GUÍA DE TRABAJOS PRÁCTICOS Nº 3

Región deseada de polos de lazo cerrado.
Diseño de controladores en el plano-*s*: Reubicación de polos y Lugar Geométrico de las Raíces (LGR)

Objetivos:

- Determinar la región deseada de polos de LC a partir de especificaciones de desempeño de la respuesta temporal de un sistema de control a LC.
- Aplicar las técnicas de diseño de controladores mediante reubicación de polos.
- Aplicar las técnicas de diseño de controladores por el método del LGR.
- Comprender las mejoras introducidas por los controladores lineales P, PI, PD, PID, PI-D, adelanto, atraso y adelanto-atraso.
- Diseñar y simular controladores utilizando amplificadores operacionales (AO). Observar sus limitaciones y consideraciones a la hora de emplearlos.
- Simular los sistemas de control en lazo cerrado diseñados a través de Matlab, PSIM, Schematics o Multisim.
- Diseñar y simular controladores no lineales ON-OFF para la solución de problemas de control en lazo cerrado.

Ejercicio Nº 1

En un laboratorio se ensaya un horno eléctrico de 32 litros aplicándole un escalón de 220V. Ante dicha entrada, la temperatura en el interior del horno asciende a 250ºC con una constante de tiempo de 250s, siendo la temperatura inicial de 25ºC. A partir de esto el modelo de la planta resulta:

$$G_p(s) = \frac{T_H(s)}{V_e(s)} = \frac{K_H}{250s+1} \text{ donde } K_H = \frac{225\,°\text{C}}{220\,\text{V}}$$

Dicho modelo térmico puede ser modelado con un equivalente eléctrico dado en la Figura 1, donde C_{P1} = 1 F, R_{P1} = 375 Ω, R_{P2} = 750 Ω y K_1 = (225/220)x1,5 ºC/V. La temperatura del horno es medida con un sensor PT100 con su correspondiente acondicionador, ajustándose de tal manera que a la salida se tiene 5V para 250ºC. Dicho sensor más el acondicionador está representado por el bloque K_s.

A. Verificar Modelo:

1 – Trazar con Matlab la respuesta al escalón de $G_p(s)$ para la tensión de entrada V_e y verificar que el tiempo de asentamiento para un 2% de tolerancia se cumple en 4 veces la constante de tiempo de la planta. Indicar este tiempo en la gráfica como así también el valor final de régimen

estacionario.

2 – Realizar el circuito en PSIM del esquema eléctrico equivalente del modelo del horno (únicamente circuito eléctrico con entrada V_e en escalón y el bloque sensor), obtener la respuesta al escalón de $T_H(t)$ y compararla con la obtenida en Matlab. Obtener también la respuesta al escalón de $v_s(t)$. En ambas gráficas indicar el tiempo de asentamiento para el 2% y el valor final de régimen estacionario.

B. Control no lineal ON-OFF:

1. Con el fin de controlar la temperatura del horno, diseñar un controlador ON-OFF inversor con histéresis cuyo circuito se muestra en la Figura 1. El comparador de tensión utilizado debe energizarse con una fuente de alimentación V_{cc} = 15V. Realizar el diseño del controlador considerando que la temperatura del horno debe mantenerse regulada en 150ºC con una histéresis de un 5%, lo que representa una ondulación de temperatura ±3,75ºC.

