

Taller 5: Controlador PID Analógico

5.1 Objetivos

- Aplicar los conocimientos presentados durante las sesiones de ACD.
- Analizar los componentes básicos de un controlador PID.

5.2 Antecedentes

El controlador PID es uno de los tipos más comunes de controladores utilizados en sistemas de control automático. Este tipo de controlador es ampliamente utilizado en una variedad de aplicaciones, desde sistemas industriales hasta control de procesos y robótica. Su popularidad radica en su capacidad para proporcionar un control preciso y estable sobre una amplia gama de sistemas dinámicos.

El controlador PID se basa en tres componentes clave: proporcional, integral y derivativo.

- El componente proporcional (P) ajusta la salida del controlador proporcionalmente al error actual. Es decir, cuanto mayor sea el error entre la referencia y la salida real, mayor será la señal de control generada por el componente proporcional.
- El componente integral (I) toma en cuenta la acumulación de errores pasados a lo largo del tiempo. Esto significa que el componente integral actúa para eliminar el error acumulado, incluso si el error actual es pequeño pero persistente durante un período prolongado.
- El componente derivativo (D) considera la tasa de cambio del error. Proporciona una señal de control basada en la rapidez con la que el error está cambiando. Esto permite al controlador anticipar cambios en el sistema y reaccionar antes de que ocurran.

En conjunto, estos tres componentes trabajan para proporcionar un control robusto y estable sobre el sistema. El controlador PID se ajusta mediante la selección de tres parámetros: K_p (ganancia proporcional), K_i (ganancia integral) y K_d (ganancia derivativa), los cuales determinan cómo el controlador responde a los errores presentes, pasados y futuros.

Componente	Acción principal	Efecto positivo	Efecto negativo (Valor muy alto)
P (Proporcional)	Proporcional al error actual	- Mejora la velocidad de respuesta	- Puede causar oscilaciones - Error en estado estacionario (undershoot)
I (Integral)	Acumula el error en el tiempo	- Elimina el error de estado estacionario	- Puede causar sobrepasos (overshoot) - Oscilaciones
D (Derivativa)	Tasa de cambio del error	- Mejora la estabilidad - Amortigua oscilaciones	- Puede amplificar el ruido - Inestabilidad

El controlador PID es una herramienta poderosa y versátil en el campo de la ingeniería de control, ya que permite controlar una amplia variedad de sistemas dinámicos de manera efectiva, proporcionando precisión, estabilidad y capacidad de respuesta.

La función de transferencia que describe la respuesta de un controlador PID, es la siguiente:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

 Para mayor información acerca de los controladores PID, refiérase al apéndice disponible en el siguiente enlace [☞](#).

5.3 Desarrollo

En esta práctica, se utilizará Simulink para diseñar un controlador que regule el voltaje de un capacitor en un circuito RLC en serie, como se muestra en la figura 5.1. El objetivo es mantener el voltaje del capacitor en un valor deseado, a pesar de las variaciones en las condiciones del circuito, como cambios en la carga conectadas al circuito.

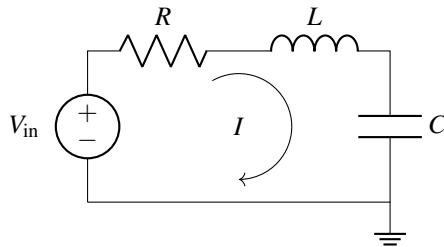


Figure 5.1: Circuito RLC en serie

Ingrese a **MATLAB** y declare las siguientes variables en la ventana de comandos. Esto define los parámetros necesarios para describir un circuito RLC serie.

