

5. Control PID Clásico

Parte 1

Panorama:

- Estructura PID
- Ajuste empírico
- Método de oscilación de Ziegler-Nichols
- Métodos basados en la respuesta al escalón (curva de reacción)

Introducción

En este capítulo examinamos una particular estructura de control que es casi universalmente utilizada en la industria. Se trata de la familia de controladores de estructura fija llamada **familia de controladores PID**.

Estos controladores han mostrado ser robustos y extremadamente beneficiosos en el control de muchas aplicaciones de importancia en la industria.

PID significa

- **Proporcional,**
- **Integral**
- **Derivativo.**

Históricamente, ya las primeras estructuras de control usaban las ideas del control PID. Sin embargo, no fue hasta el trabajo de Minorsky de 1922, sobre conducción de barcos,¹ que el control PID cobró verdadera importancia teórica.

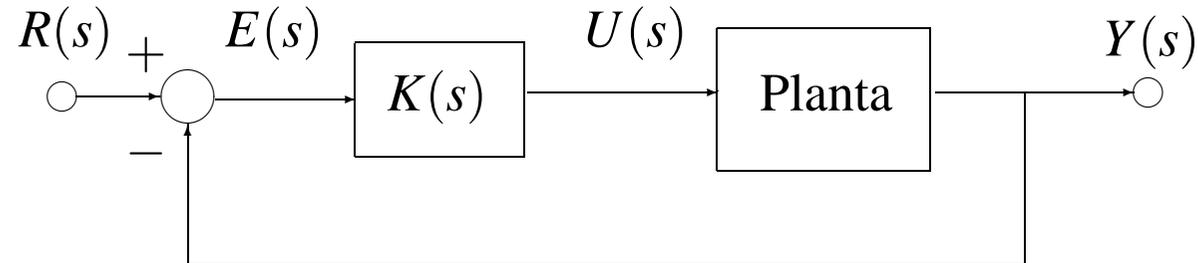
Hoy en día, a pesar de la abundancia de sofisticadas herramientas y métodos avanzados de control, el controlador PID es aún el más ampliamente utilizado en la industria moderna, controlando más del 95 % de los procesos industriales en lazo cerrado.²

¹Minorsky, «Directional stability of automatically steered bodies», *Journal of the American Society of Naval Engineering*, Vol. 34, p. 284, 1922.

²K.J. Åström & T.H. Hägglund, «New tuning methods for PID controllers,» *Proceedings of the 3rd European Control Conference*, p.2456–62.

Estructura PID

Consideramos el lazo básico de control SISO



Las formas estándar de controladores PID:

Proporcional $K_P(s) = K_p$

Proporcional e Integral $K_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_r s} \right)$

Proporcional y Derivativo $K_{PD} = K_p \left(1 + \frac{T_d s}{\tau_d s + 1} \right)$

Proporcional, Integral y Derivativo $K_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_r s} + \frac{T_d s}{\tau_d s + 1} \right)$

Alternativamente, tenemos la **forma serie**

$$(1) \quad K_{\text{serie}}(s) = K_s \left(1 + \frac{I_s}{s} \right) \left(1 + \frac{D_s s}{\gamma_s D_s s + 1} \right),$$

y la **forma paralelo**

$$(2) \quad K_{\text{paralelo}}(s) = K_p + \frac{I_p}{s} + \frac{D_p s}{\gamma_p D_p s + 1}.$$

Ajuste empírico de controladores PID

Debido a su difundido uso en la práctica, presentamos a continuación varios métodos de **ajuste empírico** de controladores PID, basados en mediciones realizadas sobre la planta real. Estos métodos, referidos como **clásicos**, comenzaron a usarse alrededor de 1950.

Hoy en día, es preferible para el diseñador de un PID usar **técnicas basadas en modelo**, como las que describiremos en los Capítulos 6 y 10 del presente curso.

