

Facultad: Ingeniería.

Escuela: Electrónica.

Asignatura: Sistemas de Control Automático.

Lugar de ejecución: Instrumentación y Control (Edificio 3, 2da planta).

Controladores tipo P, PI y PID

Objetivos específicos

- Demostrar la operación de los controladores P, PI y PID.
- Identificar las características de cada controlador a partir de la respuesta de salida de la planta.
- Ajustar y calibrar un controlador tipo PID a partir del método de Ziegler-Nichols.

Materiales y equipo

- 1 COMPUTADORA CON MATLAB Y SIMULINK.
- 1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN 15 VCD [SO3538-8D].
- 1 REFERENCIA DE VOLTAJE [SO3536-5A].
- 1 CONTROL PID [SO3536-6B].
- 1 AMPLIFICADOR DE POTENCIA [SO3536-7Q].
- 1 SISTEMA CONTROLADO DE TEMPERATURA [SO3536-8T].
- 1 GRAFICADOR X-Y Y-t (PLOTTER).
- 20 PUENTES.
- 1 SWITCH.
- 3 CABLES.
- 5 HOJAS DE PAPEL MILIMETRADO (El estudiante debe traerlas).

Introducción teórica

Un sistema de control puede ser representado gráficamente por un diagrama de bloques, tales diagramas de bloques indican la interrelación existente entre los distintos componentes del sistema.

En un diagrama de bloques, todas las variables del sistema se enlazan entre si por medio de bloques funcionales. El bloque funcional, o simplemente bloque, es un símbolo de la operación matemática que el sistema produce a la salida sobre la señal de entrada. Una flecha hacia adentro del bloque indica la entrada y la que se aleja del bloque indica la salida. Debe notarse que la magnitud de la señal de salida del bloque será la señal de entrada multiplicada por la función de transferencia del bloque.

Un componente importante dentro de un diagrama de bloques es el denominado punto de suma (Figura 6.1). Su símbolo, un círculo con una cruz, indica la operación suma. El signo “+” ó “-” expresa si la señal ha de sumarse o restarse.

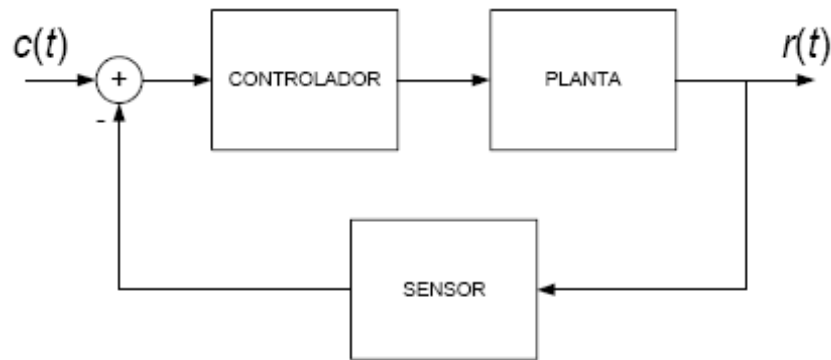


Figura 6.1. Diagrama de bloques de un sistema de control típico.

En controles industriales es muy común encontrar los siguientes 5 tipos de reguladores:

- Dos posiciones (ON-OFF).
- Proporcional (P).
- Proporcional-Integral (PI).
- Proporcional-Derivativo (PD).
- Proporcional Integral Derivativo (PID).

Control Proporcional.

La función de transferencia entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

Donde K_p se denomina ganancia proporcional.

Otro parámetro importante en la acción de este controlador, es la denominada banda proporcional que expresa que tan grande será la acción de control ante una señal de error en la entrada, y es igual a:

$$B_p = \frac{1}{K_p}$$

Control Proporcional – Integral.

El valor de salida del controlador proporcional varía en razón proporcional al tiempo en que ha

permanecido el error y la magnitud del mismo, su función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} \right)$$

Donde K_P es la ganancia proporcional y T_N se denomina tiempo de acción integral. Ambos valores son ajustables. El tiempo integral regula la velocidad de acción de control, mientras que una modificación en K_P afecta tanto a la parte integral como a la parte proporcional de la acción de control.

Control Proporcional – Derivativo.

Por lo general, una gran pendiente en $e(t)$ en un sistema lineal correspondiente a una entrada escalón considerable produce un gran sobreimpulso en la variable controlada. El control derivativo mide la pendiente instantánea de $e(t)$, prediciendo que tan grande será el sobreimpulso aplicando las correcciones apropiadas antes de que se presente ese sobreimpulso. La función de transferencia del control PD es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P (1 + T_V \cdot s)$$

Donde T_V se denomina duración predicha.

Control Proporcional – Integral – Derivativo.

