

## GUÍA DE TRABAJOS PRÁCTICOS N° 2

**Sistemas de control en lazo cerrado: Análisis de régimen estacionario y transitorio, rechazo de perturbaciones, variación paramétrica y análisis de estabilidad.****Objetivos:**

- Obtener el modelo que caracteriza a la planta a través de la función de transferencia para cada uno de los sistemas físicos especificados.
- Reconocer e interpretar los diferentes parámetros de la respuesta transitoria en sistemas dinámicos, a fin de evaluar su desempeño en régimen transitorio y permanente.
- Comprender los efectos y mejoras introducidas por los controladores lineales P, PI, PD, PID y PI-D, comparando la operación a lazo cerrado, con y sin compensación.
- Establecer los errores de posición, de velocidad y de aceleración para diferentes sistemas.
- Simular mediante Matlab o PSIM las diferentes respuestas y evaluar el desempeño del sistema.

**Ejercicio N°1:**

Considerar un modelo mecánico rotacional, donde los elementos son una inercia de  $J = 0,12 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$  y una fricción viscosa  $b = 0,09 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ ; seleccionar como entrada al torque  $T(s)$  y como salida la posición angular  $\Theta(s)$ . Obtenga la función de transferencia  $G_p(s) = \frac{\Theta(s)}{T(s)}$ .

Colocar el sistema en lazo cerrado sin compensador. Realizar un diagrama de bloques para esquematizar el problema con un controlador  $G_c(s) = 1$ .

- Obtener los **errores de posición, velocidad y aceleración**, aclarando qué **tipo de sistema** es la FTLA. Obtener la respuesta al escalón unitario, la rampa unitaria y la cuadrática del sistema en LC y verificar los errores calculados.
- Realizar un análisis de la planta en LC con variaciones paramétricas:
  - Producir cambios de carga  $J$  de 0,12; 0,5; 0,75; 1 y 1,5  $\text{N m s}^2/\text{rad}$  y obtener la respuesta al escalón **en un mismo gráfico**, además obtener el diagrama de polos y ceros (**también en un solo gráfico**) y generar una tabla para comparar los valores de  $t_p$ ,  $t_s$ ,  $M_p$ ,  $t_r$  y  $e_{ssp}$ .
  - Luego, realizar cambios en la fricción ( $b$ ) manteniendo constante a  $J = 0,12 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$ . Obtener para  $b$  igual a 0,01; 0,1; 0,5; 0,6928 y 1,05  $\text{N m s}/\text{rad}$  los gráficos y la tabla como se menciona en el punto anterior.
  - Evaluar que sucede en cada caso con la respuesta en lazo cerrado y con los parámetros característicos de un sistema de 2do orden ( $\omega_n$ ,  $\sigma$ ,  $\xi$ ). A la FT de la planta del sistema

rotacional se la puede definir como  $G_p(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)}$ .

c. Incorporar un controlador al sistema original ( $J = 0,12 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$  y  $b = 0,09 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ ) y realizar variaciones de los parámetros del mismo; para todos los casos expresar los controladores y la planta en la **forma zpk**.

1 – Incluir un compensador proporcional y obtener la **respuesta al escalón, acción de control** y el **diagrama de polos y ceros** variando  $K_p$  en 0,2; 0,5; 1; 2,5 y 5.

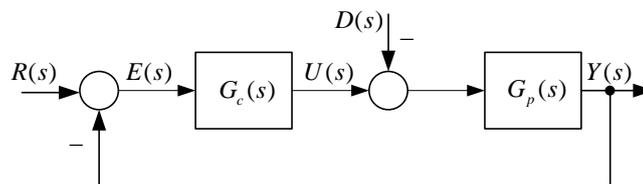
2 – Evaluar la necesidad de incluir una acción integral al sistema de control en LC.

3 – Ahora, colocar un controlador del tipo derivativo  $G_c(s) = K_p T_d s$  con  $K_p = 1$  y evaluar, como en el punto anterior, cómo responde el sistema con  $T_d$  igual a 0,5; 1 y 2 s.

4 – Finalmente emplear un controlador PD expresado como  $G_c(s) = K_p(1 + T_d s)$ . Modificar únicamente  $T_d$  a 0,5; 1 y 1,5 con  $K_p$  igual a 1. Evaluar como los casos anteriores.

