

Capítulo 6

CONTROLADOR PID

 <https://doi.org/10.25100/peu.1416.cap6>

La función de la realimentación y del controlador es modificar las características de desempeño del sistema al cerrar el lazo, y de esa manera cumplir con las especificaciones deseadas de funcionamiento.

Objetivos y resultados de aprendizaje

Objetivo general

Exponer las acciones de control PID usadas en los sistemas realimentados.

Objetivos específicos

- Describir las acciones de control PID usadas en los sistemas realimentados y el efecto en el comportamiento estático y dinámico de los SAC.
- Ajustar los parámetros del controlador PID usando las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols.

Resultados de aprendizaje

Al finalizar, el estudiante:

Conoce las acciones P, I, D, PI, PD, PID para el control de SAC.

Aplica técnicas de sintonía de los parámetros del PID para cambiar el desempeño dinámico de SAC.

- Conoce los efectos de cambio manual a automático y sobreembalamiento para el control de SAC.
- Conoce la arquitectura PID del estándar ISA para el control de SAC.

Marco Teórico

El controlador de dos posiciones o controlador "on-off", es el más empleado. Después, a nivel industrial le sigue el controlador PID, por su sencillez estructural, facilidad de implementación y de ajuste; adicionalmente, ha sido comprobado durante muchos años en la industria, probando de lejos sus virtudes. En esta sección se revisan las estrategias P, I y D con sus variaciones y se estudian las técnicas clásicas de sintonía de controladores PID.

Controlador PID

Su estructura general es la composición de acciones proporcional, integral y derivativa, en el lazo directo. Existe la versión paralela (también conocida como versión de libro por su simplicidad para explicar el control) hasta la versión del estándar ISA.

A continuación se estudia cada una de las representaciones.

Acción P. La señal de control es proporcional a la señal de error, con

$$u(t) = K_p e(t); \quad \frac{U_D(s)}{E(s)} = K_p$$

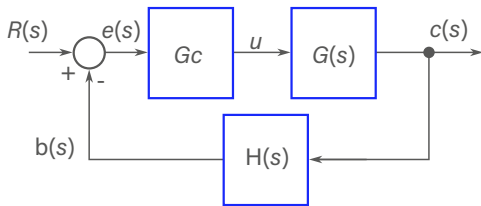


Figura 6.1: Representación BTR con controlador G_c .

En sistemas estables sin ceros, permite disminuir el error permanente y mejora la velocidad de respuesta.

Nota 37. No confundir K_p con la constante de error de posición K_p . ▲

Acción I. La señal de control es proporcional a la integral de la señal de error, con

$$u(t) = K_i \int e(t) dt; \quad \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

donde K_i es conocida como la velocidad de restablecimiento o constante integral.

Si se observa la Tabla 5.1, y se considera en el análisis que la acción integral adiciona un polo en el lazo directo, es claro que ante una señal entrada tipo escalón, la acción integral pone error de estado permanente cero; sin embargo, genera respuestas transitorias más lentas y deteriora la estabilidad relativa del sistema.

Acción D. La señal de control es proporcional a la derivada de la señal de error,

$$u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt}; \quad \frac{U_D(s)}{E(s)} = K_D s$$

Por ser la derivada de una señal, la acción de control es muy sensible a cambios en el error, por lo que también se le conoce como acción anticipativa; sin embargo, cambios bruscos en el error producen valores muy elevados en la señal de control, lo que puede llevar el actuador a zona de saturación e incluso a inestabilidad del sistema. Normalmente, el valor de K_D se ajusta en rangos muy pequeños. Para efectos de implementación, la acción derivativa se reemplaza por lo que se denomina como la **pseudoderivada**, esto es,

$$\frac{U_D(s)}{E(s)} = \frac{T_D s}{\eta T_D s + 1} \quad (6.1)$$

donde el valor de la constante del filtro $\eta < 1$ con valores típicos entre 0,05 y 0,1.

Esta acción de control actúa como derivativa solo a bajas frecuencias; a altas frecuencias la ganancia del filtro queda limitada por el valor K_D/η lográndose la limitación esperada.

