

GUÍA DE TRABAJOS PRÁCTICOS N° 3**Región deseada de polos de lazo cerrado.****Diseño de controladores en el plano-s: Reubicación de polos****Controladores No Lineales ON-OFF.****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.
- 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 y PSIM.
- Diseñar y simular controladores no lineales ON-OFF para la solución de problemas de control en lazo cerrado.

Ejercicio N° 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 225°C con una constante de tiempo de 250s, siendo la temperatura inicial de 25°C. A partir de esto el modelo de la planta resulta:

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

Dicho modelo térmico puede ser modelado con un equivalente eléctrico dado en la Figura 1, donde $C_{P1} = 1\text{ F}$, $R_{P1} = 375\ \Omega$, $R_{P2} = 750\ \Omega$ y $K_1 = (225/220) \times 1,5\ ^\circ\text{C/V}$. 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 250°C. 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 el controlador ON-OFF inversor con histéresis cuyo circuito se muestra en la Figura 1 (a). El comparador de tensión utilizado debe energizarse con una fuente $V_{cc} = 15V$. Realizar el diseño del controlador ON-OFF considerando que la temperatura del horno debe mantenerse regulada en $150^\circ C$ con una histéresis de un 5%.

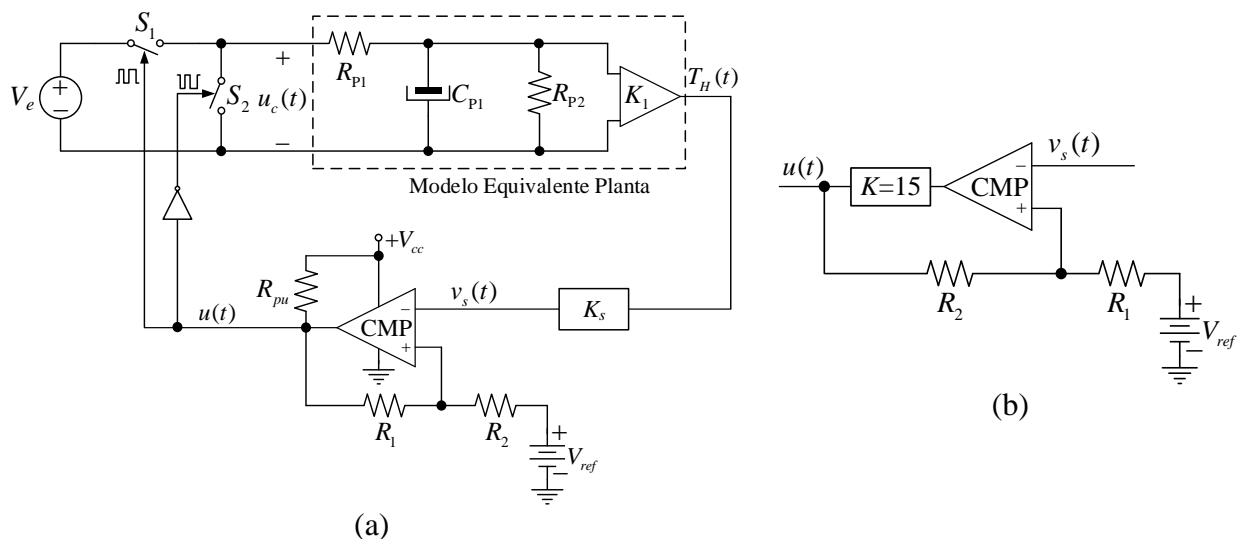


Figura 1. (a) Esquema eléctrico equivalente de la dinámica térmica del horno y circuito de control ON-OFF. (b) Forma de implementar el control ON-OFF en PSIM.

2. Implementar el sistema de control en PSIM y simularlo. Mostrar los siguientes resultados:

- En una misma ventana y 2 gráficas, en el gráfico 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 tensión a la salida del sensor $v_s(t)$, indicando los valores máximos y mínimos de la tensión de histéresis.
- En otra pantalla dividida, en la gráfica superior, la evolución completa de la temperatura del horno $T_H(t)$ y en la gráfica inferior la acción de control $u(t)$ a la salida del comparador.
- En otra gráfica mostrar solamente la evolución completa de la temperatura junto a la respuesta al escalón de la planta $G_p(s)$ a lazo abierto, a fin de mostrar los diferentes tiempos de asentamiento en cada caso resaltando así las prestaciones de un control ON-OFF.

