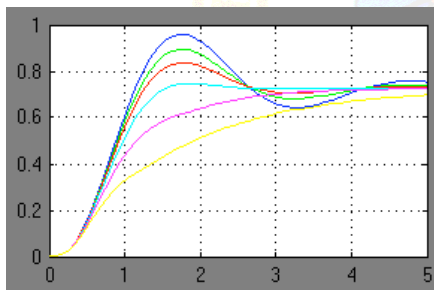
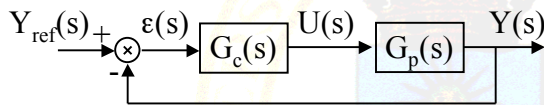
$$\frac{Y(s)}{Y_{ref}(s)} = \frac{K_{cp} \prod_{i=1}^q (s/z_i + 1)}{\prod_{i=1}^n (s/p_i + 1) + K_{cp} \prod_{i=1}^q (s/z_i + 1)}$$

estática si es estable:

$$\frac{Y(\infty)}{Y_{ref}(\infty)} = \frac{K_{cp}}{1 + K_{cp}}$$



Evaluación de un C.R.B.



$$IEC = \int_0^{\infty} (y(t) - y_{ref}(t))^2 dt$$



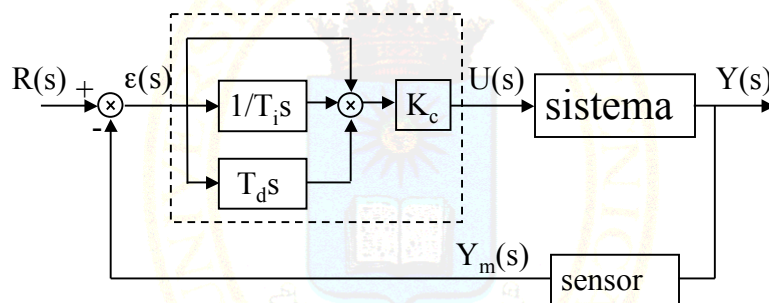


Control Regulatorio Básico

- Estructura básica de control
- Acciones básicas de control
- Tipos de controladores PID
- Ajuste de controladores en sistemas aproximables a primer orden
- Ajuste empírico de controladores en sistemas de orden superior



Controlador PID paralelo

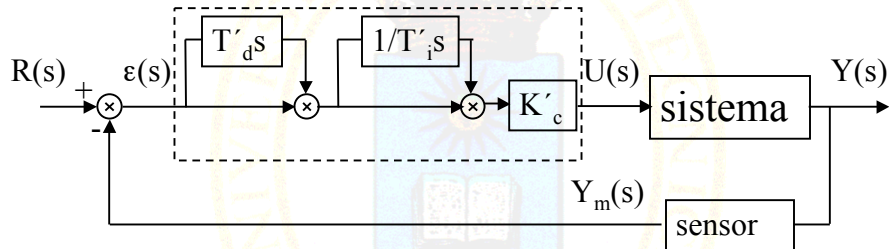


$$U(s) = K_c(1 + 1/T_i s + T_d s) \epsilon(s)$$





Controlador PID serie



$$U(s) = K'_c (1 + 1/T'_i s) (1 + T'_d s) \epsilon(s)$$



Cotroladores paralelo y serie: comparativa

- **Controlador paralelo:**
 - facilidad de implementación analógica (neumática y electrónica)
 - denominado también "controlador clásico"
- **Controlador serie:**
 - acciones de control asociadas a un único parámetro
 - denominado también "controlador no interrelacionado"

relación entre los parámetros:

$$K_c = K'_c \frac{T'_i + T'_d}{T'_i} \quad K'_c = \frac{K_c}{2} (1 + \sqrt{1 - 4T_d/T_i})$$

$$T_i = T'_i + T'_d \quad T'_i = \frac{T_i}{2} (1 + \sqrt{1 - 4T_d/T_i})$$

$$T_d = \frac{T'_i T'_d}{T'_i + T'_d} \quad T'_d = \frac{2T_d}{1 + \sqrt{1 - 4T_d/T_i}}$$

• coincidentes para $T_d/T_i \rightarrow 0$

• la versión serie sólo existe para $T_i \geq 4T_d$
paralelo es más general y permite ceros complejos





Controladores PID realizables

- controladores PID ideales:

paralelo:

$$U(s) = K_c \frac{T_i s + T_i T_d s^2 + 1}{T_i s} \epsilon(s)$$

serie:

$$U(s) = K_c \frac{(T_i s + 1)(T_d s + 1)}{T_i s} \epsilon(s)$$

- controladores PID realizables:

paralelo:

$$U(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\gamma T_d s + 1} \right) \epsilon(s)$$

serie:

$$U(s) = K_c' \left(1 + \frac{1}{T_i' s} \right) \left(1 + \frac{T_d' s}{\gamma T_d' s + 1} \right) \epsilon(s)$$

siendo γ un parámetro físico del controlador no ajustable, cuyo valor suele ser estar entre 0.05 y 0.1