Esta combinación tiene la ventaja de que cada una de las tres acciones de control son individuales. La función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + T_V \cdot s \right)$$

Calibración de Controladores.

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador para que el sistema cumpla con las especificaciones de diseño se conoce como calibración o ajuste del controlador. Las reglas de Ziegler-Nichols sugieren un método para afinar controladores PID basándose en la respuesta experimental ante una señal escalón de entrada. La regla de Ziegler-Nichols es muy conveniente cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas.

La respuesta de salida de sistemas de orden superior, por lo general, ante un escalón y en lazo abierto es una curva en forma de S que puede caracterizarse por dos parámetros: el tiempo muerto T_U y la constante de tiempo T_g . El tiempo muerto o de atraso y la constante de tiempo se determinan trazando una línea tangente a la curva en forma de S en el punto de inflexión y se encuentran las intersecciones de esta línea tangente con el eje del tiempo y con la línea $c(t) = K$.

Ziegler-Nichols sugiere fijar los valores de K_p , T_N y T_V de acuerdo a la siguiente tabla:

Tipo de controlador	K_p	T_N	T_V
P	$T_g/(T_u \cdot K_S)$		0
PI	$(0.9T_g)/(T_u K_S)$	$T_u/0.3$	0
PID	$(1.2T_g)/(T_u K_S)$	$2T_u$	$0.5T_u$

Tabla 6.1. Método de calibración de controladores de Ziegler-Nichols a lazo abierto.

El Control PID utilizado en el laboratorio es el SO3536-6B que está representado en la siguiente figura:

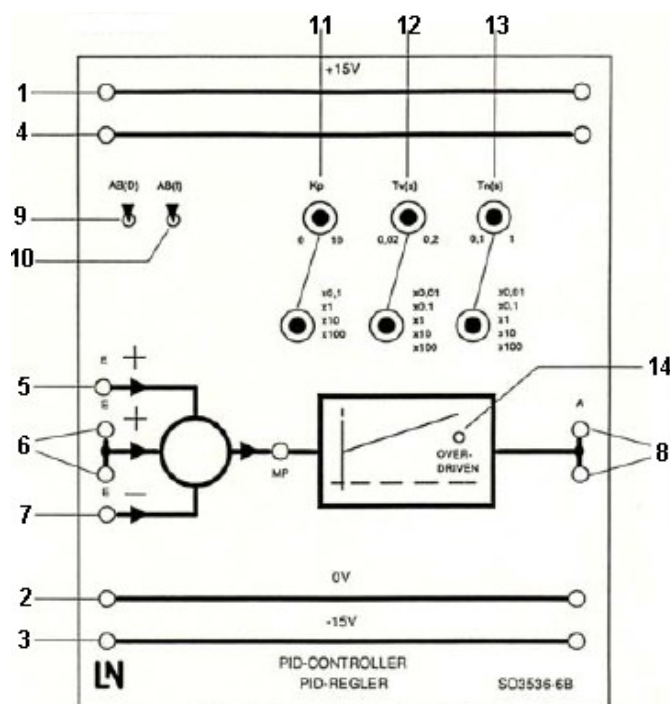


Figura 6.2 Control PID del laboratorio.

Conexiones y Controles

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1. Voltaje de operación, +15V | 8. Salida del controlador |
| 2. Voltaje de operación, 0V | 9. Interruptor de la sección D |
| 3. Voltaje de operación, -15V | 10. Interruptor de la sección I |
| 4. Conexión de paso | 11. Controles de escala y ajuste fino de K_p |
| 5. Entrada de Setpoint, 10V | 12. Controles de escala y ajuste fino de T_V |
| 6. Entrada de Setpoint, 10V | 13. Controles de escala y ajuste fino de T_N |
| 7. Entrada de valor actual, 10V | 14. Indicador de saturación |

Los métodos de optimización de un controlador en un sistema de control de lazo cerrado deben ser lo más directos que sea posible. Las recomendaciones de Ziegler-Nichols o Chiens & Reswick son, por ejemplo, muy simples y por eso ampliamente usadas

Sin embargo, estas recomendaciones asumen una combinación especial de las secciones P, I y D del elemento de control: Esta combinación es así llamada “Controlador Técnico” Cuyo diagrama se muestra a continuación.

