



Manual de Prácticas Fundamentos de Control

Secretaría/División: División de Ingeniería Eléctrica

Área/Departamento: Control y Robótica

Controlador PI Digital: Lugar Geométrico de las Raíces.

N° de práctica: 9

Tema: Controlador PI Digital: Lugar Geométrico de las
Raíces

Nombre completo del alumno		Firma
N° de brigada:	Fecha de elaboración:	Grupo:

Elaborado por:	Revisado por:	Autorizado por:	Vigente desde:
Profesor 1	Ing. Benjamín Ramírez Hernández	Dr. Paul Rolando Maya Ortiz	28 de noviembre de 2015



Manual de Prácticas Fundamentos de Control

Secretaría/División: División de Ingeniería
Eléctrica

Área/Departamento: Control y Robótica

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o Fuente de energía	Riesgo asociado
1	Tensión Continua	Daño a equipo
2	Manejo de objetos	Lesión en extremidades

2. Objetivos de aprendizaje

I. Objetivos generales: El alumno verificará experimentalmente el desempeño de una planta lineal de segundo orden con control digital PI (Proporcional Integral) por medio del método de lugar geométrico de las raíces.

II. Objetivos específicos:

- El alumno aplicará sus conocimientos sobre acciones de control básicas para analizar el desempeño de la respuesta de la planta.
- El estudiante aplicará el método de lugar geométrico de las raíces para analizar la respuesta de la planta con un controlador PI.
- El alumno aprenderá a utilizar el módulo G26.

3. Introducción

El lugar geométrico de las raíces (LGR) es un método gráfico que facilita el análisis y diseño de los sistemas de control. Este método permite observar la ubicación posible en el plano de Laplace o en el plano complejo (caso discreto) de los polos en lazo cerrado de un sistema de control para variaciones de una ganancia o un parámetro. La gráfica del LGR que permite analizar las propiedades de respuesta transitoria, error en estado permanente y estabilidad para un sistema en lazo cerrado.

El lugar geométrico de las raíces puede bosquejarse de manera aproximada utilizando las reglas de Evans. También es posible utilizar programas de cómputo como Matlab para obtener dichas gráficas.



Manual de Prácticas Fundamentos de Control

Secretaría/División: División de Ingeniería Eléctrica

Área/Departamento: Control y Robótica

Para el trazo del LGR se utiliza la función de transferencia en lazo abierto. Por ejemplo, en el sistema en lazo cerrado mostrado en la Fig. 1 se utiliza la función de lazo abierto $G_C(s)G_P(s)H(s)$.

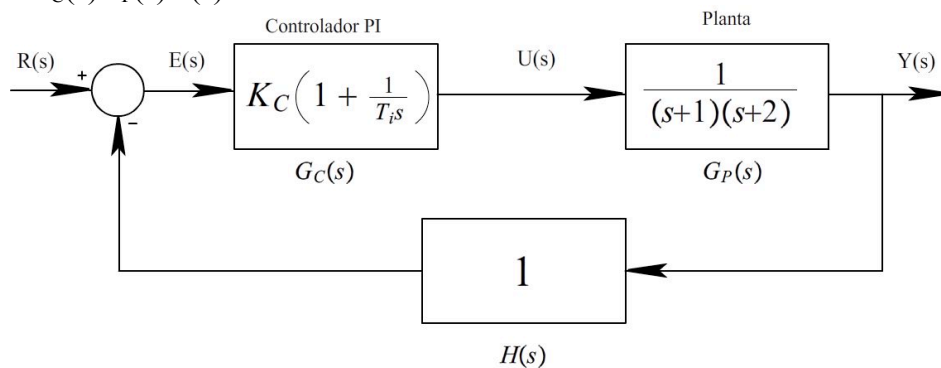


Fig. 1

La siguiente secuencia de comandos en Matlab obtiene la gráfica del lugar geométrico de las raíces para el sistema en lazo cerrado mostrado en la Fig. 1, considerando el tiempo integral $T_i = 0.2$ segundos:

```
num=[1 5]; % Declara el numerador de la función de transferencia.
den=[1 3 2 0]; % Declara el denominador de la función de transferencia.
FunTC=tf(num,den) % Forma la función de transferencia con num y den.
figure(1) % Declara la una ventana para poner una figura.
rlocus(FunTC) % Obtiene la gráfica del LGR para la función FunTC.
grid % Coloca una rejilla en la gráfica.
FunTD=c2d(FunTC,0.2) % Discretiza la función FunTC con un periodo de muestreo
% de 0.2 segundos.
figure(2) % Declara la ventana para poner una segunda figura.
rlocus(FunTD) % Obtiene el LGR para la función de transferencia FunTD.
xlim([-1 1]); ylim([-1 1]) % Pone los límites de la gráfica.
Zgrid % Agrega una rejilla a la gráfica.
```