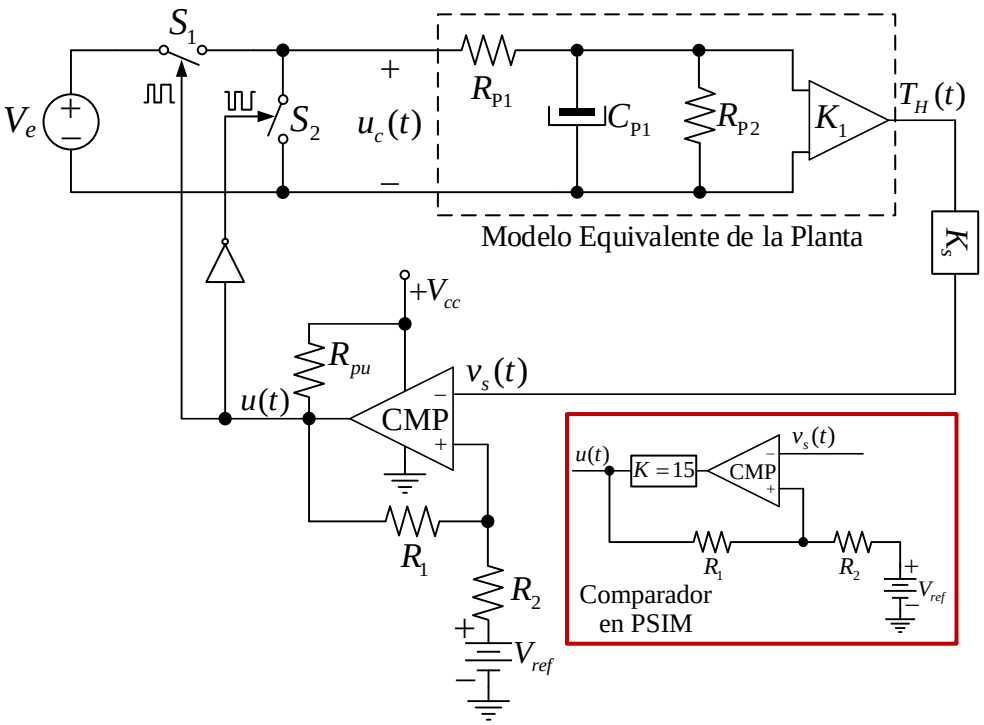


Figura 1. Esquema eléctrico equivalente de la dinámica térmica del horno y circuito de control ON-OFF. Forma de implementar el control ON-OFF en PSIM.

2. Implementar el sistema de control en PSIM como indicado en la Figura 1 y simularlo (considerar un tiempo total de simulación igual a 3000 s y un paso de simulación de 5 ms) mostrando los siguientes resultados:

a – En un único gráfico dividido, representar en la parte superior, la temperatura en el interior del horno $T_H(t)$, indicando el cumplimiento de los límites de corte ($T_{\max}$ y $T_{\min}$) y la temperatura de régimen permanente, y, en la parte media, la acción de control aplicada al actuador $u(t)$. De esta última calcular el ciclo útil y la frecuencia de esta señal. Y en la parte inferior, la tensión a la

salida del sensor $v_s(t)$, indicando los valores máximos y mínimos de la tensión de histéresis para verificar que se encuentran dentro del rango de valores especificados.

b – Para analizar la capacidad de rechazo a perturbaciones de este controlador, se simulará una pérdida de calor, mediante la conexión en paralelo con C_P de una rama RC, siendo el R = 250 Ω y C = 2 F. Conectar esta rama RC mediante una fuente en escalón a los 1200 s. Mostrar en un gráfico a pantalla dividida, en la parte superior, la evolución de la temperatura y en la parte inferior, la acción de control $u_c(t)$ aplicada a la planta. Observe los efectos de la perturbación en la variable controlada midiendo caída de temperatura y tiempo de recuperación. Describa que efectos observa en la señal $u_c(t)$, antes y después de aplicarse la perturbación, midiéndolos y cuantificándolos.

Nota: Para implementar correctamente el control ON-OFF en PSIM, considerar un bloque de ganancia K = 15 conectado a la salida del comparador para modelar la tensión de alimentación V_{cc} del comparador, el cual es un componente ideal en este simulador. Ver Figura 1.