Acción PI. Combina las acciones de control proporcional e integral, con lo que aprovecha las características de ambos controles, mejorando precisión en estado permanente y velocidad de respuesta,

$$u(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) e(s)$$

Una variante de la acción PI es

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

donde

$$K_c = K_p, \quad T_i = \frac{K_c}{K_i}$$

Acción PD. Si el sistema es tipo 1 o mayor, no requiere de acción integral, pero si el sistema presenta oscilaciones permanentes de pequeña señal en la salida, la acción de control bien ajustada puede contribuir a su atenuación. Combina las acciones de control P y D,

$$u(s) = (K_p + sK_D) e(s)$$

Es también muy útil para sintonizar sistemas con amortiguamiento pobre; en general la acción derivativa tiene un efecto estabilizador en algunos sistemas, aunque su implementación pura no es práctica por lo que se deben considerar variaciones de acción deriva-

tiva, como se vio en el caso del controlador derivativo puro.

Una variante de la acción PD es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c (1 + sT_d)$$

donde

$$K_c = K_p, T_d = \frac{K_D}{K_c}$$

Acción PID.

$$u(t) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s \right) e(t) \quad (6.2)$$

Esta acción combina las acciones proporcional, integral y derivativa, buscando sacar provecho a sus características de disminuir error permanente, mejorar velocidad de respuesta y anticipar variaciones de la señal de control. Tomando las variantes anteriormente presentadas para el PI y el PD, se tiene una variante del PID en la forma

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + sT_d + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (6.3)$$

Las ecuaciones 6.2 y 6.3 para el controlador PID son muy conocidas, pero son imprácticas –porque, por un lado, el término derivativo hace que el control

crezca sin límite conforme la frecuencia se incrementa y, por otro lado, la acción integral tiene problemas de saturación-. A continuación se presentan variaciones del PID que permiten resolver esas limitaciones.

Realizaciones PID no interactiva e interactiva. Las funciones que implementan las ecuaciones 6.2 y 6.3 se pueden realizar en una estructura conocida como **PID paralela**, como se ilustra en la Figura 6.2. También es conocida como acción **no interactiva** debido a que las acciones de control integral y derivativa son independientes, a pesar de que en la Figura 6.2b la ganancia K_c afecta las tres acciones (proporcional, integral y derivativa).

Estructuras de acciones PID. Existen variaciones a la implementación del algoritmo PID que dan lugar a las conocidas estructuras PI-D y I-PD, como se muestra en la Figura 6.3.

Las funciones de transferencia de estas estructuras son iguales, pero los ajustes de los parámetros cambian.

Estas estructuras son todas estables, pero la respuesta del sistema cambia en función de los parámetros ajustados. En este caso, la modificación de los parámetros o constantes de tiempo integral (T_i) y derivativa (T_d), afectan las constantes de tiempo integral (K_i) y derivativa (K_D) y viceversa; por lo que se conocen como acciones o algoritmos iterativos de control PID.

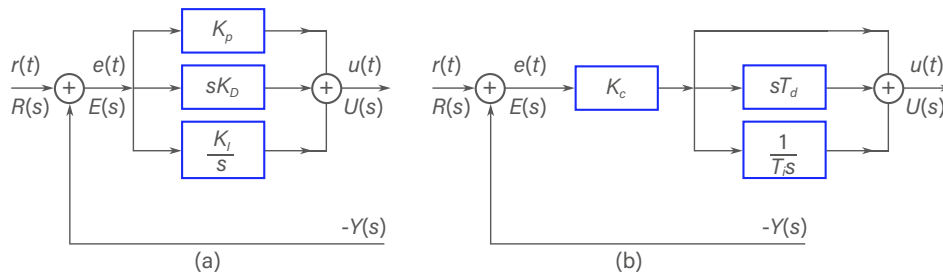


Figura 6.2: Realizaciones de controladores PID.

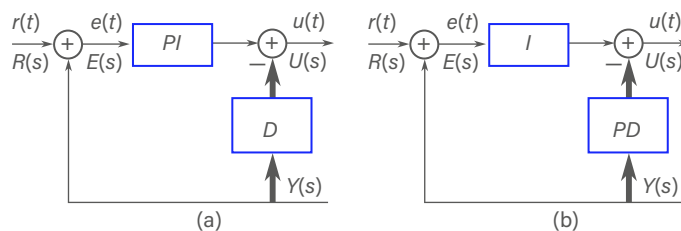


Figura 6.3: Estructuras de controladores PID.

Acción PI-D. También conocida como acción PI-PD; combina la acción PI con un filtro de retraso de fase; esto se hace porque la acción derivativa sola es un sistema no causal –difícil de implementar con circuitería analógica–.

Su estructura es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{T_D s + 1}{T_D' s + 1}$$

o

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left(\frac{1 + sT_i}{sT_i} \right) \left(\frac{T_D s + 1}{T_D' s + 1} \right)$$

La constante de tiempo derivativa T_D' normalmente se ajusta a la décima parte de la constante T_D .