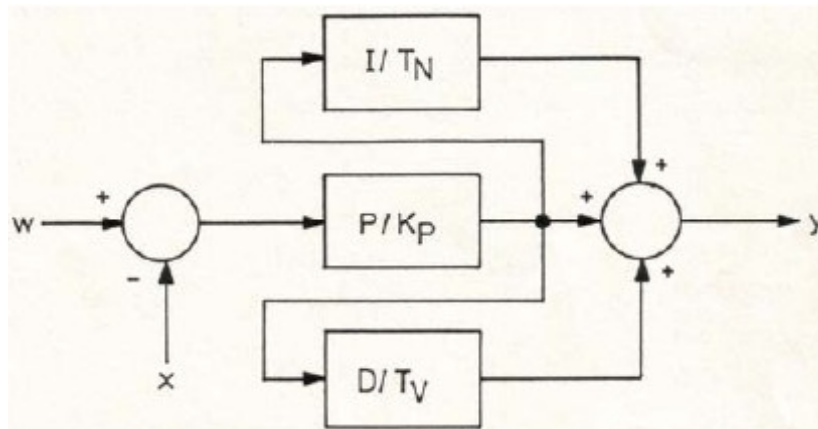


Figura 6.3. Controlador técnico

Los parámetros de ajuste para el controlador técnico son:

K_p = Coeficiente proporcional

T_V = Duración de pre-mantenimiento

T_N = Tiempo de acción integral

Hay también un tipo alternativo de controlador, para entrenamiento básico y avanzado, el cual es llamado “Controlador matemático”. Este controlador tiene los mismos elementos de función que el

controlador técnico, pero la combinación de las secciones P, I y D es diferente.

En la siguiente figura se presenta la configuración del controlador matemático.

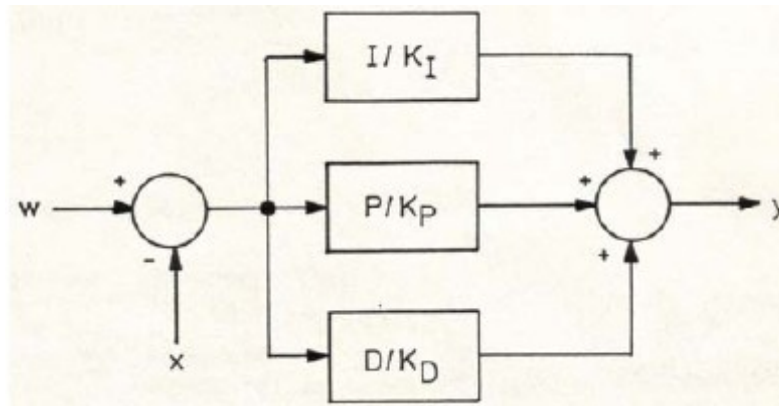


Figura 6.4. Controlador matemático

Los parámetros de ajuste para el controlador matemático son:

K_P = Coeficiente proporcional

K_D = Coeficiente diferencial

K_I = Coeficiente integral

La relación entre T_V y K_P , o T_N y K_I , es:

$$T_V = \frac{K_D}{K_P} \quad \text{y} \quad T_N = \frac{K_P}{K_I}$$

La función de transferencia para el controlador que se encuentra en el laboratorio es la misma que para un controlador PID general, la cual es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + T_V \cdot s \right)$$

La cual puede ser reescrita para un controlador matemático de la siguiente manera:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s$$

Procedimiento

Nota:

Lea la guía de laboratorio antes de realizar los procedimientos. Esto le ayudará a clarificar el objetivo perseguido, así como le ahorrará tiempo al ejecutar la práctica, un grupo de alumnos iniciará la parte I a la IV y el otro grupo en la parte V, luego se intercambian.