- Resistencia: 5Ω
- Inductor: 100 mH
- Capacitor: $220 \mu\text{F}$

```
R = 5;
L = 0.1;
Cap = 220e-6;
```

Es importante recordar que la función de transferencia para un circuito RLC está definida por la expresión 5.1. Reemplazando los parámetros establecidos anteriormente para R,L y C, se obtiene la expresión final del comportamiento del circuito RLC, la cual se muestra en la ecuación 5.2

$$\frac{V_c(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (5.1)$$

$$\frac{V_c(s)}{V_{in}(s)} = \frac{4.5455e4}{s^2 + 50s + 4.5455e4} \quad (5.2)$$

Ingrese a **simulink** e inserte la expresión anterior en un bloque de función de transferencia, con una entrada escalón con magnitud 5, la cual se activará a los 10 ms de inicializada la simulación. El tiempo total de simulación será de 250 ms. Con esto se obtiene la respuesta al escalón del proceso a lazo abierto, mostrado en la figura 5.2.

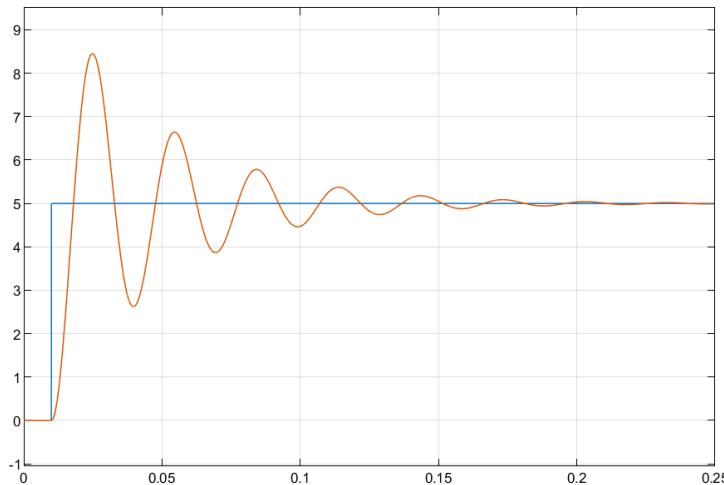


Figure 5.2: Respuesta del circuito RLC a lazo abierto

Proporcional

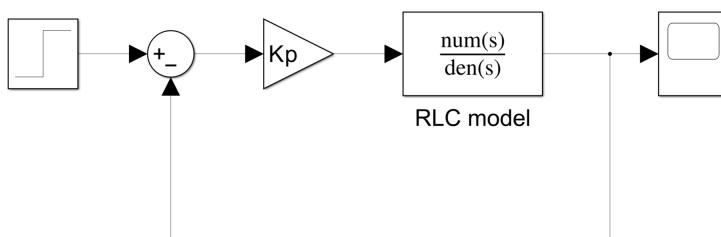


Figure 5.3: Sistema de control a lazo cerrado para el circuito RLC

Complete el diagrama cerrando el lazo de control, con un amplificador de ganancia con valor K_p , como se muestra en la figura 5.3. La ganancia K_p deberá ser declarada como variable en la ventana de comandos.

`Kp=1;`

Recuerde que el tiempo de simulación deberá ser de 250ms, debido a las características del circuito RLC. Con respecto a la señal escalón usada anteriormente, ahora se convierte en

la referencia, que de igual forma será un escalón de magnitud 5, con activación en el instante 10ms de inicializada la simulación. La respuesta deberá ser la siguiente:

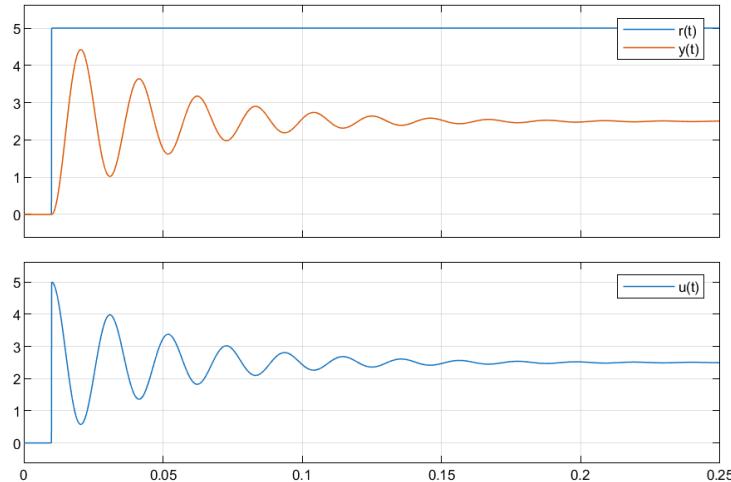


Figure 5.4: Respuesta del sistema a lazo cerrado

Ejercicio 5.1 Nótese que a pesar de que la referencia esté fijada en un valor de 5, la respuesta del sistema se estabiliza en un valor de 2.5, lo que indicaría que la ganancia está por debajo del valor requerido. Aumentar la ganancia podría ser una solución, sin embargo, esto puede ocasionar la desestabilización del sistema a lazo cerrado. Experimente con diferentes valores de K_p entre 1 y 100, comente los resultados. ■

Proporcional-Integral

Esta estructura aún presenta error en estado estacionario, lo cual se puede observar por la diferencia que existe entre la referencia y la salida del sistema en su punto de estabilización. Este error puede ser acumulado y utilizado como una componente adicional para el cálculo de la señal de entrada del sistema. Se propone agregar al lazo de control, un bloque que acumule el error en función del tiempo ($\frac{1}{s}$) y este valor lo adicione como entrada al sistema. Las ganancias de este bloque serán K_i y K_p .

$$K_p = 10; \\ K_i = 200;$$

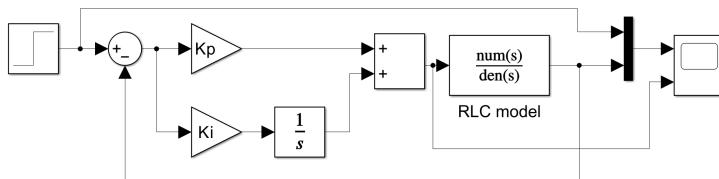


Figure 5.5: Sistema de control a lazo cerrado PI

Al incorporar la integral a la acción del lazo de control, se logra una reducción significativa del error estacionario, como se puede observar en la figura 5.6. Sin embargo, la respuesta del sistema a transitorios aún presenta fluctuaciones, las cuales podrían ser atenuadas mediante algún mecanismo que responda rápidamente ante estos cambios.

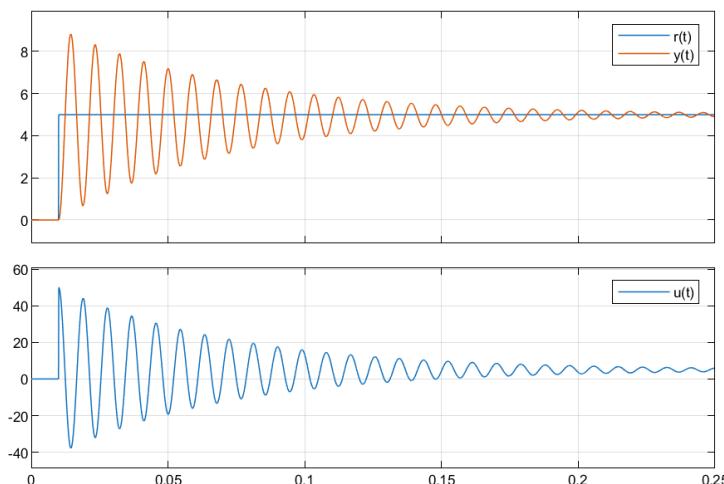


Figure 5.6: Respuesta del sistema a lazo cerrado PI al escalón.