Se obtienen las gráficas del lugar geométrico de las raíces en el dominio de la frecuencia (Laplace) y el dominio discreto que se muestran en las Figs. 2 y 3.



Manual de Prácticas Fundamentos de Control

Secretaría/División: División de Ingeniería Eléctrica

Área/Departamento: Control y Robótica

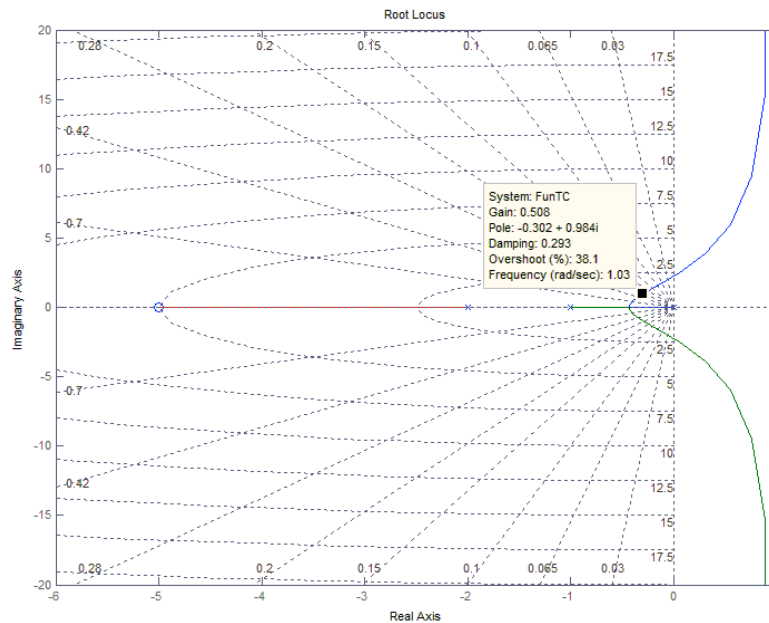


Fig. 2. Lugar geométrico de las raíces para el sistema de la Fig. 1

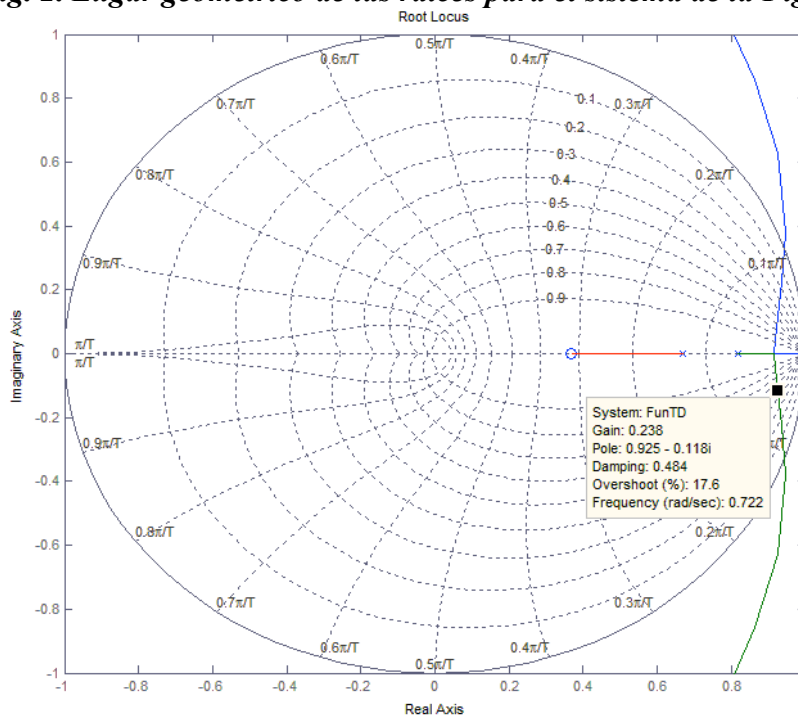


Fig. 3. Lugar geométrico de las raíces discreto para el sistema de la Fig. 1



Manual de Prácticas Fundamentos de Control

Secretaría/División: División de Ingeniería Eléctrica

Área/Departamento: Control y Robótica

Es posible recorrer las ramas del LGR en frecuencia o discreto por medio de la herramienta “Data Cursor” y observar los parámetros de factor de amortiguamiento relativo ξ (damping), ganancia proporcional K_c (Gain), sobrepaso máximo en porcentaje $\%M_p$ (overshoot) y frecuencia natural ω_n (frequency) para diferentes ubicaciones de los polos en lazo cerrado del sistema. Estos parámetros permiten obtener el comportamiento de la respuesta transitoria, error en estado permanente y estabilidad necesarios para el diseño del sistema de control.

3.1 Controlador PI digital

El controlador $G_c(z)$ de tipo proporcional integral (PI) se obtiene con una aproximación rectangular en atraso a partir de su definición continua de acuerdo con la ecuación:

$$G_c(z) = K_c \left(\frac{T_i + T}{T_i} \right) \left(\frac{z - \left(\frac{T_i}{T_i + T} \right)}{z - 1} \right) \quad (1)$$

En la Fig. (4) se muestra el lazo de control digital con el controlador PI $G_c(z)$ y la planta $G_p(z)$ que se formará por medio del módulo simulador de procesos G26 donde se implementará un sistema con función de transferencia (2):

$$G_p(s) = \left(\frac{1}{s+1} \right) \left(\frac{\frac{1}{0.7}}{s + \frac{1}{0.7}} \right) = \frac{1.42}{(s+1)(s+1.42)} \quad (2)$$

La discretización $G_p(z)$ de la ecuación (3) se obtiene por medio de la aproximación del retenedor de orden cero (ROC) a partir de la función de transferencia (2):

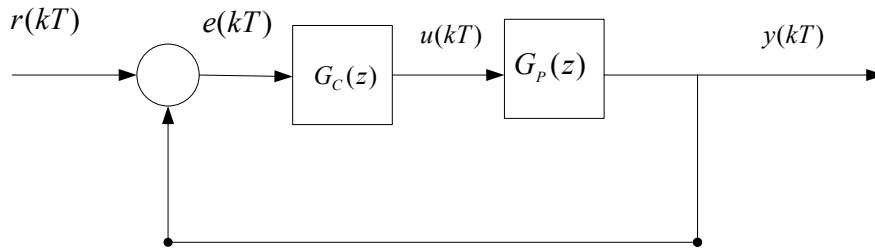


Fig. 4. Sistema de control discreto

$$G_p(z) = \frac{0.00659(z + 0.92223)}{(z - 0.9048)(z - 0.8668)} \quad (3)$$



Manual de Prácticas Fundamentos de Control

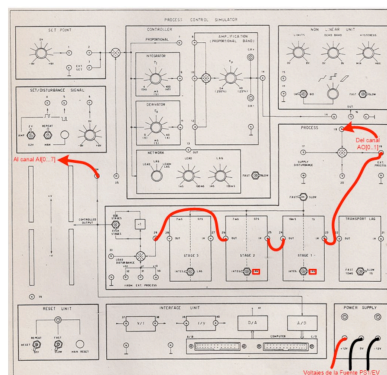
Secretaría/División: División de Ingeniería Eléctrica

Área/Departamento: Control y Robótica

4. Material y Equipo



Tarjeta de adquisición de datos PCI 6221M



Planta experimental tipo continuo G26 con cables de conexión



Computadora personal con software Labview y controlador PI digital



Cables BNC-banana

Fig. 5. Material y equipo

5. Desarrollo

I. Actividad 1

Realice las conexiones que se indican a continuación y verifique que correspondan con las mostradas en la Fig. 6:

- Conectar los voltajes de polarización de +12 [V], 0 [V] y -12 [V] para el módulo G26 con la fuente PS1/EV