Los métodos clásicos de ajuste que presentaremos son

- El método de oscilación de Ziegler-Nichols
- El método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols
- El método de la curva de reacción de Cohen-Coon

Método de oscilación de Ziegler-Nichols

Este método es válido sólo para plantas estables a lazo abierto. El procedimiento es el siguiente:

1. Aplicar a la planta sólo control proporcional con ganancia K_p pequeña.
2. Aumentar el valor de K_p hasta que el lazo comience a oscilar. La oscilación debe ser lineal y debe detectarse en la salida del controlador ($u(t)$).
3. Registrar la ganancia crítica $K_p = K_c$ y el período de oscilación P_c de $u(t)$, a la salida del controlador.
4. Ajustar los parámetros del controlador PID de acuerdo al Cuadro 1.

	K_p	T_r	T_d
P	$0,50K_c$		
PI	$0,45K_c$	$\frac{P_c}{1,2}$	
PID	$0,60K_c$	$\frac{P_c}{2}$	$\frac{P_c}{8}$

Cuadro 1: Parámetros de controladores PID según el método de oscilación de Ziegler-Nichols

Es importante saber cuál es la estructura (estándar, serie o paralelo) del PID al que se aplica el ajuste propuesto por Ziegler y Nichols. Existe cierta controversia respecto a cuál fue la estructura originalmente usada por Ziegler y Nichols; las reglas dadas aquí se proponen para la estructura estándar.

Desempeño con el método de oscilación de Z-N

Notar que el modelo intrínsecamente obtenido en el experimento es sólo **un punto de la respuesta en frecuencia**, que corresponde a fase -180° y magnitud K_c^{-1} , dado que el diagrama de Nyquist cruza el punto $(-1, 0)$ cuando $K_p = K_c$.

Para analizar el efecto del ajuste de control proporcionado por el método de oscilación de Ziegler-Nichols consideremos una planta general con función transferencia

$$(3) \quad G_0(s) = \frac{k_0 e^{-s\tau_0}}{\gamma_0 s + 1}; \quad \gamma_0 > 0.$$

La Figura 1 muestra la respuesta del lazo cerrado con un controlador PID ajustado mediante el método de oscilación de Ziegler-Nichols para distintos valores de $x = \tau_0/\gamma_0$. El eje de tiempos se representa normalizado en unidades de t/τ_0 .

