

---

**GUÍA DE TRABAJOS PRÁCTICOS N° 2****Diseño y Simulación de Controladores en Tiempo Discreto: Rediseño Digital y Método del Lugar Geométrico de las Raíces (LGR).****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 por el método del LGR en el dominio 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:

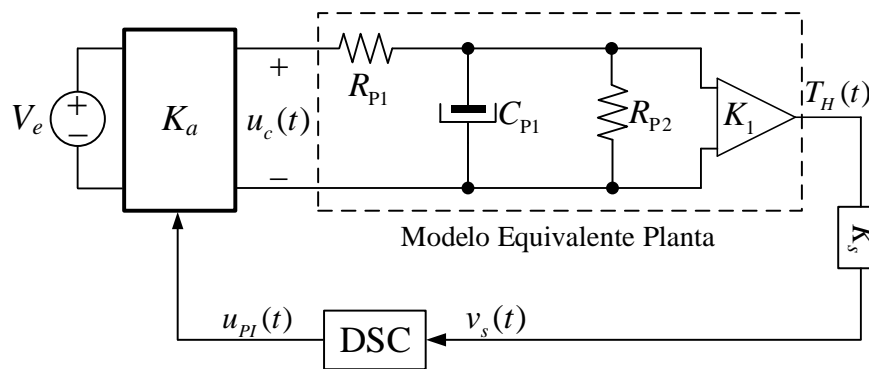
**Problema 1:**

En un laboratorio se ensaya un horno eléctrico de 32 litros 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:

$$G_p(s) = \frac{T_H(s)}{V_e(s)} = \frac{K_H}{250s + 1} \quad \text{donde } K_H = \frac{200^\circ\text{C}}{220\text{V}} \quad (1)$$

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  $K_1 = 1,3636^\circ\text{C/V}$ . La temperatura del horno es

medida con un sensor PT100 con su correspondiente acondicionador, ajustándose de tal manera que a la salida se tienen 5V para 250°C. Dicho sensor más el acondicionador está representado por el bloque  $K_s$  y la ganancia del actuador teniendo en cuenta el valor de la tensión de entrada  $V_e$  es  $K_a = 14,6667$ .



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

Se desea controlar la temperatura del horno en 150°C y que su respuesta al escalón cumpla con las siguientes especificaciones de desempeño dinámico:  $e_{ssp} = 0$ , un sobrepaso entorno al 10% y un tiempo de asentamiento  $< 900$  s. Mediante la técnica de diseño por reubicación de polos en tiempo continuo, se obtiene el siguiente controlador PI, el cual debe ser implementado en un microcontrolador:

$$G_c(s) = K_{PI} \frac{(s + z_{PI})}{s} = 3,3672 \frac{(s + 0,009922)}{s} \quad (2)$$

### Primera Parte: Rediseño Digital:

- 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.
- Seleccionar el periodo de muestreo adecuado a partir de la frecuencia de oscilación de los polos de la función de transferencia de lazo cerrado en tiempo continuo  $\omega_d$  con el controlador indicado en (2) utilizándose la relación  $T = T_d/N_d$ , siendo  $N_d$  el número de muestras necesarias para obtener el periodo de muestreo buscado. Seleccionar los siguientes 2 valores de  $N_d$ : 10 y 46 muestras y tomar el valor entero resultante para  $T$ .
- A partir del método de rediseño digital y con el periodo de muestreo obtenido en cada

caso, obtener la función de transferencia en tiempo discreto del controlador dado en (2) mediante las siguientes aproximaciones: 1) Aproximación *Backward*; 2) Aproximación *Forward*; 3) Aproximación de *Tustin* y 4) ZOH. En cada caso mostrar las expresiones finales en la forma ‘zpk’, indicando ceros y polos.

- d) Para cada aproximación del controlador (2) obtenida en el 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 periodo de muestreo 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 **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 y en otro gráfico, las respuestas en frecuencia de lazo abierto para analizar la estabilidad relativa (indicar en cada caso 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.**

- e) 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.
- f) **Cuestiones a responder:** En base a los valores de los coeficientes de los controladores obtenidos; a las magnitudes que alcanzan las acciones de control y a las frecuencias de muestreo en cada caso, proponga algún dispositivo programable en el que considere puedan implementarse estas ecuaciones a diferencia, indicando especificaciones del conversor AD (resolución, máxima frecuencia de muestreo y voltajes de operación), cantidad de bits de 1 registro de la memoria de datos y de la memoria de programa; limitar la selección a microprocesadores con unidad aritmética lógica de punto fijo. Para el dispositivo elegido, indique en que formato Q debe implementar el controlador simulado en PSIM del punto e. En base a la elección del dispositivo elegido, si resulta

necesario mejorar la precisión en la representación numérica ¿qué solución propone? Justificar todas las respuestas.