Acción antiembalamiento. Las acciones de control anteriores ilustran los conceptos fundamentales; sin embargo, existen problemas para su implementación que son consideradas en la estructura PID ISA.

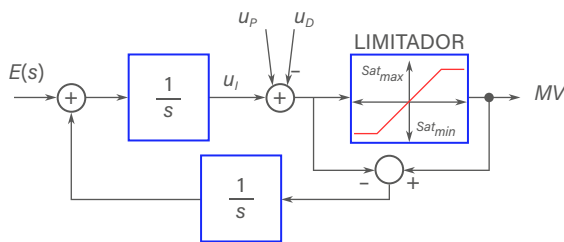


Figura 6.4: Control antiembalamiento.

La primera de ellas tiene que ver con la saturación del actuador, que normalmente puede ser ocasionada por la acción integral; para ello se considera la acción conocida como antiembalamiento (“anti-windup”) de la acción integral; actúa directamente recalculando la parte de la acción integral como se muestra en la Figura 6.4.

T_i es la constante de tiempo que determina cuánta rapidez se resetea la acción integral; U_i es la señal debida a la acción integral; U_p es la señal de control aportada por la acción proporcional; U_D es el aporte en señal de control de la acción derivativa; MV es la variable manipulada que será aplicada al dispositivo de actuación.

PID ISA

El otro problema planteado anteriormente para la implementación de los controladores PID está asociado a la imposibilidad de implementar la acción derivativa pura, como se menciona en los párrafos anteriores.

Filtro derivativo. La acción derivativa pura tiene dos problemas de implementación; el primero es que por su composición es en sí mismo un sistema causal y, por otra parte, este sistema es muy sensible y amplifica el ruido en la medición.

Para evitar esto se le adiciona un filtro de primer orden con constante de tiempo

$$T_D' = T_D/N$$

por lo que la acción de control derivativa ahora es

$$u_D = \frac{sT_D}{1 + s\frac{T_D}{N}} E(s)$$

Control sin saltos. Todo esquema de control automático deberá conservar la opción de control y ajuste manual (control suave) para evitar los saltos en la transición (“bumpless”). Una práctica común en esquemas de control antiguos era tener un solo controlador para diferentes variables de proceso; en las transiciones de controladores se observaban saltos indeseables de la señal de control. Actualmente, el fenómeno se presenta cuando se realiza la transición de un controlador del modo manual a automático, el cual preserva la historia de la señal de control a través de un esquema de seguimiento, como se ilustra en la Figura 6.5, correspondiente a la estructura ISA –control manual (U_M) y automático (U_A)–.

Estructura PID ISA. La estructura completa del PID ISA se muestra en la Figura 6.5, donde PV es la variable de proceso (o medida, corresponde a $B(s)$ en la BTR), SP es la referencia (o “Set Point”), $SP_M = R(s)$ es la referencia manual, $A_b(s)$ es la compensación manual (bias) en la señal de control para las acciones P o PD , y los bloques “directa” (acción de control aditiva: directa +) e “inversa” (acción de control sustractiva: inversa –); además, la estructura del PID ISA de la Figura 6.5 incluye un seguimiento de acción integral para evitar el *windup*.

Finalmente, la función acción de control PID en estructura estándar o forma ISA (Ramírez, 2015) se presenta en la ecuación 6.4.

$$U(s) = \pm \left[K_p \left(\alpha R(s) - B(s) \right) + \frac{1}{T_I s} E(s) + \frac{T_D s}{1 + \frac{T_D}{N} s} (\beta R(s) + B(s)) \right] - A_b(s) \quad (6.4)$$

con β y α factores de peso o escalamiento adicionales para la señal de referencia.

Reglas de Ziegler-Nichols

Las técnicas de Ziegler-Nichols (ZN) (Van de Vegte, 1994) se basan en lo que se conoce como la firma (*signature*) del sistema; esto es, en el registro de la forma de la respuesta entre una entrada tipo escalón unitario.

Los autores ZN desarrollaron dos procedimientos para el ajuste de los controladores usando como criterio de sintonía la minimización del error absoluto integrado (IAE: *integrated absolute error*)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (6.5)$$

Primer método. Consiste en aplicar al sistema (desde el punto de operación; esto es, para pequeña señal, en lazo abierto) un escalón unitario y registrar (dibujar, graficar) la forma de la respuesta para la salida de la forma que se muestra en la Figura 6.6 (con t_d el tiempo de retardo y m la pendiente de la tangente en el punto de inflexión).

