GUÍA DE TRABAJOS PRÁCTICOS Nº 4

Diseño y Simulación de Controladores en Tiempo Discreto: Rediseño Digital y Reubicación de Polos y Lugar Geométrico de las Raíces 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 domino 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 y el lugar geométrico de las raíces, 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:

<u>Problema 1</u>:

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

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

Dicho modelo térmico puede ser modelado con un equivalente eléctrico dado en la Figura 1, donde C_P = 1 F, R_P = 400 Ω y K_1 = 1,4 ºC/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 350ºC. 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.

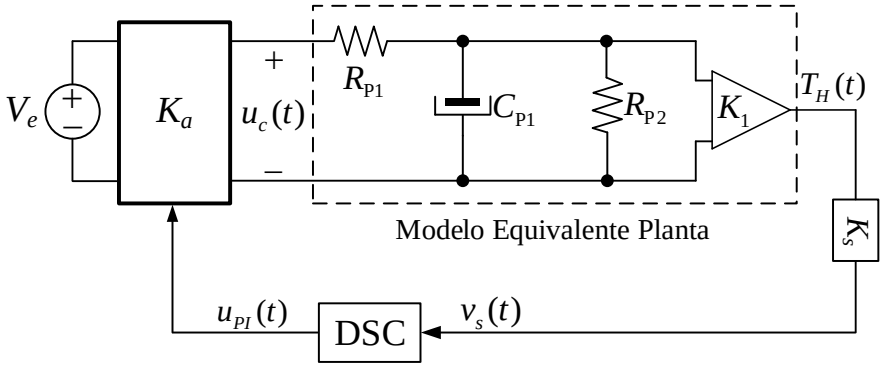


Figura 1. Esquema de control en LC del horno con actuador PWM.

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:

a) Realizar un diagrama de bloques del sistema de control teniéndose 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.

b) 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.

c) 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. **<u>Nota:</u> 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.**

<u>Problema 2</u>:

Se desea controlar a lazo cerrado la tensión de salida de un convertidor DC-DC Buck de 12 V a 5 V con potencia nominal de 25 W. Con este fin, se determinó de forma experimental la función de transferencia de dicho convertidor con una carga equivalente a la mitad de su potencia nominal, obteniendo la siguiente expresión:

$$G_p(s) = \frac{1.1498 \cdot 10^7}{s^2 + 4013s + 1.218 \cdot 10^7}$$

La ganancia del actuador es *Ka* = 12 y el sensor se implementa como un divisor resistivo que entrega 4 V cuando la salida del Buck presenta su tensión nominal. Además, se debe tener en cuenta que para el trabajo dentro del DSP se emplea un factor de normalización de *Kn* = ¼ y se

propone una frecuencia de muestreo de 40 kHz.

A desarrollar:

a) Realizar un diagrama de bloques del sistema de control teniéndose 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.

b) Verificar que la frecuencia de muestreo sea adecuada, utilizando el método de cálculo que considere apropiado.

c) Diseñar un controlador que permita eliminar el error de estado estacionario manteniendo la respuesta transitoria según $M_p \leq 15\%$ y un $t_s \leq 4$ ms mediante la región deseada de polos de lazo cerrado. 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.

e) 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.

f) Agregar al sistema compensado un controlador PD para mejorar el sobrepaso a $M_p \leq 10\%$. En simulación implementarlo como PI-D, donde la acción derivativa se calcula en función de la salida, no del error.

g) Obtener las ecuaciones recursivas para la implementación digital y verificar el funcionamiento en PSIM utilizándose el bloque DLL o bloque C, simulando primero el PI y luego el PI-D. Graficar la respuesta del sistema 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.**