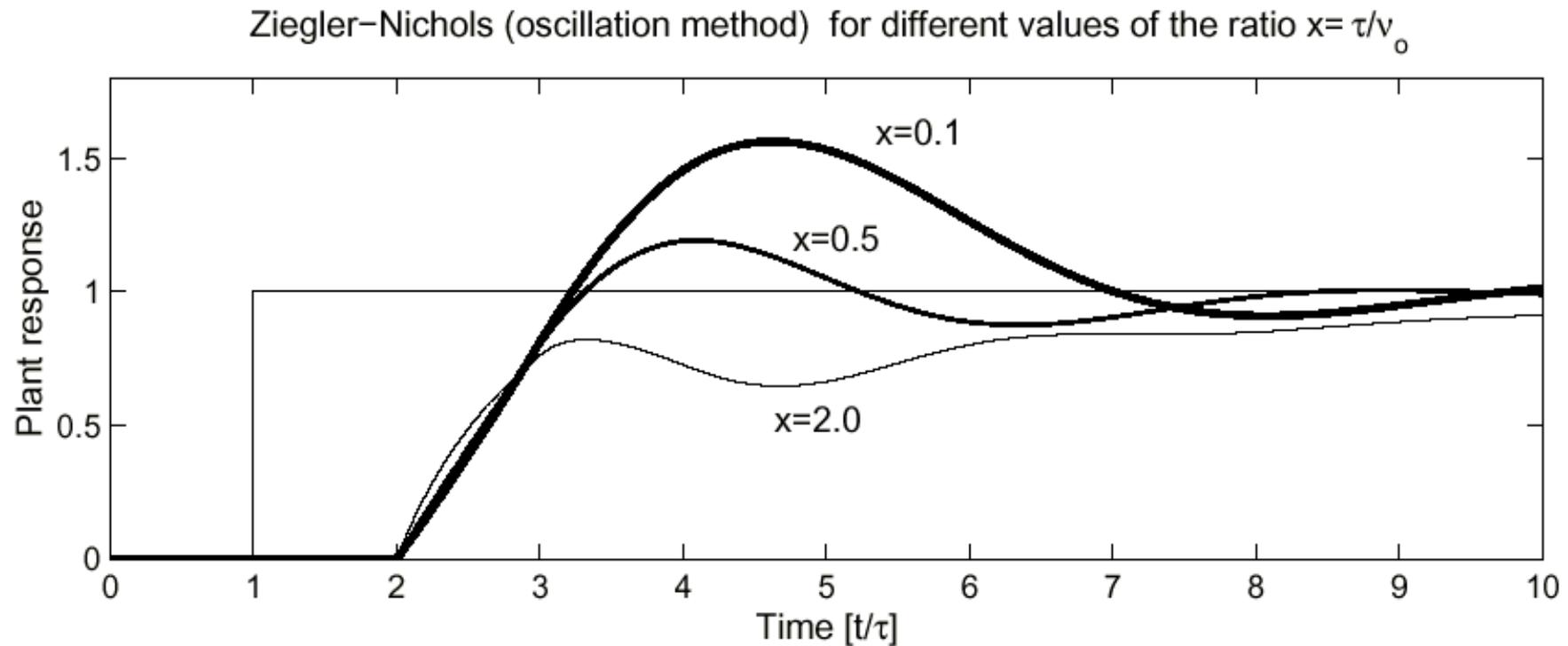


Figura 1: Respuesta a lazo cerrado de la planta (3) con PID ajustado mediante el método de oscilación de Ziegler-Nichols

Vemos que el ajuste es muy sensible al cociente τ_0/γ_0 . Otra limitación es que se requiere forzar en la planta una oscilación que puede ser peligrosa o inconveniente en muchos casos.

Método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols

Muchas plantas en la práctica pueden describirse satisfactoriamente con un modelo de la forma (3). Una versión linealizada cuantitativa de este modelo puede obtenerse mediante un experimento a lazo abierto con el siguiente procedimiento:

1. Llevar manualmente la planta a lazo abierto a un punto de operación normal manipulando $u(t)$. Supongamos que la planta se estabiliza en $y(t) = y_0$ para $u(t) = u_0$.
2. En un instante inicial t_0 aplicar un cambio escalón en la entrada, de u_0 a u_∞ (el salto debe estar entre un 10 a 20% del valor nominal).
3. Registrar la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. La Figura 2 muestra una curva típica.

4. Calcular los parámetros del modelo (3) de las fórmulas

$$(4) \quad k_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}, \quad \tau_0 = t_1 - t_0, \quad \gamma_0 = t_2 - t_1.$$