Ejercicio 5.2 Manteniendo el valor de $K_p = 10$, ahora realice varios cambios en la ganancia K_i dentro del rango de 100 a 500, comente los resultados. ■

Proporcional-Integral-Derivativo

Para mitigar las fluctuaciones anteriormente mencionadas en la respuesta del sistema, se puede tomar en cuenta la velocidad de cambio de la salida del sistema y actuar en consecuencia. Por lo tanto, es necesario medir la tasa de cambio del error, lo cual se logra al agregar un bloque que derive el error ($\frac{\Delta u}{\Delta t}$). Así, el lazo de control queda configurado de la siguiente manera:

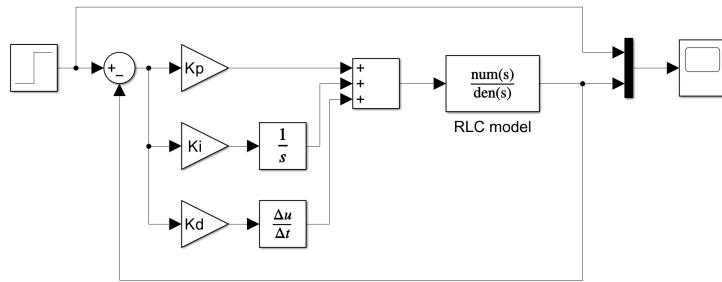


Figure 5.7: Sistema de control a lazo cerrado PID

En la figura 5.7 se muestra el diagrama de bloques completo de un controlador PID, donde el último bloque agregado fue el derivativo, con una ganancia K_d . Para este ejemplo se consideraron los valores mostrados a continuación en el bloque de código, los cuales generaron la respuesta indicada en la figura 5.8.

```
Kp = 10;
Ki = 1000;
Kd = 0.01;
```

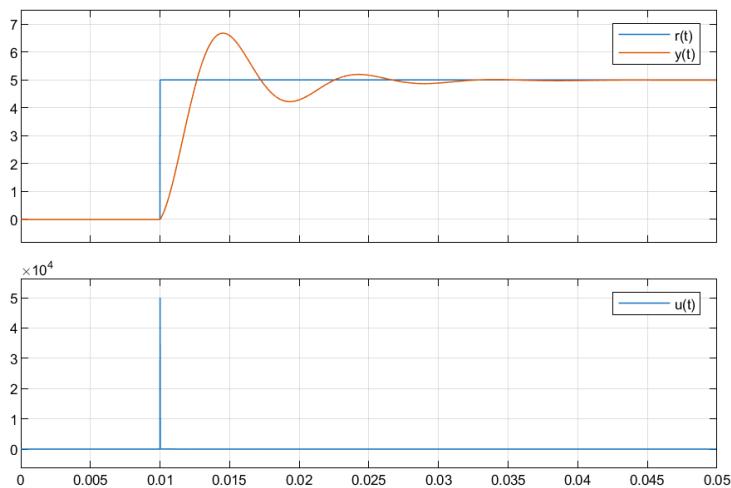


Figure 5.8: Respuesta al escalón del sistema a lazo cerrado PID.

Se puede observar en la figura 5.8 que la respuesta al escalón del sistema está amortiguada con respecto a la anterior, con esta configuración del controlador escogida, es decir con las ganancias K_p , K_i y K_d utilizadas, se obtiene esa respuesta del sistema a una señal escalón de referencia.

Ejercicio 5.3 Manteniendo los valores de $K_p = 10$ y $K_i = 1000$, ahora realice varios cambios en la ganancia K_d dentro del rango de 0.001 a 0.050, comente los resultados. ■

En conclusión, se puede cambiar el comportamiento del sistema a lazo cerrado, manipulando los valores de las ganancias K_p , K_i y K_d , cuyos valores dependerán de la respuesta que se requiera obtener del sistema.

5.4 Actividad en clase

En Simulink arme el diagrama de bloques del proceso revisado en la práctica, pero reemplace el controlador por un bloque PID, con los mismos parámetros usados anteriormente, adicional al valor de $N=1000000$, con esto se elimina de forma temporal el filtro que trae de forma implícita el bloque PID de Simulink.



En una implementación real de un controlador PID analógico, usando amplificadores operacionales, es habitual que los amplificadores se alimenten con fuentes simétricas con valores como ± 5 o ± 15 voltios, por lo que los valores de salida saturarán con esos valores de voltaje.