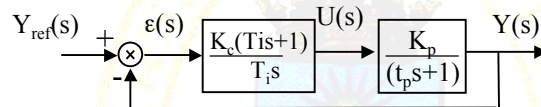
Control Regulatorio Básico

- Estructura básica de control
- Acciones básicas de control
- Tipos de controladores PID
- Ajuste de controladores en sistemas aproximables a primer orden
- Ajuste empírico de controladores en sistemas de orden superior





Ajuste PID en sistemas de 1^{er} orden



$$\frac{Y(s)}{Y_{ref}(s)} = \frac{K_c K_p \frac{T_i s + 1}{T_i s (t_p s + 1)}}{1 + K_c K_p \frac{T_i s + 1}{T_i s (t_p s + 1)}} = \frac{K_c K_p (T_i s + 1)}{T_i s (t_p s + 1) + K_c K_p (T_i s + 1)}$$

$$\text{si: } T_i = t_p \Rightarrow \frac{Y(s)}{Y_{ref}(s)} = \frac{K_c K_p}{T_i s + K_c K_p}$$

$$t_{pcc} = \frac{T_i}{K_c K_p} \Rightarrow K_c \gtrsim \frac{1}{K_p}$$



Control Regulatorio Básico

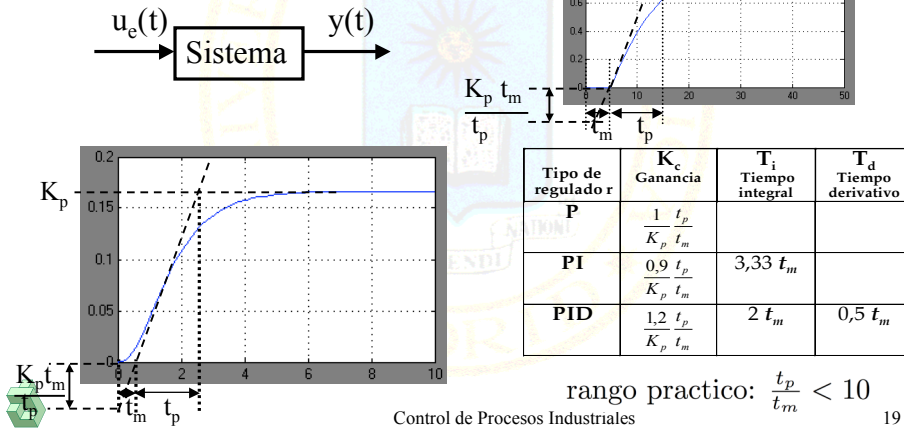
- Estructura básica de control
- Acciones básicas de control
- Tipos de controladores PID
- Ajuste de controladores en sistemas aproximables a 1^{er} orden
- Ajuste empírico de controladores en sistemas de orden superior





Ajuste empírico de PID: Zigler Nichols en bucle abierto

- Tabla basada en la caracterización de la respuesta ante escalón unitario:



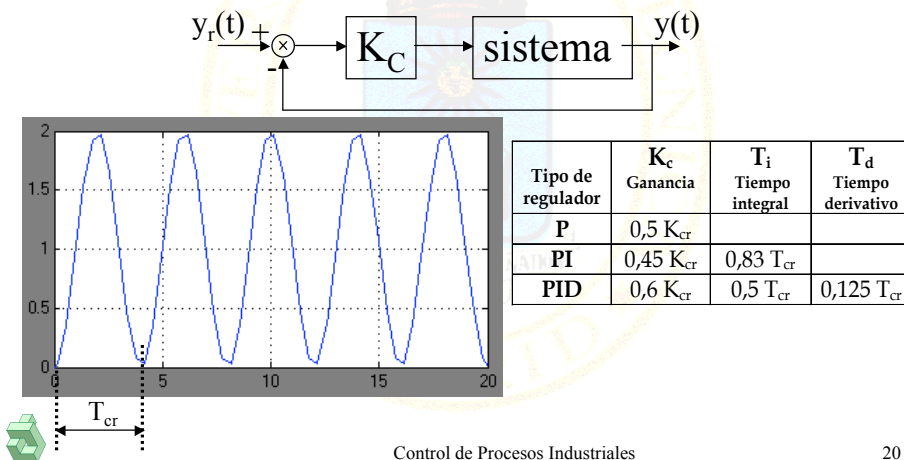
Control de Procesos Industriales

19



Ajuste empírico de PID: Ziegler-Nichol en bucle cerrado

- Tabla basada en el comportamiento límite en bucle cerrado:



Control de Procesos Industriales

20



Ajuste empírico de PID: Tipo de controlador de Z-N

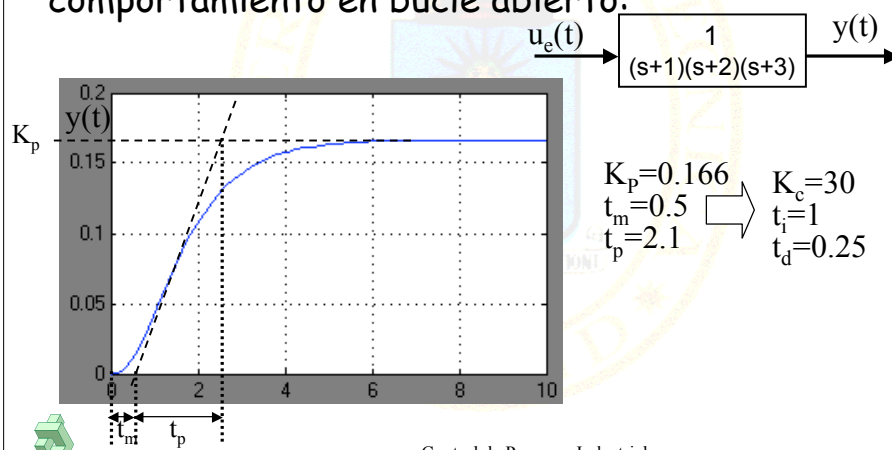
- Sólo existe diferencia en controlador PID
- No está claro el controlador usado por Z-N
- La mayoría de los autores utilizan la versión paralelo o paralelo con filtro
- Los resultados son parecidos, y algo mejor si se aplica controlador en paralelo.

(si se supusiera que son los parámetros del serie, se tendría $K_c=1.25K'_c$, $T_i=1.25T'_i$, $T_d=0.8T'_d$, obteniéndose por tanto mayor sobreoscilación en la respuesta)



Ejemplo 1 (1/3)

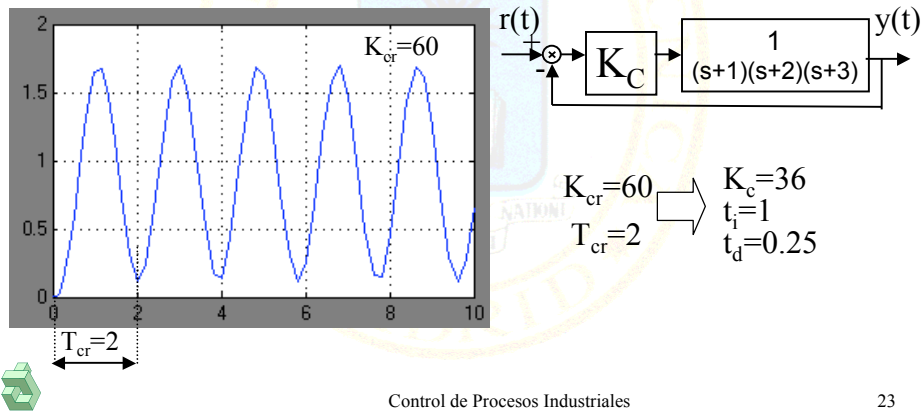
- Tabla de Ziegler-Nichols basada en el comportamiento en bucle abierto:





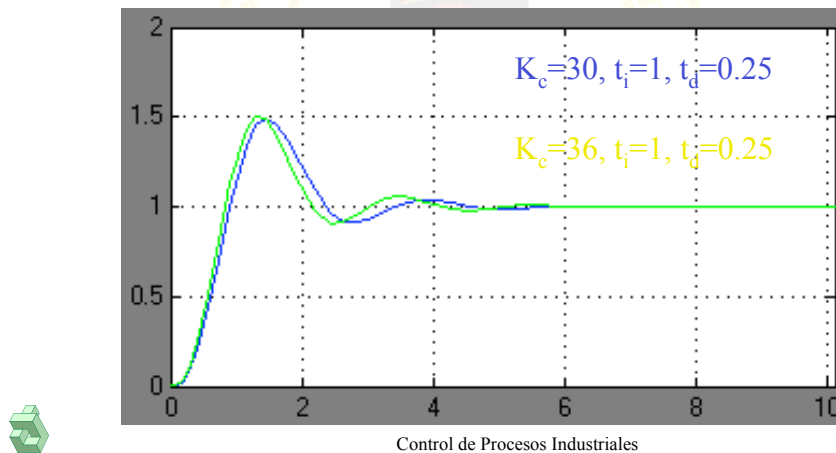
Ejemplo 1 (2/3)