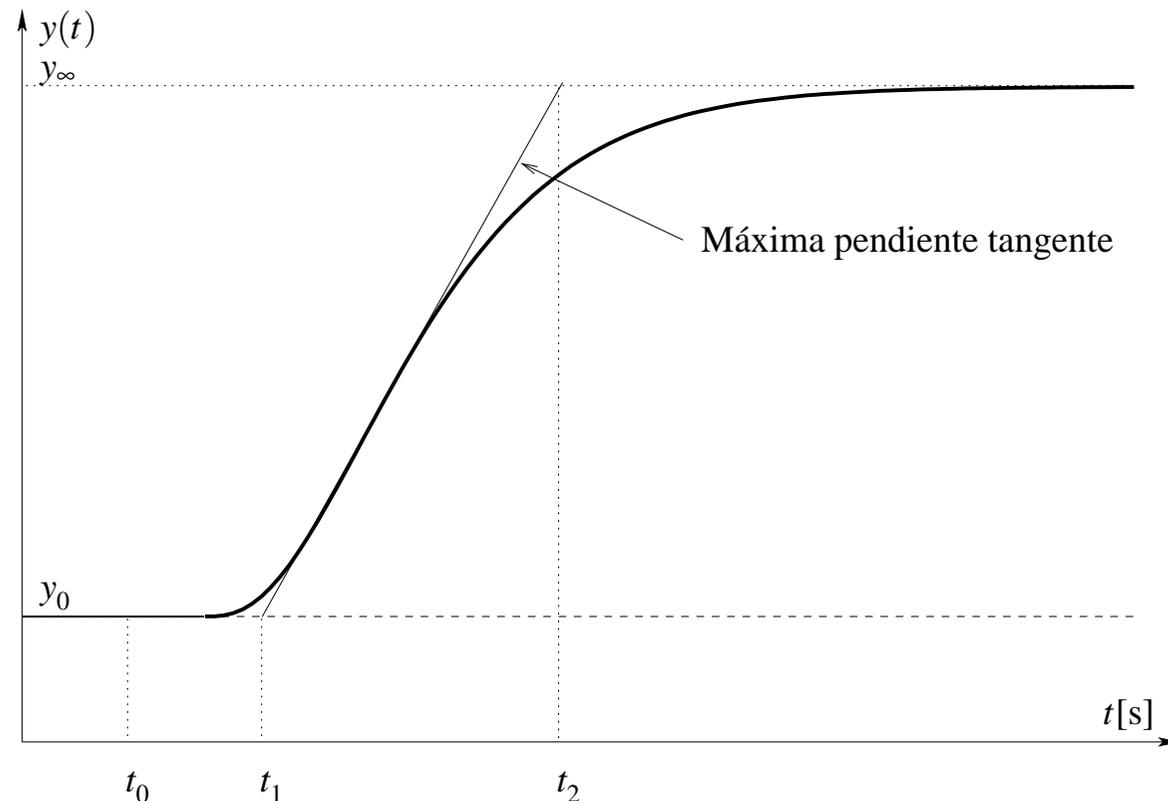


Figura 2: Respuesta al escalón (**curva de reacción**) en lazo abierto de la planta

Los parámetros del controlador PID propuestos por Ziegler y Nichols a partir de la curva de reacción se determinan del Cuadro 2.

	K_p	T_r	T_d
P	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0}$		
PI	$\frac{0,9\gamma_0}{K_0 \tau_0}$	$3\tau_0$	
PID	$\frac{1,2\gamma_0}{K_0 \tau_0}$	$2\tau_0$	$0,5\tau_0$

Cuadro 2: Parámetros de controladores PID según el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols

Desempeño con el método de la CR de Z-N

Consideramos nuevamente la planta genérica (3) para analizar el desempeño obtenido con el ajuste de Ziegler-Nichols a partir de la curva de reacción.

