



---

# Control de Procesos Industriales

## 5. Control Regulatorio Básico

por  
Pascual Campoy  
Universidad Politécnica Madrid

1



---

## Control Regulatorio Básico

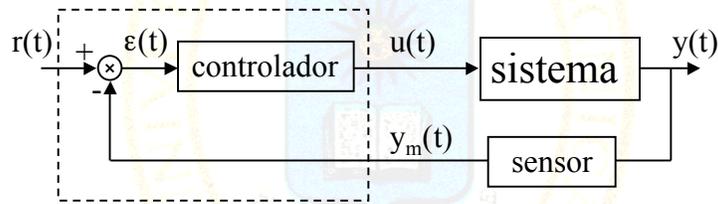
- Estructura básica de control
- Acciones básicas de control
- Tipos de controladores PID
- Ajuste de controladores en sistemas aproximables a primer orden
- Ajuste empírico de controladores en sistemas de orden superior





## Estructura básica de control

### Control por realimentación de la salida



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



## Control Regulatorio Básico

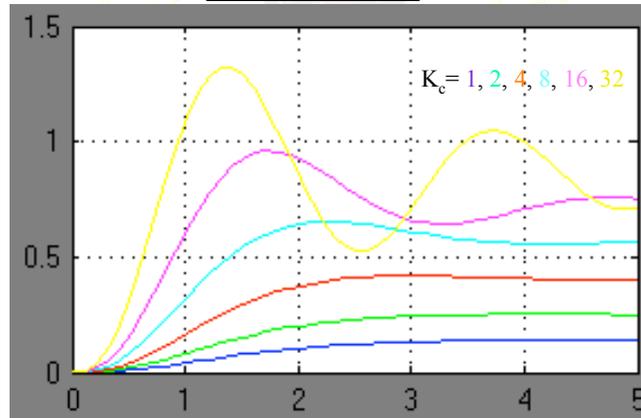
- Estructura básica de control
- Acciones básicas de control
- Tipos de controladores PID
- Ajuste de controladores en sistemas aproximables a primer orden
- Ajuste empírico de controladores en sistemas de orden superior





## Acciones básicas de control: Acción proporcional

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



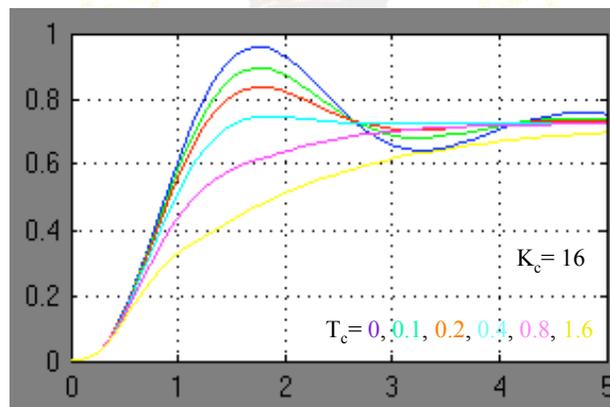
Control de Procesos Industriales

5



## Acciones básicas de control: acción proporcional-derivativa

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



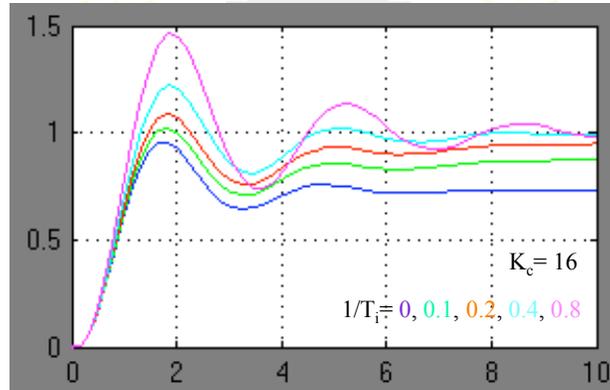
Control de Procesos Industriales

6



## Acciones básicas de control: acción proporcional-integral

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



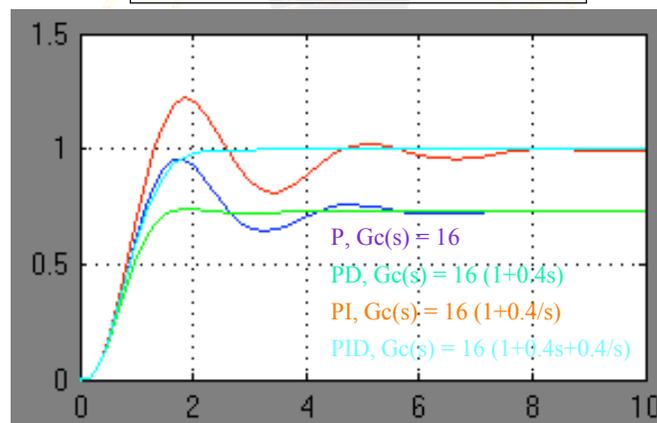
Control de Procesos Industriales

7



## Acciones básicas de control: proporcional-integral-derivativa

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

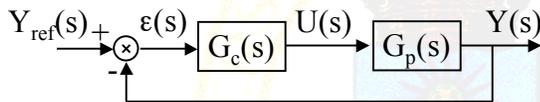


Control de Procesos Industriales

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:

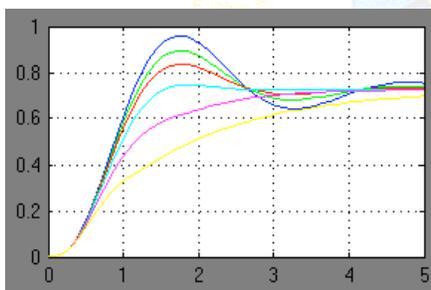
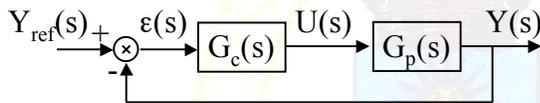
$$\frac{Y(s)}{Y_{ref}(s)} = \frac{K_{cp} \prod_{i=1}^q (s/z_i + 1)}{\prod_{i=1}^n (s/p_i + 1) + K_{cp} \prod_{i=1}^q (s/z_i + 1)}$$

estática si es estable:

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



## Evaluación de un C.R.B.



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



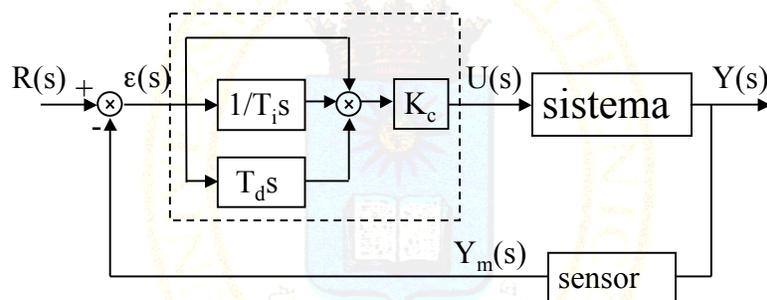


## Control Regulatorio Básico

- 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

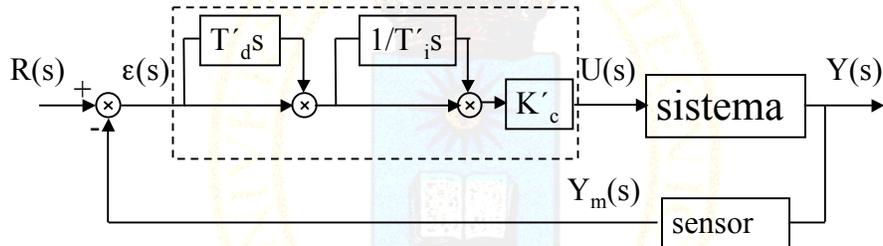


$$U(s) = K_c(1 + 1/T_i s + T_d s) \epsilon(s)$$





## 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  $\gamma$  un parámetro físico del controlador no ajustable, cuyo valor suele ser estar entre 0.05 y 0.1



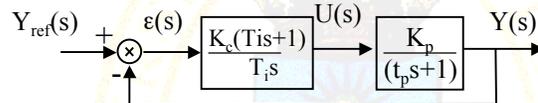
## Control Regulatorio Básico

- 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<sup>er</sup> 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

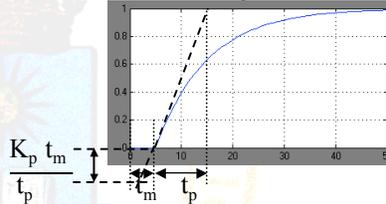
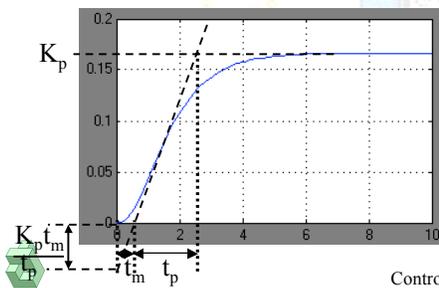
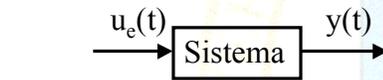
- Estructura básica de control
- Acciones básicas de control
- Tipos de controladores PID
- Ajuste de controladores en sistemas aproximables a 1<sup>er</sup> orden
- Ajuste empírico de controladores en sistemas de orden superior