### Ejercicio N°2:

Se posee un proceso definido como  $G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(s+0,02)}$ , al cual se quiere operar en lazo cerrado. Se propone reducir el orden de la planta para que ofrezca una respuesta aceptable mediante una cancelación polo-cero, y además se quiere eliminar el error en régimen permanente cuando la entrada es un escalón. El esquema en lazo cerrado se presenta en la Figura 1.



**Figura 1**

a. Analizar si se cumple la especificación de error nulo simplemente con un controlador proporcional o un controlador derivativo.

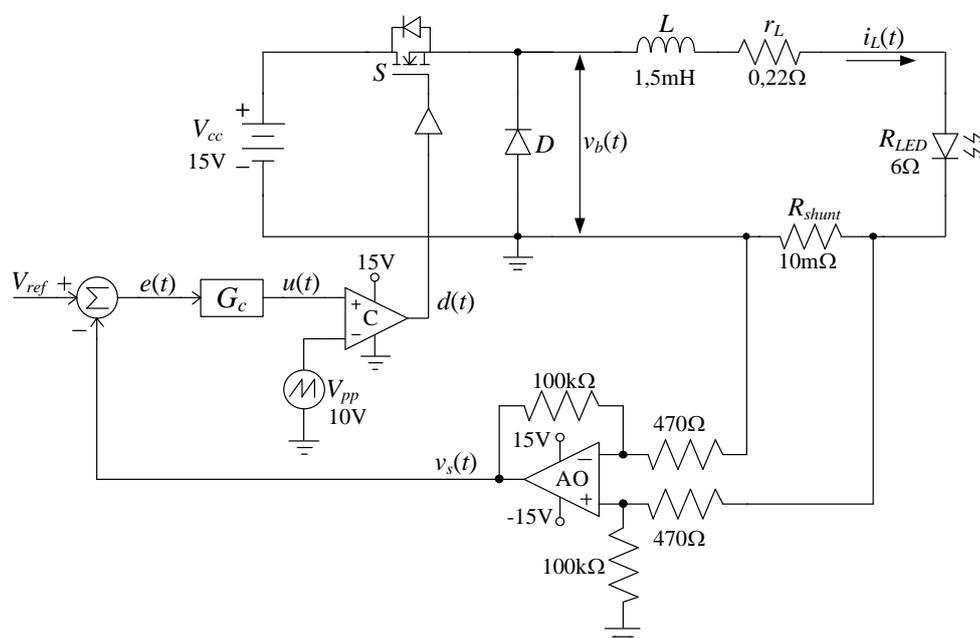
b. Definir el controlador  $G_c(s)$  en función de los datos mencionados anteriormente. Mediante PSIM graficar la respuesta al escalón unitario de la salida  $Y(s)$  respecto a la entrada  $R(s)$ . Definir qué tipo de respuesta dinámica posee, detallando las características de la curva (desempeño en régimen transitorio y permanente).

c. Ahora, ¿qué sucede si se aplica un disturbio  $D(s)$ ? Obtener la respuesta al escalón unitario con PSIM de  $Y(s)$  respecto a  $R(s)$  y aplicar, cuando el sistema se encuentra en régimen

- permanente, una perturbación del tipo escalón unitario y evaluar el desempeño transitorio y permanente del sistema en LC (**Considerar el signo ‘-’ de la Figura 3**).
- Agregar otro parámetro al controlador anterior para mejorar el rechazo a perturbaciones y graficar junto a la curva del punto anterior.
  - Obtener el diagrama de Bode (**en un mismo gráfico**) en LA con el controlador y sin el controlador, para analizar la estabilidad del sistema en lazo cerrado.
  - Obtener el diagrama de Bode (**en un mismo gráfico**) en LC con el controlador y sin el controlador, y analizar las similitudes con la respuesta al escalón y las ecuaciones del sistema en LC (evaluación del desempeño del sistema).