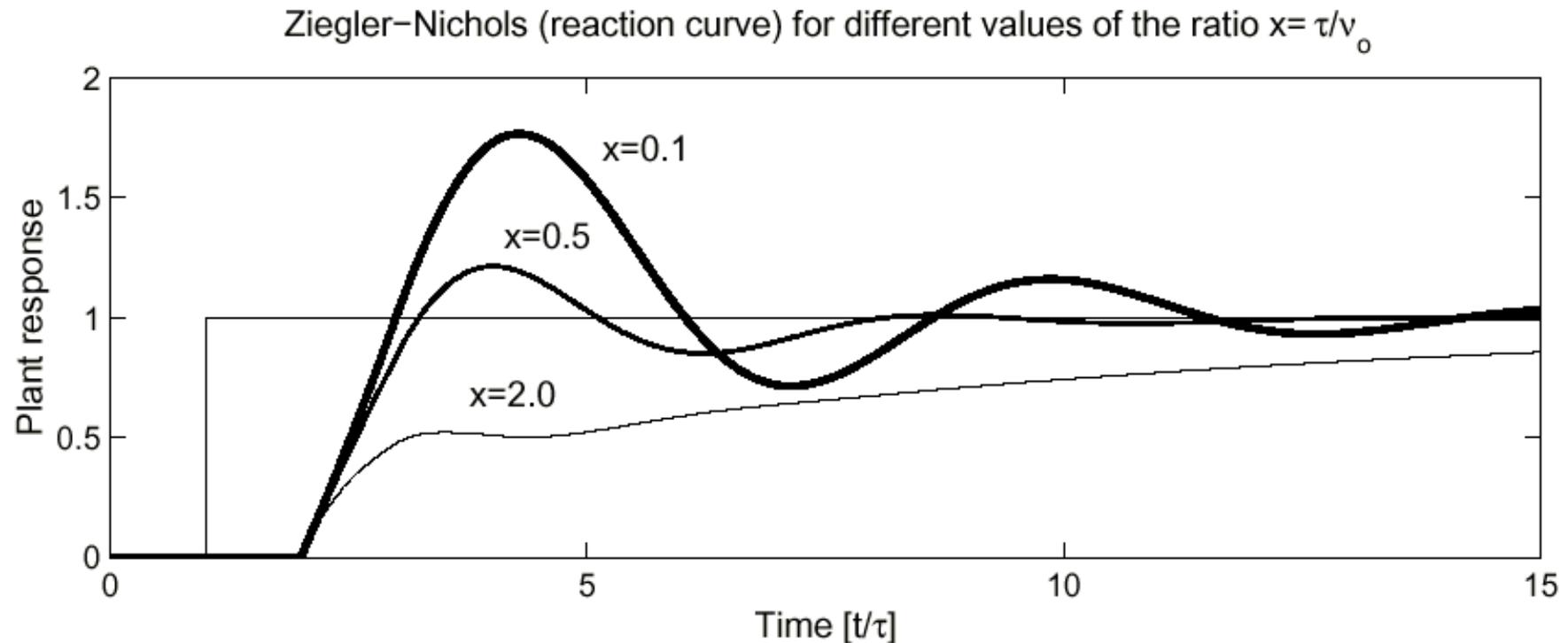


Figura 3: Respuesta a lazo cerrado de la planta (3) con PID ajustado de la curva de reacción vía Ziegler-Nichols

Método de la curva de reacción de Cohen-Coon

La Figura 3 muestra que el ajuste de Ziegler y Nichols para la curva de reacción es muy sensible a variaciones de τ/γ_0 . Cohen y Coon desarrollaron una tabla modificada para mejorar esta limitación usando datos del mismo ensayo.

	K_p	T_r	T_d
P	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(1 + \frac{\tau_0}{3\gamma_0} \right)$		
PI	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(0,9 + \frac{\tau_0}{12\gamma_0} \right)$	$\frac{\tau_0(30\gamma_0 + 3\tau_0)}{9\gamma_0 + 20\tau_0}$	
PID	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(\frac{4}{3} + \frac{\tau_0}{4\gamma_0} \right)$	$\frac{\tau_0(32\gamma_0 + 6\tau_0)}{13\gamma_0 + 8\tau_0}$	$\frac{4\tau_0\gamma_0}{11\gamma_0 + 2\tau_0}$

Cuadro 3: Parámetros de controladores PID según el método de la curva de reacción de Cohen-Coon

Desempeño con el método de la CR de C-C

La Figura 4 muestra la respuesta de lazo cerrado con el ajuste Cohen-Coon. Aunque aún es sensible a $x = \tau/\gamma_0$, la respuesta es mucho más homogénea que con el ajuste Ziegler-Nichols.