3. Analizar las gráficas anteriores y expresar conclusiones.

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 del comparador, el cual es ideal en este simulador. Ver Figura 1 (b).

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 $f_{pwm} = 100\text{Hz}$, 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 $u_c(t)$.

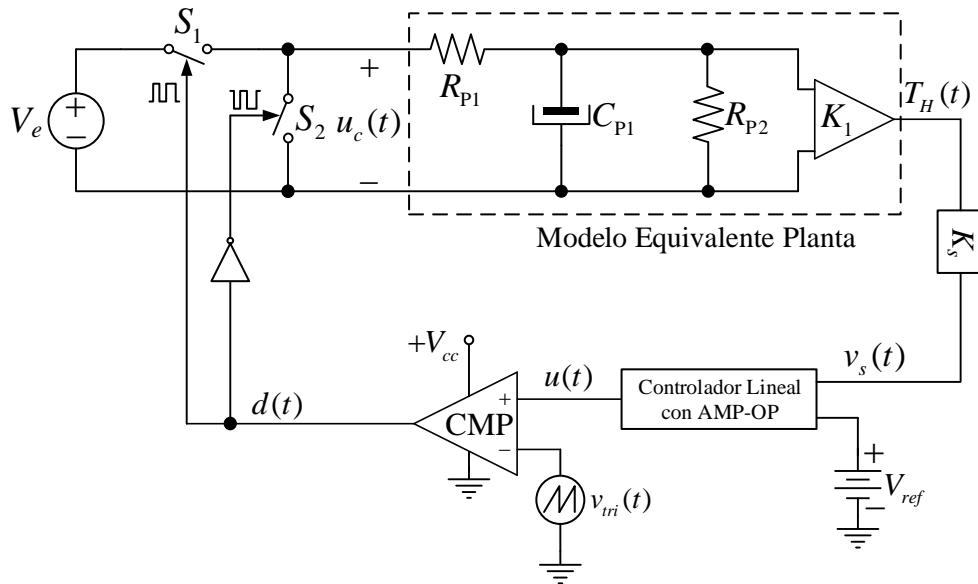


Figura 2. Esquema de control en LC del horno con actuador PWM.

