

GUÍA DE TRABAJOS PRÁCTICOS N° 4**Diseño y Simulación de Controladores en Tiempo Discreto: Rediseño Digital y Reubicación de Polos en el Plano z.****Objetivos:**

- Determinar la frecuencia de muestreo para cada sistema y comprobar su adecuada selección.
- Entender los atrasos presentes en los sistemas de control digital.
- Comprender las partes de un sistema de control, mediante diagramas de bloques, desde el punto de vista de diseño en el dominio de tiempo discreto (TD) y el rediseño.
- Comprender las diferentes aproximaciones, sus efectos en el desempeño de sistemas de control en TD y su mecanismo de implementación en el rediseño digital.
- Comprender la vinculación entre los dominios de tiempo continuo (TC) y de TD.
- Aplicar las técnicas de diseño de controladores mediante rediseño digital
- Aplicar las técnicas de diseño de controladores mediante la reubicación de polos en el dominio de tiempo discreto.
- Obtener las ecuaciones recursivas necesarias para la implementación digital.
- Diseñar y simular controladores en microcontroladores. Observar sus limitaciones y consideraciones a la hora de emplearlos.
- Simular los sistemas de control en lazo cerrado en TD diseñados a través de Matlab o PSIM, mediante funciones de transferencia y a través de programación de la secuencia de pasos llevado a cabo dentro de una DLL para PSIM:

Problema 1:

En un laboratorio se ensaya un horno eléctrico de 32 litros al cual se le aplica un escalón de tensión entrada $V_e = 250 \text{ V}$. Ante dicha entrada, la temperatura en el interior del horno asciende y se establece en un valor de 350 °C , siendo la temperatura inicial de 25 °C . A partir de esto el modelo de la planta resulta:

$$G_p(s) = \frac{T_H(s)}{V_e(s)} = \frac{K_H}{400s + 1} \quad \text{donde } K_H = \frac{350 \text{ °C}}{250 \text{ V}}$$

Dicho modelo térmico puede ser modelado con un equivalente eléctrico dado en la Figura 1, donde $C_P = 1 \text{ F}$, $R_P = 400 \text{ } \Omega$ y $K_1 = 1,4 \text{ °C/V}$. La temperatura del horno es medida con un sensor activo con su correspondiente acondicionador, ajustándose la ganancia de tal manera que a la salida se tienen

3,5V para 350°C. Dicho sensor más el acondicionador está representado por el bloque K_s . Para todos los cálculos y simulaciones a realizar, considerar la condición inicial de temperatura igual a 0 °C.

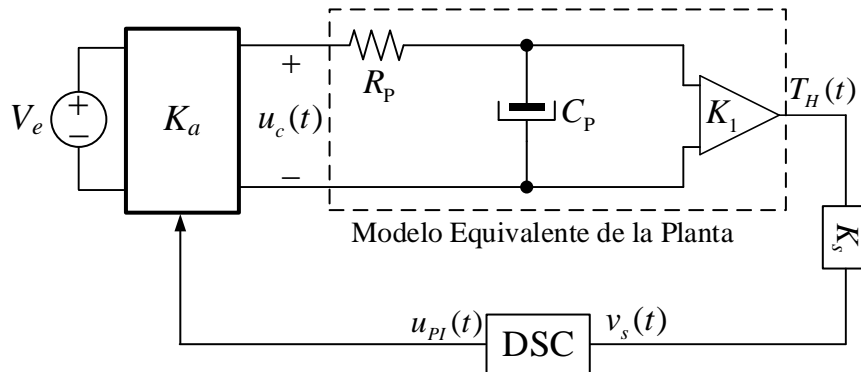


Figura 1. Esquema de control en LC del horno con actuador PWM.

Se desea controlar la temperatura del horno en 320°C y que su respuesta al escalón cumpla con las siguientes especificaciones de desempeño dinámico: $e_{ssp} = 0$, un sobrepaso aproximadamente igual o menor al 10% y un tiempo de asentamiento menor a 1500 s. Para ello se obtiene el siguiente controlador PI, el cual debe ser implementado en un microcontrolador:

$$G_c(s) = K_{PI} \frac{(s + z_{PI})}{s} = 0,4 \frac{(s + 0,005399355)}{s} \quad (1)$$

Primera Parte: Rediseño Digital:

- Realizar un diagrama de bloques del sistema de control teniendo en cuenta que el control anteriormente indicado se implementará en forma digital y que la referencia es un valor interno en el microcontrolador. Indicar correctamente todas las variables en el diagrama.
- Seleccionar el periodo de muestreo adecuado a partir de la frecuencia de oscilación ω_d de los polos de la función de transferencia de lazo cerrado en tiempo continuo con el controlador indicado en (1) utilizándose la relación $T = \frac{T_d}{N_d}$, siendo N_d el número de muestras necesarias para obtener el periodo de muestreo buscado. Seleccionar los siguientes valores de N_d : 10 y 50 muestras y tomar el valor entero inmediato superior para T .
- A partir del método de rediseño digital y con el periodo de muestreo elegido obtener la función de transferencia del controlador en tiempo discreto mediante las siguientes aproximaciones: 1) Aproximación *Backward*; 2) Aproximación *Forward* y 3) Aproximación de *Tustin*. En cada caso mostrar las expresiones finales en la forma 'zpk', indicando ganancia, ceros y polos.