Se configuran los parámetros del control para cada caso, como se muestra en la Tabla 6.1.

Segundo método. Consiste en aplicar al sistema realimentado una ganancia proporcional hasta encontrar el valor de K_u que lleve al límite de estabilidad el sistema; se toma nota del valor de K_u y del periodo del sistema τ_u (ver Figura 6.7) y se ajustan los parámetros de los controladores según la Tabla 6.2. Solo es posible aplicarlo si la planta o proceso en red cerrado permite llevarla al límite de estabilidad.

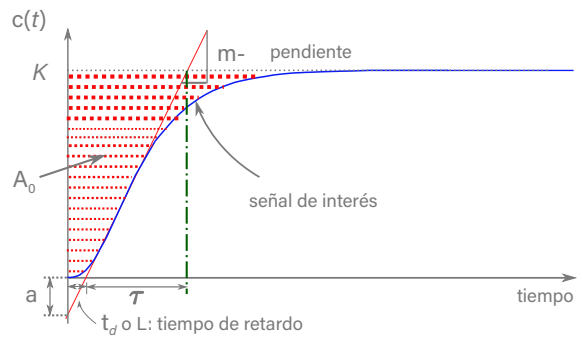


Figura 6.6: Respuesta al escalón.

Para plantas muy sensibles o que resulte peligroso llevarlas a esta condición, si se conoce el modelo de la planta en lazo abierto, es recomendable realizar el experimento en simulación para el cálculo de los parámetros del controlador.

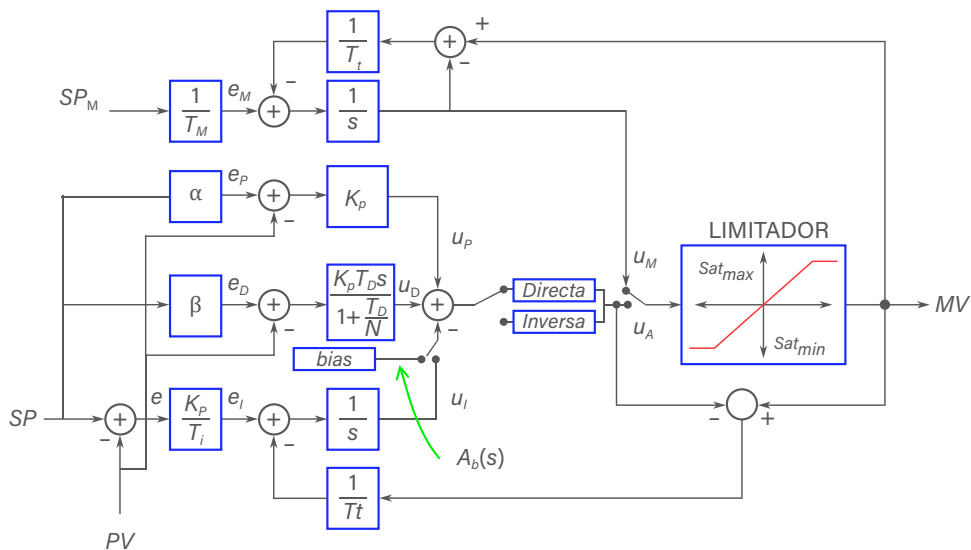


Figura 6.5: Estructura de control PID ISA. Fuente: Adaptado de Ramírez (2015).

Tabla 6.1: Valores para ajuste de controladores PID por el primer método de Ziegler-Nichols.

Control P	$K_P = \frac{1}{T_d m}$		
Control PI	$K_P = \frac{0.9}{T_d m}$	$T_I = 3.3 T_d$	
Control PID	$K_P = \frac{1.2}{T_d m}$	$T_I = 2 T_d$	$T_D = 0.5 T_d$

Tabla 6.2: Valores para ajuste de controladores PID por el segundo método de Ziegler-Nichols.

Control P	$K_P = \frac{0.5}{K_u}$		
Control PI	$K_P = \frac{0.45}{K_u}$	$T_I = 0.83 T_u$	
Control PID	$K_P = \frac{0.6}{K_u}$	$T_I = 0.5 T_u$	$T_D = 0.125 T_u$

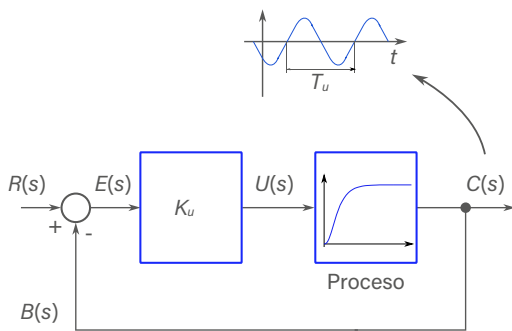


Figura 6.7: Segundo método de Ziegler-Nichols.