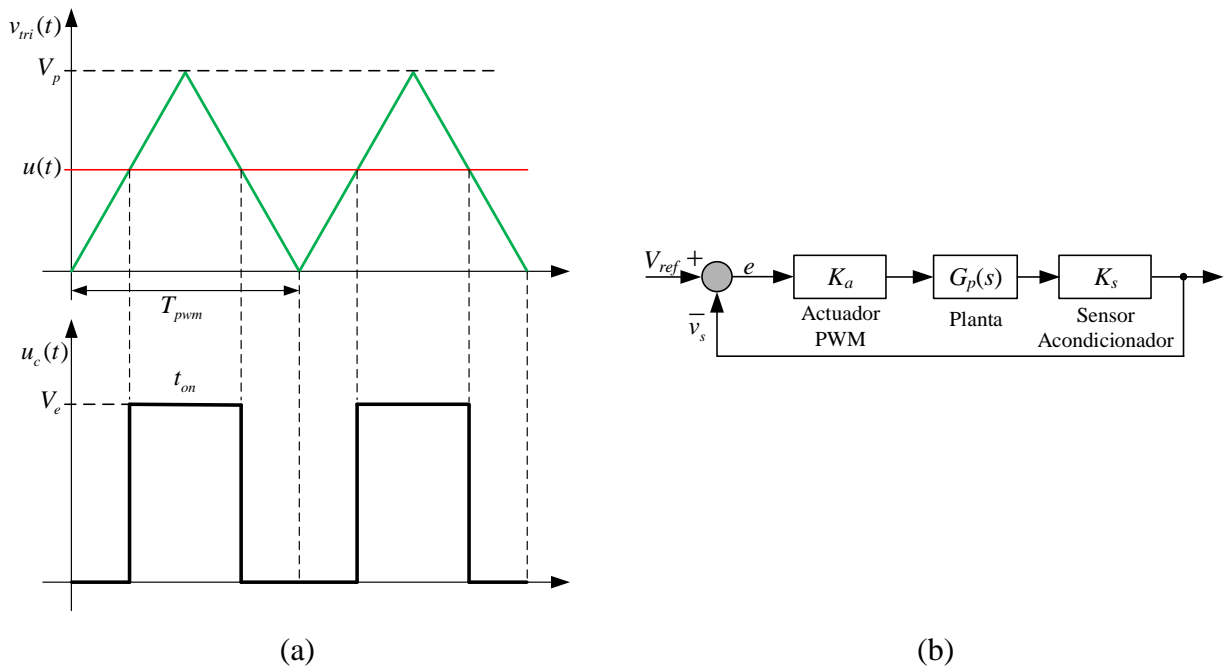


Figura 3. (a) Generación de la señal de actuación PWM por comparación. (b) Esquema de bloques de la FT de lazo abierto sin compensar.

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 150°C . 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

150°C 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 150°C 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 $\pm 15V$ 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 150°C 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 N°2

En la Figura 4 se muestra un convertidor reductor (*buck*) sincrónico cuya tensión en la salida, $v_o(t)$ en bornes de la carga debe ser mantenida constante. La potencia de salida que puede

entregar es de 240 W. La inductancia L del filtro pasa bajos tiene un valor de 120 μH ; su resistencia equivalente serie r_L posee un valor de 0,35 Ω ; la capacitancia C del filtro pasa bajos de salida tiene un valor de 40 μF y la carga $R_c = 0,6 \Omega$. La tensión de entrada $V_i = 24 \text{ V}$ y la tensión de salida constante deseada es de 12 V. Para acondicionar la tensión regulada de salida al circuito electrónico de control con amplificadores operacionales, se utiliza un divisor resistivo cuya ganancia es $K_s = 3\text{V}/12\text{V}$. El actuador tiene una ganancia K_a igual a V_i/V_p , siendo V_p la amplitud de pico de la señal triangular e igual a 10 V.

Obtener la función de transferencia de la planta entra la tensión de salida $V_o(s)$ y la acción de control $U_c(s)$ y expresar la función de transferencia de lazo abierto no compensada necesaria para realizar el diseño del controlador.