# Ajuste empírico de PID: Zigler Nichols en bucle abierto

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



Tipo de regulador r	Ganancia $K_c$	$T_i$ Tiempo integral	$T_d$ Tiempo derivativo
P	$\frac{1}{K_p} \frac{t_p}{t_m}$		
PI	$\frac{0,9}{K_p} \frac{t_p}{t_m}$	$3,33 t_m$	
PID	$\frac{1,2}{K_p} \frac{t_p}{t_m}$	$2 t_m$	$0,5 t_m$

rango practico:  $\frac{t_p}{t_m} < 10$

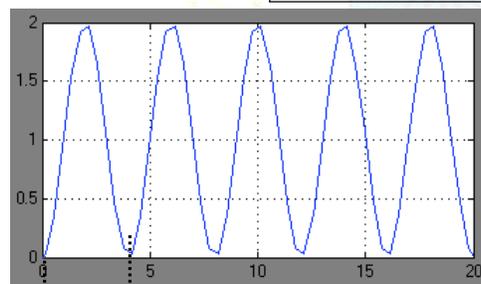
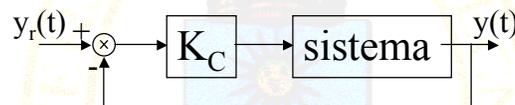
Control de Procesos Industriales

19



# Ajuste empírico de PID: Ziegler-Nichol en bucle cerrado

- Tabla basada en el comportamiento límite en bucle cerrado:



Tipo de regulador	$K_c$ Ganancia	$T_i$ Tiempo integral	$T_d$ Tiempo derivativo
P	$0,5 K_{cr}$		
PI	$0,45 K_{cr}$	$0,83 T_{cr}$	
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 T_{cr}$	$0,125 T_{cr}$



Control de Procesos Industriales

20



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

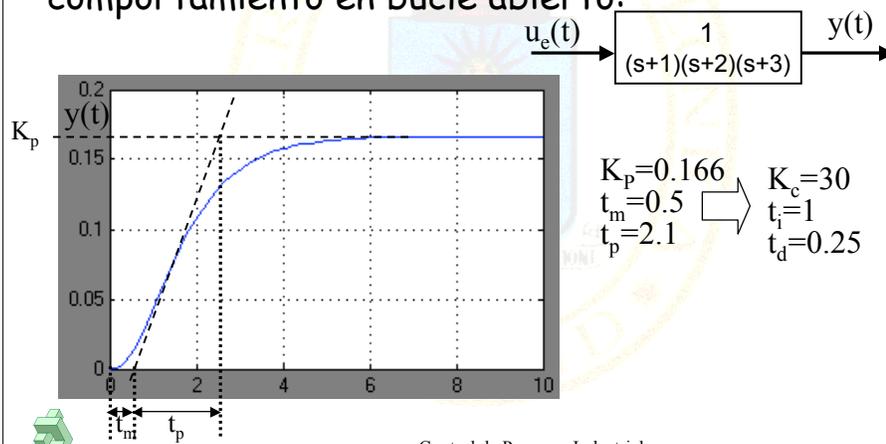
- Sólo existe diferencia en controlador PID
- No está claro el controlador usado por Z-N
- La mayoría de los autores utilizan la versión paralelo o paralelo con filtro
- Los resultados son parecidos, y algo mejor si se aplica controlador en paralelo.

(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)

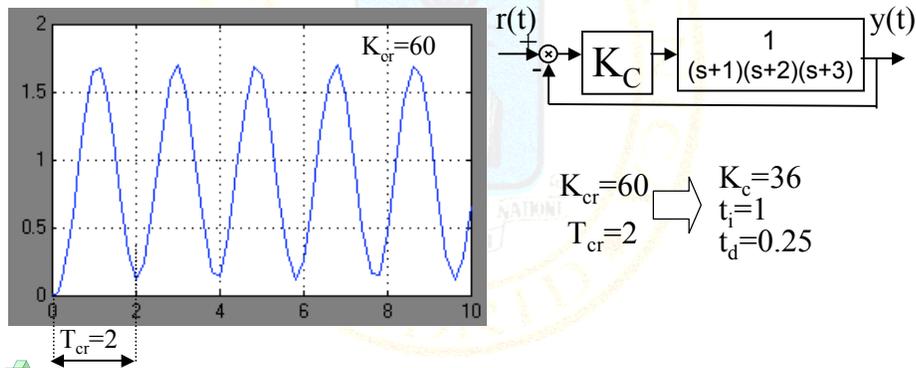
- Tabla de Ziegler-Nichols basada en el comportamiento en bucle abierto:





## Ejemplo 1 (2/3)

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



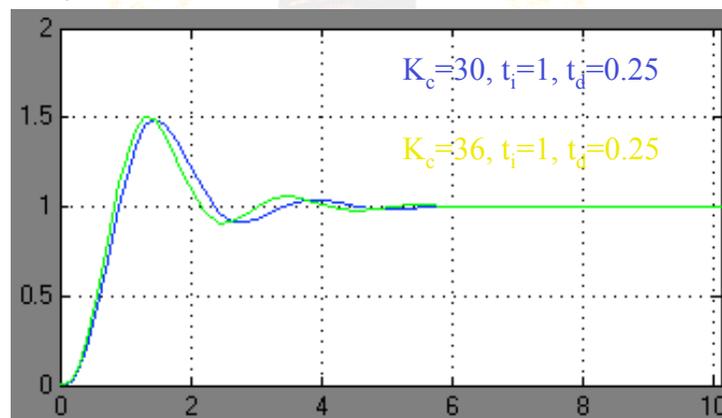
Control de Procesos Industriales

23



## Ejemplo 1 (3/3)

- comparativa de ambos controladores:



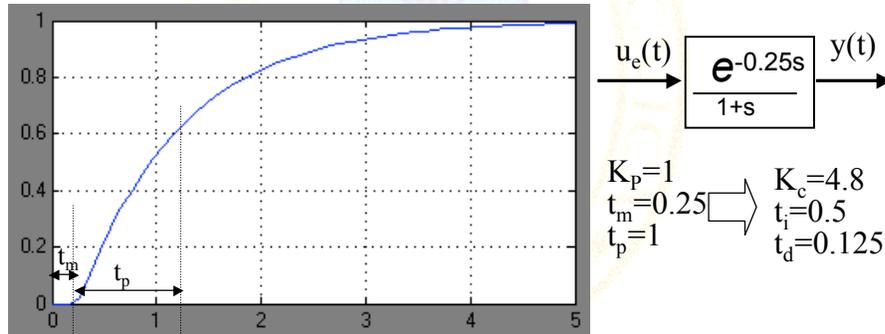
Control de Procesos Industriales

24



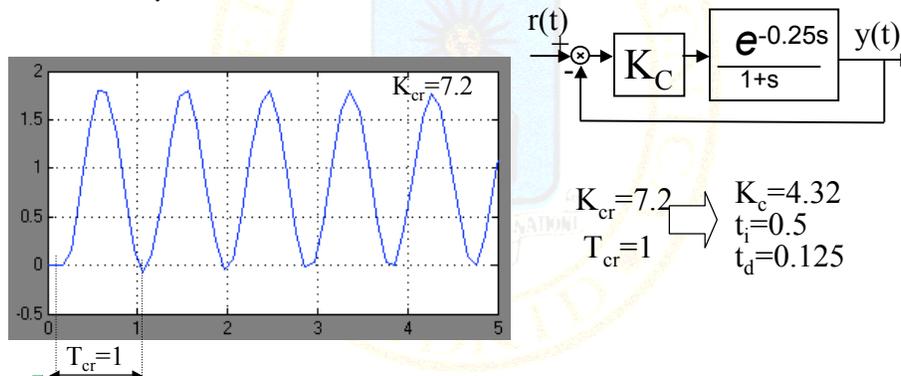
## Ejemplo 2 (1/3)

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



## Ejemplo 2 (2/3)

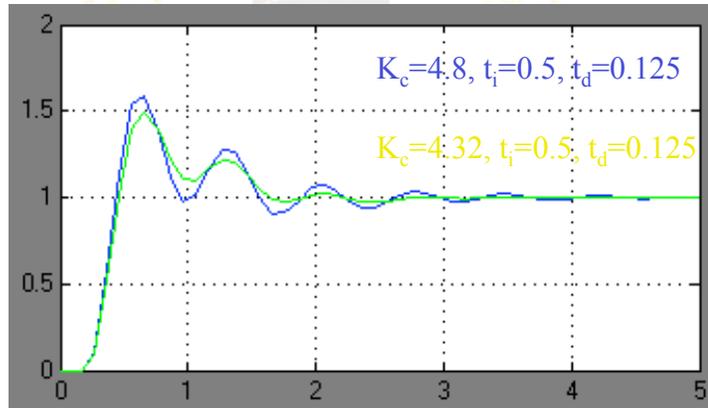
- Tabla de Ziegler-Nichols basada en el comportamiento en bucle cerrado:





## Ejemplo 2 (3/3)

- comparativa de ambos controladores:



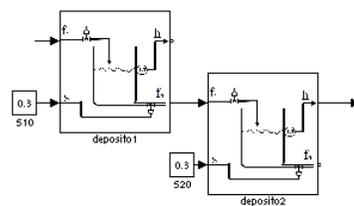
Control de Procesos Industriales

27



## Ejercicio CRB

En el sistema de la figura se desea controlar  $\Delta H_2$  mediante la entrada  $\Delta F_1$ :



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