C. Control Lineal:

A continuación, se desea regular la temperatura del horno mediante un controlador lineal. Para actuar sobre la planta se emplea un convertidor electrónico de potencia cuyas llaves de potencia se comandan con modulación por ancho de pulso (PWM). En esta técnica, la acción de control $u_c(t)$ que recibe la planta a través del actuador, es una señal que posee una frecuencia constante y un ciclo útil variable de acuerdo a la señal $u(t)$ proporcionada por el controlador. A partir de esto, el generador PWM indicado en la Figura 2 produce la señal $d(t)$ a partir de la comparación entre la acción $u(t)$ del controlador y una señal triangular simétrica $v_{tri}(t)$ de frecuencia constante. La señal modulada $d(t)$ acciona las llaves S_1 y S_2 en forma complementaria para que el sistema reciba una tensión con valor promedio dependiente del ciclo útil de dicha señal, es decir la tensión: $u_c(t) = d(t)V_e$. Este procedimiento se muestra en la Figura 3 (a), en la cual se muestra la forma de onda modulada por ancho de pulso aplicada a la planta, obtenida por la comparación de la señal que entrega el controlador lineal con la rampa de la señal triangular de alta frecuencia. En este gráfico, T_{pwm} es el periodo de conmutación de las llaves electrónicas, y t_{on}, es el intervalo de tiempo en el cual conduce la llave S_1 (con S_2 abierta), el cual se define como $t_{on} = d \times T_{pwm}$.

1. Hallar la función de transferencia $G_{LANC}(s) = V_s(s)/U(s)$ (FTLA no compensada) que incorpora al actuador y al sensor, la cual se utilizará para el diseño del controlador lineal; como se muestra en la Figura 3 (b) Para esto, considerar que la señal triangular $v_{tri}(t)$ posee una frecuencia f_{pwm} = 100Hz, una amplitud de pico de 15 V y un ciclo de trabajo igual a 0,5. **Nota:** Para determinar el aporte del actuador en $G_{LANC}(s)$, primero hallar la relación entre $d(t)$ y $u(t)$, luego obtener el vínculo entre $d(t)$ y $u_c(t)$ y finalmente, entre $u(t)$ y $u_c(t)$.