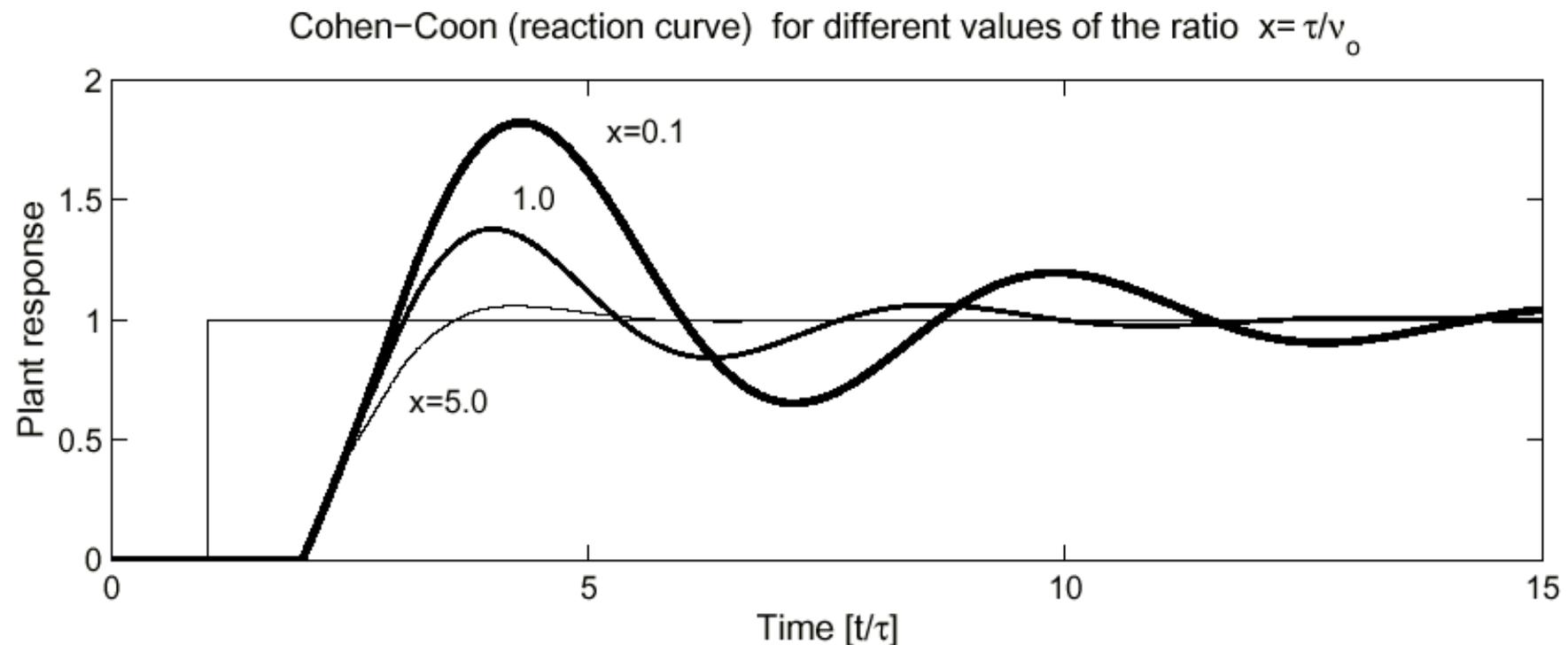


Figura 4: Respuesta a lazo cerrado de la planta (3) con PID ajustado de la curva de reacción vía Cohen-Coon

Conclusiones

- Los controladores PID se usan ampliamente en control industrial.
- Desde una perspectiva moderna, un controlador PID es simplemente **un controlador de segundo orden con integración**. Históricamente, sin embargo, los controladores PID se ajustaban en términos de sus componentes **P**, **I** y **D**.
- La estructura PID ha mostrado empíricamente ofrecer suficiente flexibilidad para dar excelentes resultados en muchas aplicaciones.

- El término básico en el controlador PID es el proporcional **P**, que origina una actuación de control correctiva proporcional al error.
- El término integral **I** brinda una corrección proporcional a la integral del error. Esta acción tiene la ventaja de asegurar que en última instancia se aplicará suficiente acción de control para reducir el error de regulación a cero. Sin embargo, la acción integral también tiene un efecto desestabilizador debido al corrimiento de fase agregado.
- El término derivativo **D** da propiedades predictivas a la actuación, generando una acción de control proporcional a la velocidad de cambio del error. Tiende a dar más estabilidad al sistema pero suele generar grandes valores en la señal de control.

- Varios métodos empíricos pueden usarse para determinar los parámetros de un PID para una dada aplicación. Sin embargo, **el ajuste obtenido debe tomarse como un primer paso** en el proceso de diseño.
- Debe prestarse atención al particular tipo de estructura de PID disponible (por ejemplo, estándar, serie o paralelo).
- En capítulos posteriores veremos métodos sistemáticos para ajustar controladores PID.