- Tabla de Ziegler-Nichols basada en el comportamiento en bucle cerrado:



Ejemplo 1 (3/3)

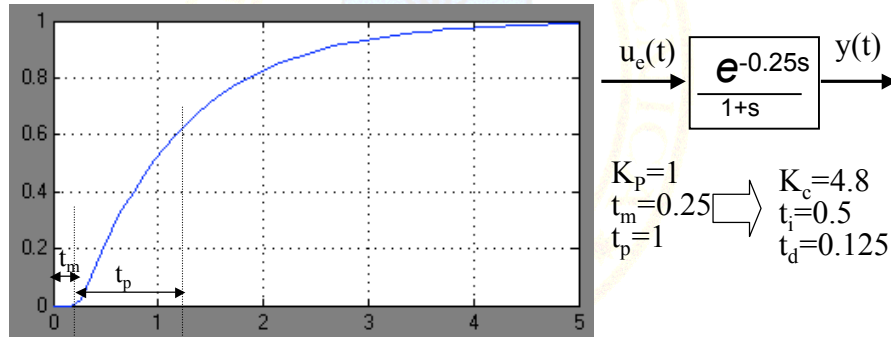
- comparativa de ambos controladores:





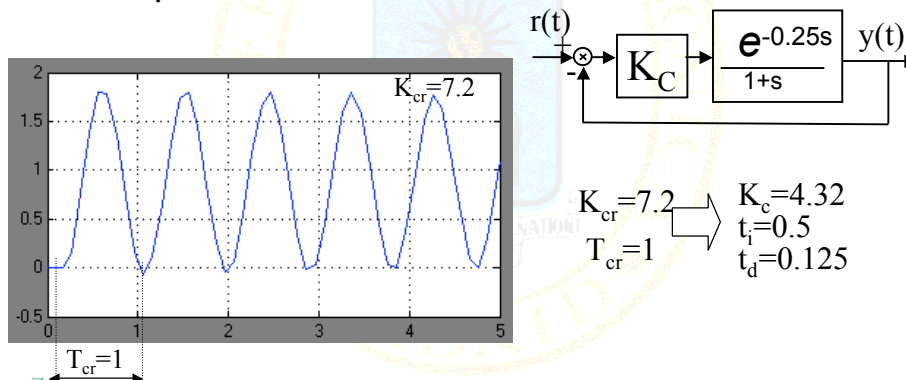
Ejemplo 2 (1/3)

- Tabla de Ziegler-Nichols basada en el comportamiento en bucle abierto:



Ejemplo 2 (2/3)

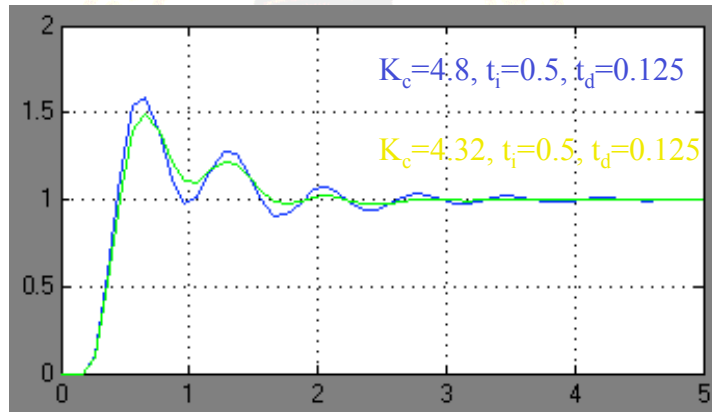
- Tabla de Ziegler-Nichols basada en el comportamiento en bucle cerrado:





Ejemplo 2 (3/3)

- comparativa de ambos controladores:



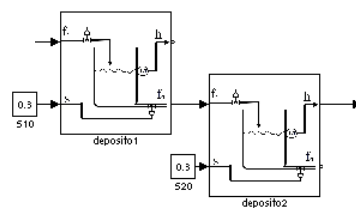
Control de Procesos Industriales

27



Ejercicio CRB

En el sistema de la figura se desea controlar ΔH_2 mediante la entrada ΔF_1 :



Parámetros: $A_1=A_2=1, s_{10}=s_{20}=0.3$
Punto equilibrio: $f_{10}=f_{20}=f_{30}=1, h_{10}=h_{20}=0.5669$

- Diseñar en Simulink una estructura de CRB, usando un PID formado por sus bloques básicos (P, I y D)
- Calcular los valores del PID
- Comprobar la variación de la respuesta ante cambios en los 3 parámetros del PID
- Modificar los parámetros del PID para minimizar la ICE



Control de Procesos Industriales

28