Manual de Prácticas Fundamentos de Control

Secretaría/División: División de Ingeniería Eléctrica

Área/Departamento: Control y Robótica

- Conectar el borne 18 del módulo G26 con el canal D/A elegido en la ventana del programa para el controlador a emplear (AO0 ó AO1) de la tarjeta de adquisición de datos PCI-6221M
- Conectar en el módulo G26 los bornes 19 y 23
- Conectar en el módulo G26 los bornes 24 y 25
- Conectar en el módulo G26 los bornes 26 y 29
- Conectar el borne 34 del módulo G26 con el canal A/D elegido en la ventana del programa para el controlador a emplear (AI0 ó AI1 ó AI2 ó ... ó AI7) de la tarjeta de adquisición de datos PCI-6221M
- Los interruptores de los bloques STAGE 1 y STAGE 2 deberán estar en la posición LAG para que tengan como constantes de tiempo 1 [s] y 0.7 [s] respectivamente.

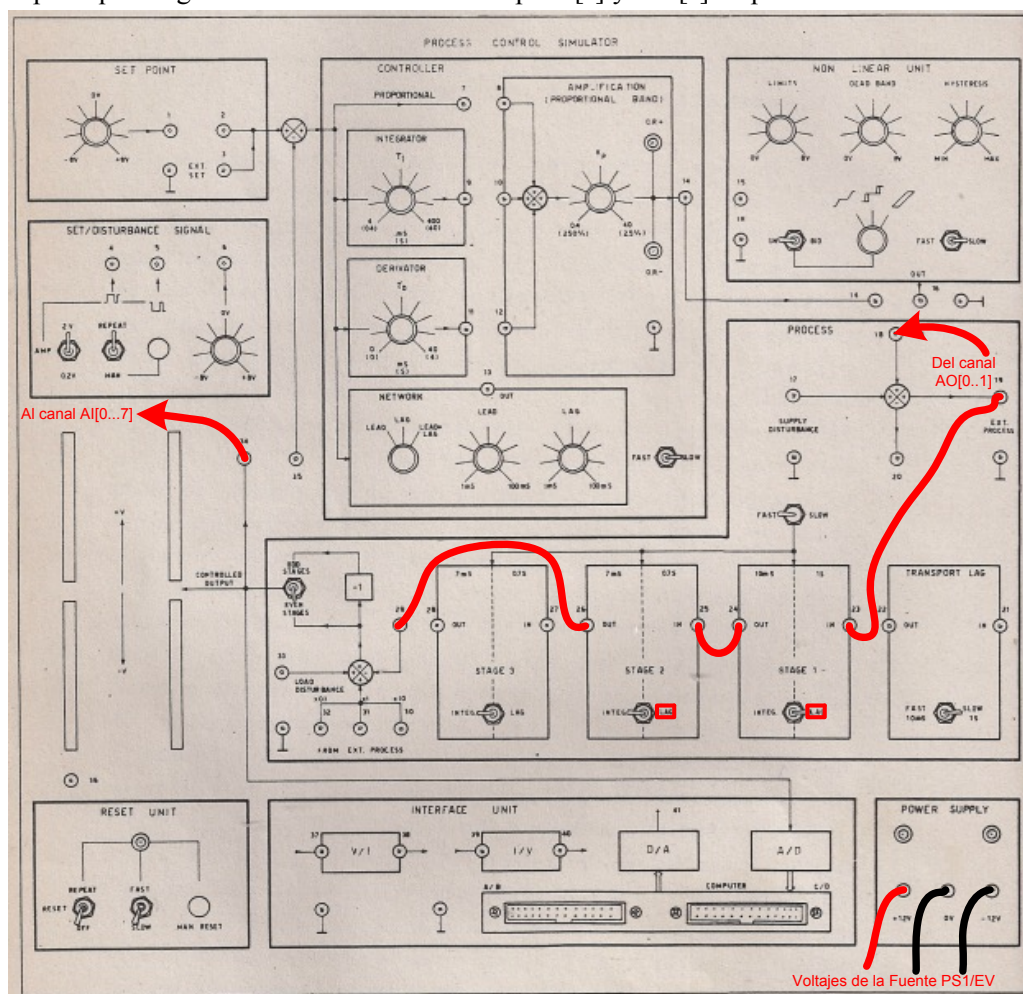


Fig. 6. Módulo simulador de procesos G26



Manual de Prácticas Fundamentos de Control

Secretaría/División: División de Ingeniería Eléctrica

Área/Departamento: Control y Robótica

II. Actividad 2

Busque el programa llamado Prácticas de Laboratorio y ejecute el controlador digital *PI discreto*. El proceso a controlar está definido por la ecuación (2) la cual se implementará en el módulo simulador G26. El controlador *PI discreto* presenta el panel de control mostrado en la Fig. 7, cuyos principales elementos se mencionan en la Tabla 1.