- g) Rediseñar el compensador PI aproximado por *Tustin* eligiendo ahora un número de muestras  $N_d = 30$ . 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. Comparar este último gráfico con la respuesta al escalón. **Nota: Tener en cuenta un valor de  $\epsilon$  en la FT de la compensación polo-cero para garantizar estabilidad al sistema en LC y obtener un buen seguimiento de la respuesta de TC.**

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 aproximación,  $G_{cd} = K_c (z - a)/(z - 1)$ , utilizando las condiciones de fase y magnitud del LGR en el plano  $z$ , para las mismas especificaciones de desempeño indicadas al inicio. Obtener la FT de la planta muestreada mediante un ZOH o aproximación invariante al escalón y agregar el atraso de implementación digital en la FT de la planta en TD igual a un periodo de muestreo. Presentar la región deseada de polos en lazo en cerrado utilizando SISOTOOL. Para el diseño, utilizar un periodo de muestreo obtenido con un número de muestras  $N_d$  igual a 40.
- b) Si el diseño no cumple alguna especificación, 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.

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.**

### **Problema 2:**

El modelo que relaciona la tensión de armadura con la velocidad del eje de un motor de corriente continua se presenta a continuación:

$$\frac{V_s(s)}{U(s)} = K_n K_s \frac{V_e}{V_{pp}} \frac{K_t}{JL_a s^2 + (bL_a + JR_a)s + bR_a + K_t K_b} \quad (3)$$

$K_s$  es la ganancia del sensor, con una relación de 4V para la velocidad de 856rad/s; Luego,  $K_n$  es un valor de normalización interno del DSC, de manera que 4V se representa como 1p.u. La tensión de alimentación  $V_e=12V$ ;  $V_{pp}=1$  ya que el PWM se genera de manera interna en el microcontrolador digital;  $K_t=K_b=0,0137$ ;  $J=9,95 \mu\text{Nms}^2/\text{rad}$ ;  $b=55 \mu\text{Nms}/\text{rad}$ ;  $L_a=0,0263 \text{ mH}$ ;  $R_a = 0,0788 \Omega$ ;  $T_{c_{t=0,05s}}=77\text{mNm}$ ;

Para controlar la velocidad angular del eje del motor se debe diseñar un controlador de adelanto de fase + acción integral en TD para cumplir con las siguientes especificaciones en régimen transitorio:  $e_{ssp} = 0$ ,  $t_s \leq 26\text{ms}$  y  $M_p \leq 3\%$ . La expresión del controlador será:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_{ad} \frac{(z-a)}{(z-1)(z-b)} \quad (4)$$

- Seleccionar el periodo de muestreo mediante una de las metodologías propuestas en la clase teórica empleando las especificaciones del sistema compensado.
- Obtener el lugar de raíces del sistema y marcar sobre dicho gráfico la región deseada de polos de lazo cerrado.
- Obtener el controlador a partir de las condiciones de fase y magnitud del lugar geométrico de las raíces (se puede calcular mediante cancelación polo-cero o mediante otro método). Para el diseño, considerar el atraso introducido por el cálculo de la acción de control dado por  $T_d = T$ . De manera que se debe multiplicar por  $z^{-1}$  a la función de transferencia de la planta en el dominio de TD.
- Comentar cuantas muestras resultan por periodo de oscilación de la respuesta, con el

período de muestreo seleccionado.

- e) Escribir la ecuación recursiva resultante del controlador para implementarla en una microcomputadora digital. ¿Si tuviera que utilizar el formato Q, cuál sería el formato adecuado para implementar dicha ecuación en una microcomputadora que posee una CPU de 8 bits?; si desea mejorar la resolución de las variables y coeficientes del controlador, ¿qué solución propone? ¿Cuál sería en este caso el formato Q que utilizaría?
- f) Realizar la simulación del sistema empleando el PSIM, utilizando la planta como un sistema continuo y el resto del sistema de control en TD. Utilizar el elemento ZOH como muestreador. Agregar el disturbio de carga al motor.
- g) Por otro lado, simular el sistema de control en PSIM, utilizando para el controlador un bloque DLL que incorpore el algoritmo de control, y para el modelo de la planta emplear el modelo del motor completo con el disturbio en el eje del motor.

**Graficas a realizar:**

- Respuesta al escalón unitario del sistema con y sin controlador. Analizar y comentar los resultados.
- Trazar los diagramas de Bode a LA y a LC del sistema con y sin controlador. Analizar y comentar que sucede con los márgenes de estabilidad y el desempeño transitorio y de régimen permanente.
- Graficar la acción de control del sistema digital para la señal de entrada indicada.