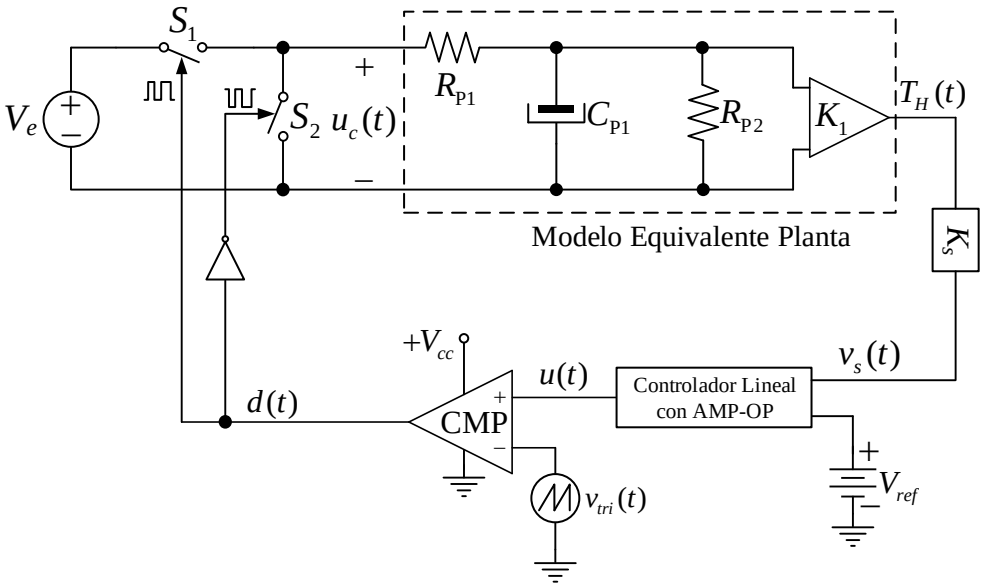
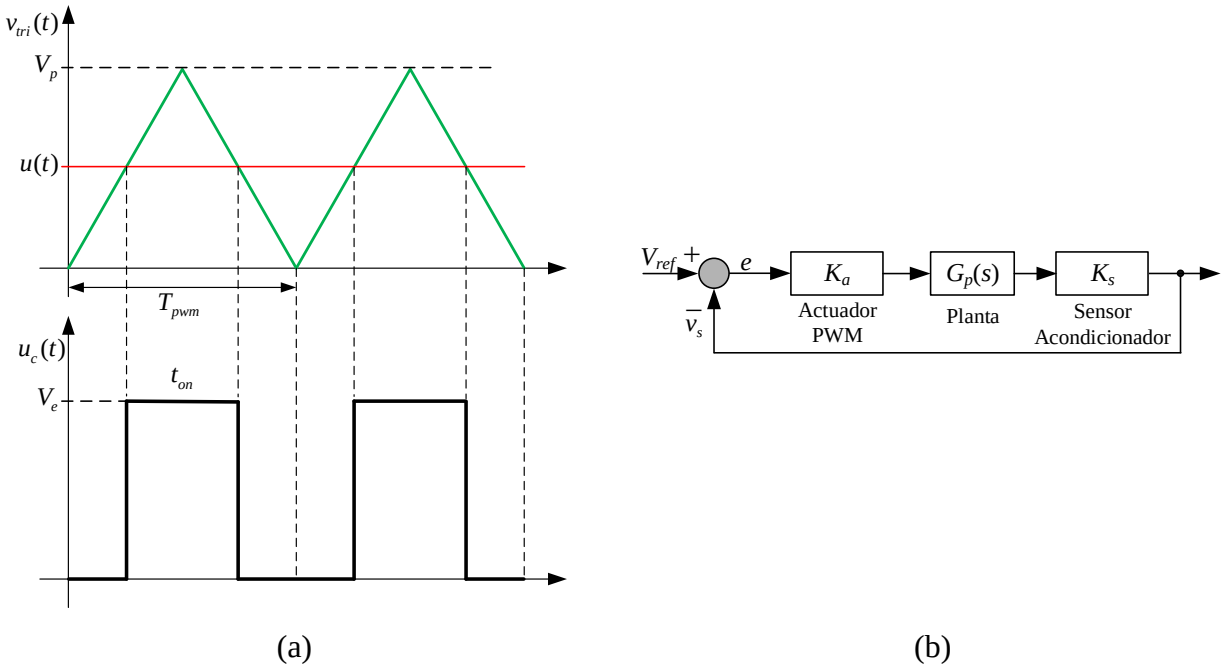


Figura 2. Esquema de control en LC del horno con actuador PWM.



(a) (b)

Figura 3. (a) Generación de la señal de actuación PWM por comparación. (b) Esquema de bloques de la FT de lazo abierto sin compensar.

2. Tanto en Matlab como en PSIM, obtener la respuesta de $G_p(s)$ y de $G_{LANC}(s)$ ante un escalón con una amplitud tal que produzca una temperatura en el horno de 150ºC. Observar que en ambos casos se obtengan los mismos valores de régimen estacionario y de tiempos de asentamiento. Observar qué valores promedio se obtienen en el actuador en $u_c(t)$.

3. Diseñar un controlador lineal sencillo que permita controlar la temperatura interior del horno. Se desea que para una entrada en escalón de tensión con amplitud V_{ref} equivalente a

150ºC no exista error en régimen permanente, y en régimen transitorio, se cumpla con $M_p \leq 10\%$ y $t_s \leq 900$ s. Para el diseño del controlador, **aplicar el método de reubicación de polos**. A partir del sistema controlado, obtener la respuesta al escalón indicado de $T_H(t)$ y verificar si se cumplen las especificaciones de diseño. Si no se cumplen, explicar a qué se debe la inexactitud del método y cuáles parámetros del controlador considera que pueden modificarse para solucionar este inconveniente.