Para simular una implementación real del controlador, es necesario modelar la saturación con la cual funcionará a nivel de circuito. Por ejemplo, con una alimentación simétrica de ± 15 voltios, la saturación deberá estar en esos límites. Esto se puede configurar en la pestaña *Saturation* de las opciones del bloque PID, donde se puede limitar tanto la salida del controlador, como la salida del integrador. Incluya la saturación para estas dos variables del controlador. Por lo tanto, la respuesta del proceso con control PID y tomando en cuenta la saturación, se verá como se muestra en la figura 5.9.

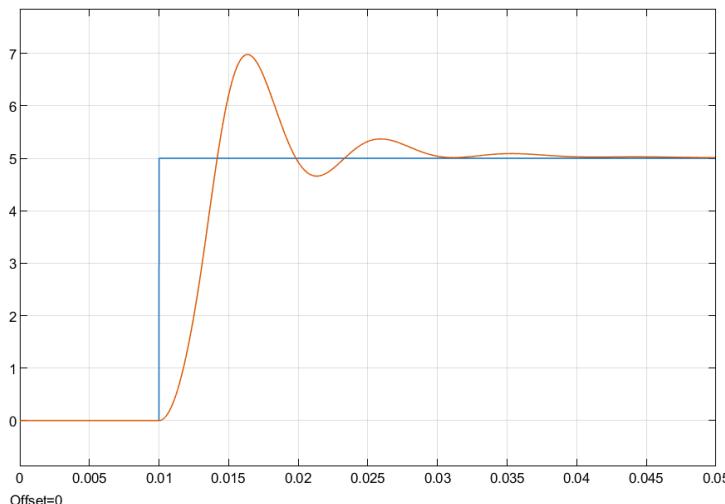


Figure 5.9: Respuesta del proceso con control PID con saturación

Ejercicio 5.4 Utilice la herramienta de **MATLAB** para sintonizar el controlador PID, de forma que la respuesta al escalón unitario del proceso se asemeje al mostrado en la figura 5.10, es decir con sobre disparo de alrededor del 10% y tiempo de establecimiento de aproximadamente 0.02 segundos.

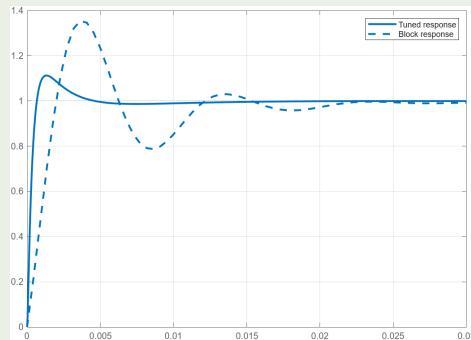


Figure 5.10: Sintonización del controlador PID

Documento los valores de K_p , K_i , K_d , N y las gráficas con las simulaciones obtenidas, con un tiempo de simulación de 50ms e incluyendo la señal de control $u(t)$. ■

5.5 Actividad Reto

Reto 5.1 Arme un sistema de control a lazo cerrado con PID en **LTspice**, usando componentes pasivos y analógicos (resistencias, capacitores, amplificadores operacionales) y aplíquelo en los siguientes escenarios:

El circuito RLC de la práctica...

- Usando función de transferencia.
- Usando componentes pasivos.

5.5.1 Sugerencias

- Refiérase al circuito para controlador PID analizado en las sesiones ACD, usando la arquitectura PID propuesta por el docente.
- Para usar la función de transferencia directamente en el circuito se utiliza un componente llamado e , el cual es una fuente que tiene la siguiente forma:

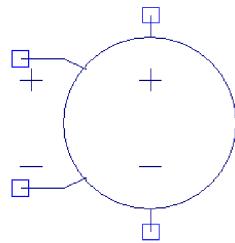


Figure 5.11: Voltage dependent voltage source

Refiérase al siguiente artículo para mas información ↗