Procedimiento

Encienda su aplicación, usted puede trabajar con una planta real de forma presencial o remota, o con una planta virtual local o una planta virtual remota (en la Raspberry), el profesor le indicará la planta que puede trabajar.

Puesta en marcha

Para cualquiera de las plataformas de experimentación que use, debe tener encendida y operando su planta o proceso en el punto deseado de trabajo, inicialmente en lazo abierto.

Materiales y equipos

En la Tabla 6.3 se listan los elementos necesarios para adelantar la experimentación.

Nota 38. Asegure que su planta es estable, si no lo es proceda a estabilizarla.▲

Tabla 6.3: Materiales y equipos.

Hardware			
Cantidad	Nombre	Marca / Modelo	Especificaciones
1	PC	Intel / AMD	Procesador: para trabajar con MATLAB® local: Intel I5 o Ryzen 5, para MATLAB® online: Intel I3 o Ryzen 3. Memoria RAM: 8 GB. Espacio en disco duro: 20 GB.
1	Microcomputador	Raspberry	Pi4 instalada remotamente en el laboratorio de automática.
1	Servomecanismo	Feedback® MS150	Motor DC con tacómetro analógico, para prácticas de control de servo- mecanismos.
Software			
1	Máquina virtual	Virtual Box	Configuración básica: Memoria RAM: 1.5 GB. Disco duro: 10 GB.
1	Software	WinSCP 1.5	Envío y recepción de archivos, má- quina virtual y máquina física.
1	Software	MATLAB®	Versión 2020b.
1	Software	SimulationServer.jar	v1.0. Requiere Pi OS (física o virtual).

Una vez cumplidas estas condiciones, proceda según las instrucciones:

- Registre el valor de la ganancia actual de su planta; para ello debe conocer el valor de la señal que está aplicando a la entrada y el valor de la señal de salida en estado estable.
- Si conoce el rango de trabajo para su señal de entrada y salida, ingrese un escalón a la entrada de la planta, de forma que su salida no supere el 10 % de su valor nominal. Si no lo conoce, intente con un valor pequeño de su entrada, por ejemplo $+1V$. Repita el mismo procedimiento al contrario, llevando la entrada al valor nominal, luego aplique un escalón negativo y posteriormente (después de que la planta esté estable) regrese al valor nominal. (ver Figura 6.8).

Siempre registre sus datos, puede ser en un archivo tipo texto

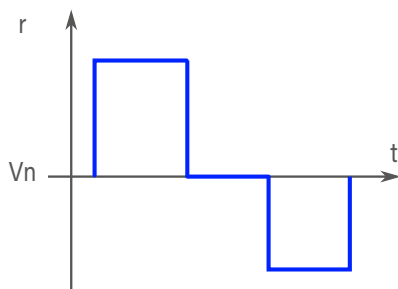


Figura 6.8: Entrada de prueba.

Ajuste de control PID por Ziegler-Nichols

Parte 1.

- A partir de los datos de proceso obtenidos por curva de reacción, implemente los controles P,

PI y PID usando el primer método de Ziegler-Nichols. Tome datos de forma ordenada y registre la señal de control $u(t)$ y la salida del sistema $c(t)$.

- Usando una herramienta de simulación como MATLAB o Simulink, u otra, implemente la función de transferencia de la planta y el controlador PID.
- Analice el desempeño de su sistema y reporte los resultados del análisis.
- Realice los ajustes necesarios al controlador para tener el desempeño deseado.
- Implemente el controlador para su proceso y verifique el desempeño.
- Analice y ajuste si es necesario.
- Realice el reporte de los experimentos.

Parte 2.

Realice el experimento anterior con los datos del PID diseñado, pero ahora implementando los mismos parámetros del controlador en una estructura PI-D. Analice y reporte.

Informe

Elabore su reporte donde, de forma estructurada, organizada y profesional, informe:

1. Resultados de la puesta en marcha.
2. Resultados del ajuste del controlador PID por Ziegler-Nichols.
3. Resultados de la implementación en el controlador PI-D.