4. A partir de la herramienta SISOTOOL de Matlab y considerando el análisis final del punto anterior, ajustar el controlador para cumplir con las especificaciones de desempeño mencionadas, observando al mismo tiempo la acción de control para no superar el valor máximo de pico de la señal triangular y de la tensión de alimentación de los AO. A partir del sistema controlado, obtener la respuesta al escalón de $T_H(t)$ con amplitud V_{ref} equivalente a 150ºC y verificar que se cumplan las especificaciones anteriores. Trazar en otro gráfico la acción de control resultante y compararla con la obtenida en el punto 3.

5. Utilizar el controlador obtenido en el punto 4 para diseñar el circuito electrónico del controlador lineal utilizando amplificadores operacionales (AO).

6. Implementar el controlador en PSIM incorporándolo como se muestra en la Figura 2. Considerar que todos los AO se alimentan con ±15V y que debe implementarse también con AO el restador que determina el error de voltaje que ingresa al controlador y el sumador de las acciones si fuera necesario.

7. Con la simulación, obtener la respuesta de la temperatura $T_H(t)$ del horno a un escalón con amplitud V_{ref} equivalente a 150ºC en un gráfico, y en otro, trazar la acción de control $u(t)$ resultante; ambos en una misma pantalla. **Nota:** Considerar el paso de simulación (*time step*) de $T_{pwm}/10$, donde $T_{pwm} = 1/f_{pwm}$.

A partir de la simulación realizada, indicar y analizar los valores que toma la respuesta de la planta $T_H(t)$ y la acción de control $u(t)$ ante el escalón en la referencia; compararlos con los obtenidos en Matlab y expresar conclusiones. Obtener un gráfico del valor medio de la acción $u_c(t)$ aplicada a la planta, mostrando unos 10 periodos de esta señal y su valor medio en régimen estacionario.

D. Expresar conclusiones sobre la comparación entre las respuestas de la temperatura obtenidas con el controlador lineal diseñado y el controlador no lineal ON-OFF del punto B.

Ejercicio Nº 2

El motor de corriente continua de imanes permanentes de la empresa Maxon denominado EC 25 Ø25 mm se esquematiza en la Figura 3. El modelo matemático simplificado ($\tau_m >> \tau_e$) que vincula la velocidad de giro del motor $\omega(t)$ con la tensión de armadura $v_a(t)$ está dado por:

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{\dfrac{K_t}{(bR_a + K_t K_b)}}{\dfrac{JR_a}{(bR_a + K_t K_b)}s + 1} = \frac{K_m}{\tau_m s + 1}$$

Donde $R_a = 0{,}122\,\Omega$; $K_t = 5{,}36\text{mN}\times\text{m/A}$; $K_b = 1780\text{rpm/V}$; $J = 0{,}547\mu\text{N}\times\text{m}\times\text{s}^2/\text{rad}$ y $b = 0{,}2873\mu\text{N}\times\text{m}\times\text{s/rad}$. La velocidad nominal es de 62200 rpm y la tensión nominal de armadura es de 36V.

Para efectuar pruebas sobre el motor se monta un actuador, el cual consiste en una fuente conmutada que utiliza modulación por ancho de pulso (PWM) para hacer conmutar las llaves (transistores MOSFET) a través del comparador de tensión CMP (Figura 4). El objetivo del actuador es modificar la tensión $v_a(t)$ que actúa sobre la planta, en función de la acción de control proporcionada por el controlador $G_c(s)$. De esta forma, dicho actuador posee una ganancia definida por el coeficiente $K_{act} = V_e/V_{pp}$, siendo V_{pp} la tensión pico a pico generada por la fuente V_{tri}. Con esto, la tensión aplicada a la planta está dada por $v_a(t) = K_{act}.u(t)$, lo cual indica que la ganancia K_{act} debe ser considerada en serie con la planta a la hora del diseño del controlador. Por otro lado, en dicho diseño debe considerarse que el sensor también posee una ganancia K_s, la cual esta dada tal que su salida proporcione 4V cuando el motor gira a la velocidad nominal.