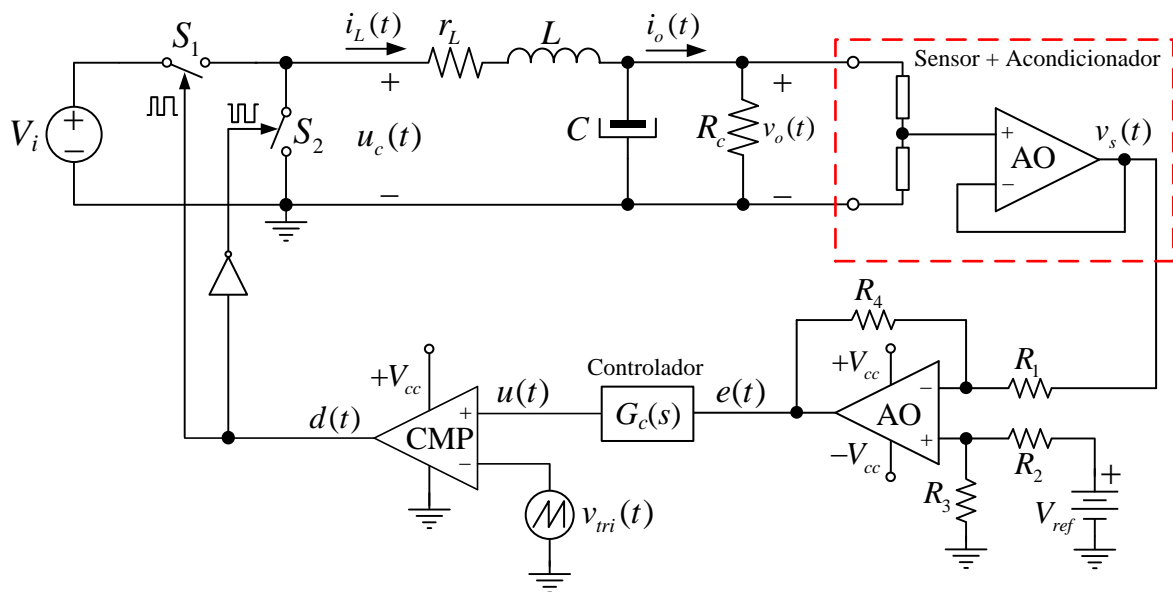


Figura 4. Esquema eléctrico del convertidor buck y control de tensión en LC

A. Las especificaciones de desempeño deseadas en lazo cerrado de la tensión de salida del convertidor son: $e_{ssp} = 0$; $t_s \leq 0,5 \text{ ms}$ y $M_p \cong 2 \%$. En base a estas especificaciones, establecer la región deseada de polos de lazo cerrado indicando las posiciones de los polos dominantes deseados $s_{1,2d}$. Se propone diseñar un compensador PI, diseñando el cero por cancelación del polo más dominante de la planta y la ganancia por reubicación de polos.

B. Una vez diseñado el compensador comprobar si se cumplen las exigencias trazando:

a. El lugar de raíces resultante del convertidor compensado para verificar que los polos dominantes se encuentran dentro de la región deseada representada en el punto A.

b. La respuesta al escalón de la tensión de salida $v_o(t)$ y de la acción de control, verificando que esta última no supere los 10 V de la triangular que genera la señal PWM. En caso de no

obtenerse el desempeño exigido, realizar un ajuste mediante SISOTOOL de Matlab® y analizar porqué no se cumplen las especificaciones en base a la ubicación de los polos y ceros dominantes y no dominantes.

c. Trazar la respuesta al escalón de $v_o(t)$ y la acción de control $u(t)$, resultantes del ajuste del compensador. Indicar valores de sobrepaso y tiempo de asentamiento en la respuesta de salida y valor máximo alcanzado por la acción de control. Trazar la respuesta en frecuencia de lazo abierto y analizar la estabilidad relativa del convertidor con el compensador ajustado.

C. A partir de los parámetros del compensador obtenido que cumple con el desempeño exigido, diseñar los componentes del circuito electrónico con amplificadores operacionales para simular y validar en PSIM los resultados obtenidos con Matlab.

D. Con el diseño del circuito compensador del punto D, simular el convertidor en PSIM con el circuito electrónico de la Figura 4. Para generar la señal PWM utilizar una fuente de onda triangular con ciclo útil de 0,5; frecuencia de 100 kHz y una amplitud de pico $V_p = 10$ V. Usar un paso de simulación (*Time step*) de 1×10^{-8} segundos y un tiempo máximo de simulación de 2 ms para que los resultados se aprecien adecuadamente. La tensión de alimentación de los amplificadores operacionales es de ± 15 V. En esta simulación, realizar una perturbación de carga a los 1,2 ms conectando en paralelo con R_c , una resistencia de 5 Ω . En gráficos diferentes graficar la tensión de salida y la acción de control y compararlos con los obtenidos en Matlab. En otros dos gráficos mostrar la corriente en el inductor y la corriente en la carga.

E. Diseñar ahora un PID por cancelación polo-cero, ubicándose ambos ceros del PID sobre los polos de la función de transferencia de lazo abierto no compensada. La FT del PID es la siguiente: $G_{PID}(s) = K_c \frac{(s + z_1)(s + z_2)}{s}$. Diseñar la ganancia K_c para cumplir con el tiempo de asentamiento especificado en el punto A. Utilizando SISOTOOL, trazar el LGR indicando en el mismo las especificaciones de desempeño; la respuesta al escalón de $v_o(t)$ resultante con este compensador y la respuesta de la acción de control. Indicar valores de sobrepaso y tiempo de asentamiento en la respuesta de salida y valor máximo de la acción de control. Trazar la respuesta en frecuencia de lazo abierto y analizar la estabilidad relativa.

F. Diseñar el circuito electrónico con AO y obtener los resultados en PSIM utilizando el circuito electrónico de la Figura 4. En gráficos diferentes graficar la tensión de salida y la acción de control.

G. Realizar el mismo ensayo de perturbación de carga que se implementó en el punto en el punto D con el compensador PI.