### **Ejercicio N°3:**

En la Figura 2 se presenta un Convertidor CC-CC *Buck*, el cual posee una inductancia  $L$  como filtro de salida. Se desea controlar la corriente de un LED de potencia de manera que circule en forma constante el valor de 2 A. Considerar que el LED posee una resistencia interna  $R_{LED} = 6 \Omega$  y no tiene caída de tensión en conducción, la inductancia  $L$  posee un valor de 1,5 mH y la resistencia equivalente serie  $r_L = 0,22 \Omega$ . La fuente de alimentación se supone ideal y su valor es  $V_{cc} = 15 \text{ V}$ . El sensor de corriente utilizado es un *shunt* de  $10 \text{ m}\Omega$  y la corriente que pasa a través del mismo se acondiciona mediante un amplificador diferencial, cuyos resistores se muestran en el esquema eléctrico. La señal de activación de la llave  $S$  proviene de un circuito generador de señal PWM, que utiliza la fuente de tensión diente de sierra de tensión pico a pico  $V_{pp} = 10 \text{ V}$  y una frecuencia de 20 kHz.



**Figura 2.**

La función de transferencia de la planta está definida en la siguiente expresión:

$$\frac{I_L(s)}{V_b(s)} = \frac{1}{sL + r_L + R_{LED} + R_{shunt}}$$

Las respectivas ganancias del actuador y del sensor, están dadas por las siguientes relaciones:

$$K_a = \frac{V_{cc}}{V_{pp}} \quad K_s = \frac{V_s(s)}{I(s)}$$

- A) Realizar un esquema en bloques completo del sistema en lazo cerrado empleando un controlador genérico. Obtener la FT de lazo abierto no compensada  $G_{LANC}(s)$  incluyendo las ganancias del actuador y del sensor. Obtener la FT de lazo cerrado no compensada  $G_{LCNC}(s)$ . A continuación, obtener las siguientes respuestas: 1) respuesta al escalón de la FT de lazo abierto para el valor de tensión que produce la corriente nominal de 2A. 2) respuesta al escalón de la FT de lazo cerrado para el valor de referencia  $V_{ref}$  indicado en la Figura 2.
- B) Se desea controlar la corriente considerando que las especificaciones de la respuesta transitoria al escalón son las siguientes:  $e_{ssp} = 0$ ;  $M_p \approx 0$  y  $t_s \leq 1,9$  ms. Obtener la FT del controlador  $G_c(s)$  necesario para cumplir con la especificación de régimen permanente y la ganancia  $K_c$  necesaria para cumplir con el tiempo de asentamiento. Calcular el par de polos dominantes de la FT de LC resultante que determinan la respuesta de la corriente en el LED y cumplen con las especificaciones de desempeño transitorio. Realizar el diseño y la primera comprobación mediante simulación en Matlab para la referencia  $V_{ref}$  que produzca la corriente indicada, presentando los siguientes gráficos: 1) la salida y la referencia; 2) la acción de control y 3) el error de control. **Nota: Verificar que la acción de control obtenida no supere la tensión de alimentación del amplificador operacional y tampoco supera el pico de la señal diente de sierra.**
- C) Obtener el diagrama de Bode de LA y analizar la estabilidad del sistema compensado. Obtener el diagrama de Bode de LC y analizar el ancho de banda, pico de resonancia y error de régimen permanente.
- D) Verificar la simulación en PSIM utilizando el circuito de la Figura 2, presentando en gráficos diferentes las siguientes variables: la salida y la referencia; la acción de control; el error de control; la corriente en el LED; la señal triangular con la acción de control y la señal PWM aplicada a la planta. Evaluar el desempeño y obtener conclusiones. **Nota: Para el controlador  $G_c$  indicado en la Figura 2, utilizar el bloque de FT denominado “s-domain Transfer Function”.**
- E) Realizar una variación de parámetros para observar cómo afectan los mismos en la respuesta

transitoria de la corriente controlada. 1) variar la resistencia del LED del valor nominal de  $6 \Omega$  hasta los  $9 \Omega$  con un incremento de  $1 \Omega$  y graficar la respuesta de la corriente y de la acción de control. 2) variar la inductancia desde el valor  $0,25 \text{ mH}$  con incrementos de  $0,5 \text{ mH}$  hasta el valor de  $2,5 \text{ mH}$  y graficar la respuesta de la corriente y de la acción de control. Evaluar el desempeño para ambos casos y sacar conclusiones.