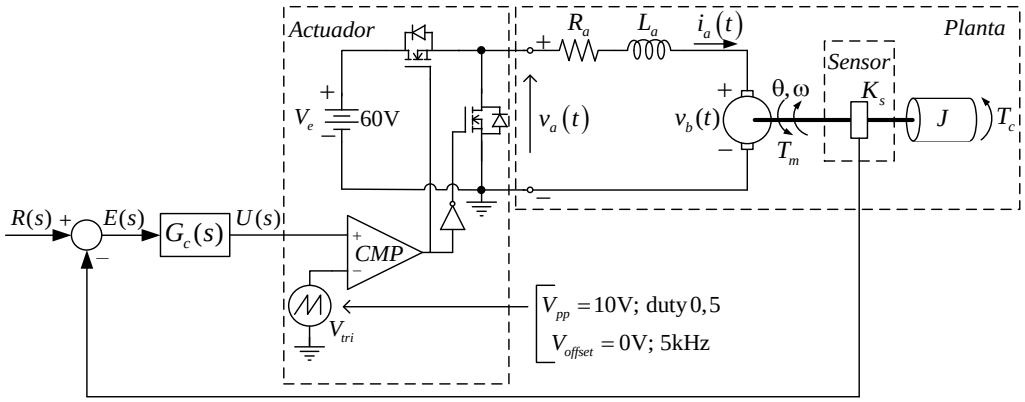


Figura 4.

Para el sistema indicado se pide:

A. Diseñar un controlador **mediante el lugar geométrico de raíces** que permita obtener las siguientes especificaciones: $e_{ssp} = 0$; $t_s \leq 10\text{ms}$ y $M_p \leq 10\%$. Obtener la respuesta al escalón de 50000 rpm y comprobar las exigencias; en caso de no obtener el desempeño establecido realizar un ajuste mediante SISOTOOL de Matlab®. ***Sacar conclusiones***.

B. Luego, en un mapa de polos y ceros establecer la región deseada de polos de lazo cerrado

para las especificaciones suministradas en el punto A. Diseñar un controlador PI para que la respuesta al escalón unitario cumpla con dichas exigencias. Comparar el método de diseño empleado en el ítem anterior con el utilizado en este inciso y ***expresar conclusiones.***

C. Sabiendo que un controlador PID puede obtenerse mediante un controlador PI en serie con un PD y utilizando el PI del punto anterior, diseñar a través del método del LGR, el PD para que el PID disminuya el sobrepaso M_p a 5% y t_s sea similar al obtenido anteriormente. En caso de ser necesario, realizar un ajuste mediante el software SISOTOOL. A modo comparativo, en un gráfico presentar la respuesta al escalón del sistema a LC sin controlador, con el controlador PI y con el PID. ***Expresar conclusiones.***

D. Diseñar el circuito electrónico necesario para implementar el controlador PID, utilizando amplificadores operacionales (AO) (no olvidar el detector de error).

E. Realizar la simulación utilizando el software PSIM, donde el controlador esté implementado con los AO y el sistema mediante un diagrama de bloques; incluir un disturbio generado por un torque de carga de $35{,}1 \times 10^{-3}$ Nm cuando la velocidad supera el régimen transitorio. La referencia debe ser un escalón tal que el motor gire a la mitad de la velocidad nominal. Evaluar la necesidad de utilizar el controlador PI-D. Presentar los gráficos de la velocidad, la acción de control y el error y analizar dichos resultados; ***concluir sobre el desempeño final del sistema en su totalidad***.