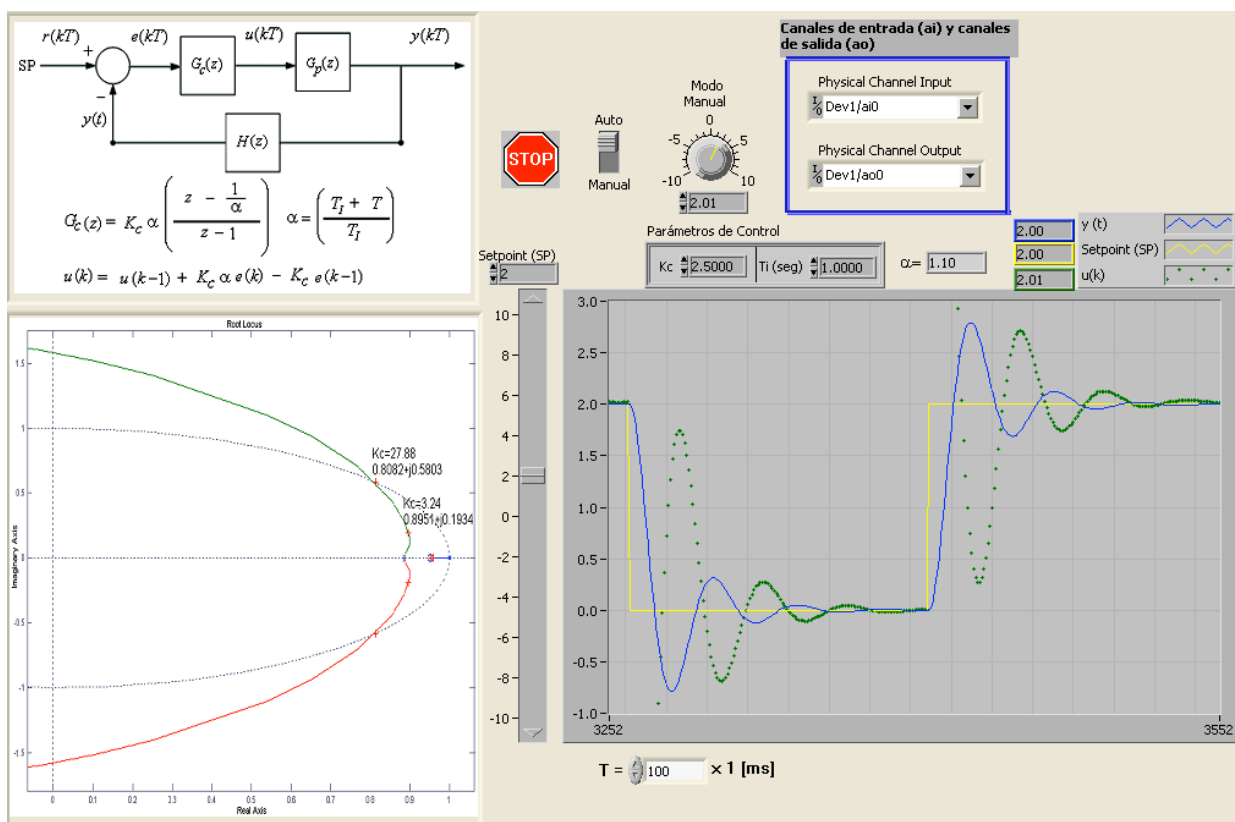


Figura 7. Panel de control *PI discreto*



Manual de Prácticas Fundamentos de Control

Secretaría/División: División de Ingeniería Eléctrica

Área/Departamento: Control y Robótica

El panel de control tiene los elementos siguientes:

Designación	Función	Comentarios
Canales de entrada (ai) y canales de salida (ao)	Definen los canales A/D y D/A para adquisición de datos que se emplean para las señales del proceso: Dev1/ai0...dev1/ai7 (8 canales) Dev1/ao0...dev1/ao1 (2 canales)	Dev1 es el nombre asociado en el sistema operativo a la tarjeta de adquisición de datos PCI-6221M
Multiplicador de la base de tiempo T	Asigna el multiplicador para la base de tiempo de 1 mseg	El multiplicador y la base de tiempo determinan el período de muestreo T
Selector Auto-Manual	Intercambia el modo de operación entre manual (lazo abierto) y automático (lazo cerrado)	
Ajuste del control manual	Ajusta del valor de la señal de control en el modo manual	El valor de la señal de control puede cambiarse por medio de la perilla o en la ventana numérica
Ajuste de la referencia <i>Set point (SP)</i>	Ajusta del valor de la referencia en el modo automático	El valor de la señal de control puede cambiarse por medio de control deslizable o en la ventana numérica
Despliegue gráfico y numérico de 3 variables: <ul style="list-style-type: none"> Salida $y(t)$ Referencia SP Señal de control $u(t)$ 	Se despliegan las gráficas de las variables en color azul, amarillo y verde respectivamente. El número de puntos en el eje horizontal es importante para determinar la escala de tiempo.	El usuario tiene la opción de cambiar algunos elementos del despliegue, incluso el número de puntos.
Parámetros de control K_c y T_i	Ventana para el ajuste de los parámetros de ganancia K_c y la constantes de tiempo T_i	

NOTA: Verificar en el módulo G26 que la señal de salida del borne 34 no esté invertida. Para ello mover el interruptor ODD STAGES/EVEN STAGES del módulo a la posición en donde la salida sea la correcta. Esto se verifica en la ventana del controlador a usar, mediante el selector "Auto-Manual" llevándolo a la posición Manual. Posteriormente se debe manipular el potenciómetro virtual "Modo Manual" en el mismo programa en ejecución en donde el resultado deberá ser que en el despliegue gráfico en la ventana del controlador la señal de salida del módulo G26 (borne 34) que está graficada en color azul, reaccione en el mismo sentido que la señal verde (señal generada por el potenciómetro virtual "Modo Manual").



Manual de Prácticas Fundamentos de Control

Secretaría/División: División de Ingeniería Eléctrica

Área/Departamento: Control y Robótica

Tabla 1. Elementos de la interfaz gráfica del controlador PI discreto.

Configurar la operación del controlador digital en el modo PI, de acuerdo con la pantalla mostrada en la figura (7). El periodo de muestreo es $T = 0.1 \text{ seg}$, y el tiempo integral es $T_i = 2 \text{ seg}$. En la gráfica, el eje de tiempo debe ajustarse para 200 puntos (20 segundos) y el eje vertical en el rango 0 a 3.

III. Actividad 3

- Introducir al sistema los parámetros $K_C = 1$ y $T_i = 2$.
- A partir de **Set point** = 1, aplicar un **incremento** = 1.
- Observar la respuesta $y(t)$ en la pantalla de operación.
- Deberá verificarse que las características dinámicas de sobrepaso máximo M_s y tiempo de asentamiento t_s de la respuesta física son aproximadas a las calculadas en el cuestionario previo.
- ¿El valor del error de estado estable en porcentaje observado en la gráfica $y(t)$ coincide con el valor teórico del cuestionario previo?
- Dejando fijo $T_i = 2$, introducir alternativamente los parámetros $K_C = 2, 3$ y 4 y repetir los incisos anteriores.



Manual de Prácticas

Fundamentos de Control

Secretaría/División: División de Ingeniería Eléctrica

Área/Departamento: Control y Robótica

6. Conclusiones

This image shows a blank sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

7. Bibliografía

- ❖ Nise, S. Norman: *Sistemas de Control para Ingeniería*. Tercera Edición. Ed. CECSA, México, 2004.
- ❖ Kuo, Benjamin C.: *Sistemas de Control Automático*. Séptima Edición. Ed. Pearson-Prentice Hall, México.
- ❖ Ogata, K.: *Ingeniería de Control Moderna*. Tercera Edición. Ed. Prentice Hall. México, 1998.