- d) Para cada aproximación del controlador (1) del punto c, obtener las respuestas al escalón del sistema en LC junto a la respuesta en LC de tiempo continuo, graficándose como salida la temperatura del horno. Tener en cuenta que para cada valor de T del punto (b) debe obtenerse la FT muestreada de la planta utilizándose un ZOH y la correspondiente FT de lazo abierto teniendo en cuenta la ganancia del actuador y la del sensor. **Nota: Presentar las 4 respuestas en un mismo gráfico, correctamente identificadas.** Obtener también en un mismo gráfico, las respuestas de las acciones de control en cada caso.
- e) Obtener las respuestas en frecuencia de lazo abierto para analizar la estabilidad relativa e indicar cual es el valor de la frecuencia de Nyquist. Finalmente obtener con 'pzmap' 4 gráficos de los polos y ceros de LC y del controlador para cada frecuencia de muestreo. **Realizar los correspondientes análisis de los resultados obtenidos y expresar las respectivas conclusiones.**
- f) Seleccionar el controlador aproximado que resulte con el mejor desempeño transitorio y la mayor estabilidad relativa y a partir de su FT obtener la ecuación recursiva a diferencias finitas e implementarlo en un bloque DLL o bloque C de PSIM para comparar con las respuestas obtenidas en Matlab. Presentar de esta simulación la respuesta al escalón de la temperatura del horno y la acción de control PI, ambos en las mismas escalas que las utilizadas para las gráficas de Matlab. Corroborar mediante el contador digital y las muestras que el muestreo se realiza con el periodo correcto.
- g) En base a las magnitudes de los coeficientes de los controladores obtenidos, a las magnitudes que alcanzan las acciones de control y la variable controlada para la frecuencia de muestreo mayor, considerando que el dispositivo utilizado funciona con una aritmética de punto fijo con tamaño de palabra de 8 bits, indique en que formato Q se debe implementar el controlador simulado en PSIM. ¿Cuál sería el formato si se pasa a utilizar un procesador con ancho de palabra de 16 bits? Si se necesita incrementar la resolución para representar las variables y coeficientes, ¿qué solución propone?
- h) Rediseñar el compensador PI aproximado por *Tustin* eligiendo un valor de $T = 20$ s. A continuación, incorporar la estructura polo-cero que compensa el efecto de atraso del ZOH. Trazar en una misma gráfica las respuestas al escalón del sistema compensado en TC y del sistema compensado en TD para corroborar el efecto de esta compensación polo-cero; en otro gráfico la respuesta en frecuencia de lazo abierto del sistema compensado en TC y del sistema compensado en TD para evaluar la estabilidad relativa y, finalmente, la respuesta en frecuencia de lazo cerrado para evaluar el desempeño del sistema compensado en TC y del sistema compensado en TD. **Nota: Si la**

acción de control se incrementa indefinidamente, tener en cuenta un valor de épsilon en la FT de la compensación polo-cero para garantizar estabilidad al sistema en LC, obtener un buen seguimiento de la respuesta de TC y que la acción de control tienda al valor de equilibrio.

A partir de la FT del controlador $D(z) = G_{cd_Tustin}(z) \times C(z)$ Obtener la ecuación recursiva a diferencias finitas para realizar su implementación digital, la cual debe ser verificada con PSIM utilizándose el bloque DLL o bloque C. Graficar la respuesta de la temperatura en tiempo continuo vs la de tiempo discreto. Graficar la acción de control digital aplicada a la planta.

Segunda parte: Diseño en tiempo discreto

- a) Diseñar el compensador PI utilizando la siguiente función de transferencia, $G_{cd} = K_c \frac{z-a}{z-1}$, utilizando la técnica de reubicación de polos en el plano z y la región deseada de polos de lazo cerrado, para un $M_p \leq 5\%$ y un $t_s \leq 1500$ s. Obtener la función de transferencia muestreada de la planta mediante el comando c2d empleando el método ZOH e incorporar un polo al origen para modelar el atraso de implementación digital de 1 periodo de muestreo.
- b) Para el diseño, utilizar un periodo de muestreo obtenido con un número de muestras N_d igual a 70 y a partir de esto, presentar la región deseada de polos en lazo cerrado utilizando SISOTOOL.
- c) Si el diseño no cumple alguna de las especificaciones, realizar el ajuste correspondiente por SISOTOOL. Verificar el desempeño y márgenes de estabilidad mediante el trazado de las correspondientes respuestas al escalón y en frecuencia respectivamente. Trazar la respuesta de la acción de control.
- d) Obtener la ecuación recursiva para la implementación digital y verificar el funcionamiento en PSIM utilizándose el bloque DLL o bloque C. Graficar la respuesta de la temperatura en tiempo continuo vs la de tiempo discreto. Graficar la acción de control digital aplicada a la planta. **Nota: Recordar en la implementación digital el atraso de implementación igual a 1 periodo de muestreo. Esto significa que debe actualizarse correctamente la acción de control de acuerdo al atraso de un periodo de muestreo modelado en la planta.**