PARTE I CONTROL P EN UN SISTEMA DE TEMPERATURA

1. Arme el sistema de temperatura que se muestra en la Figura 6.5, deje el SWITCH #1 abierto.

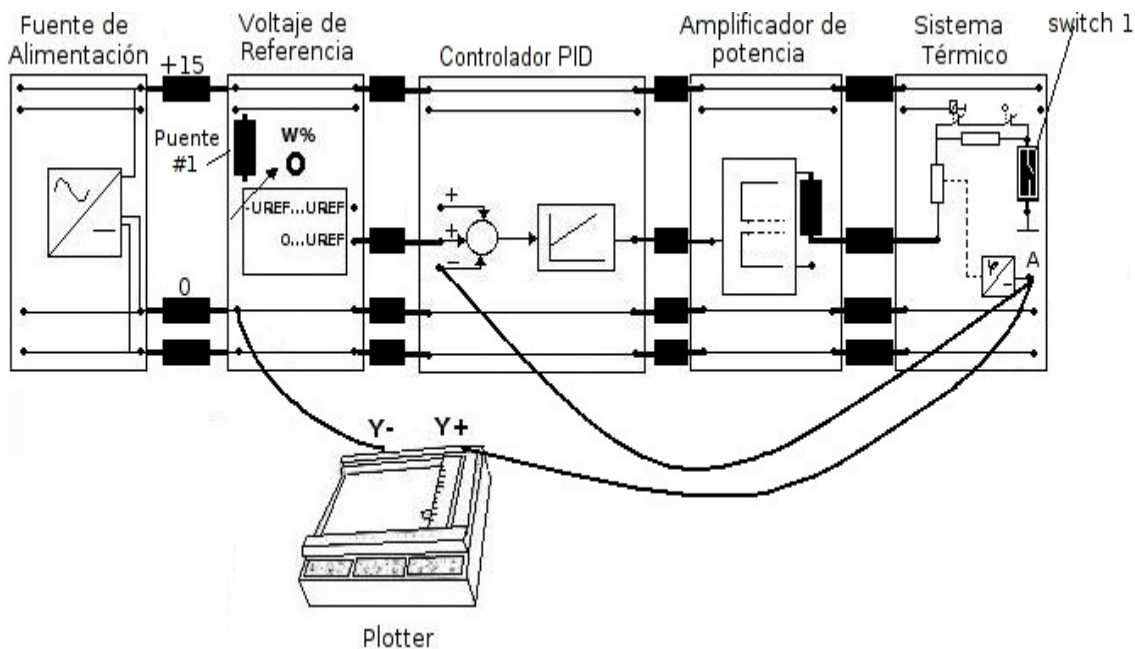


Figura 6.5. Sistema de temperatura a lazo cerrado

2. Reduzca al mínimo las perillas tanto del voltaje de referencia (SET POINT) como todas las del controlador PID (K_P , $T_V(s)$ y $T_N(s)$ y las de sus respectivas escalas).
3. Los interruptores de la parte superior del controlador PID ($AB(D)$ y $AB(I)$) deben estar hacia arriba, ya que por el momento solo se utilizará el controlador proporcional.
4. Trace la gráfica de referencia de 0 grados, luego encienda la fuente y trace la gráfica de temperatura ambiente.
5. Ajuste $\%W$ del módulo de referencia de voltaje al 100% y K_P del módulo PID a 1, para ello mueva la perilla a la línea de 1 y coloque la escala X1.
6. **Coloque el selector de la escala del tiempo del plotter a 10 s/cm** y trace la gráfica de respuesta del sistema, (no olvide dejar que la pluma recorra uno o dos centímetros antes de cerrar el SWITCH # 1). cuando la temperatura se estabilice introduzca una perturbación

constante, cerrando el interruptor que cortocircuita la resistencia en el sistema. Calcule el error de desviación de la temperatura: _____

7. Abra el SWITCH # 1 y el interruptor que cortocircuita la resistencia y deje que el sistema vuelva a temperatura ambiente y luego ajuste K_P a 2 (perilla en la línea de 2 y coloque la escala X1) y repita el paso 6. Calcule el error de desviación de la temperatura y concluya acerca de la banda proporcional para este sistema: _____

PARTE II CONTROL PI EN UN SISTEMA DE TEMPERATURA

8. Abra el SWITCH # 1 y el interruptor que cortocircuita la resistencia y deje que el sistema vuelva a temperatura ambiente. Baje el interruptor AB(I) para activar el controlador PI y realice los siguientes ajustes:

$\%W$ del módulo de referencia de voltaje = 80%

$K_P = 2$ (perilla en la línea de 2 y en escala X1)

$T_N = 9$ s (perilla en la línea de 0.9 y en escala x10)

9. Apague la fuente y trace la gráfica de referencia de 0 grados, luego enciéndala y trace la gráfica de temperatura ambiente.
10. Coloque el selector de la escala del tiempo del plotter a 10 s/cm y trace la gráfica de respuesta del sistema, (no olvide dejar que la pluma recorra uno o dos centímetros antes de cerrar el SWITCH # 1). cuando la temperatura se estabilice introduzca una perturbación constante, cerrando el interruptor que cortocircuita la resistencia en el sistema.
¿Qué puede concluir de acerca del uso del control PI?

11. Abra el SWITCH # 1 y el interruptor que cortocircuita la resistencia y deje que el sistema vuelva a temperatura ambiente y luego disminuya T_N a 3 s (perilla en la línea de 0.3 y en escala x10) y repita el paso 10. ¿Que cambió observa con respecto a la respuesta anterior?

PARTE III CONTROL PID EN UN SISTEMA DE TEMPERATURA

12. Abra el SWITCH # 1 y el interruptor que cortocircuita la resistencia y deje que el sistema vuelva a temperatura ambiente. Baje tanto el interruptor AB(I) y AB(D) para activar el controlador PID y realice los siguientes ajustes:

$\%W$ del módulo de referencia de voltaje = 80%

$K_P = 2$ (perilla en la línea de 2 y en escala X1)

$T_V = 1$ s (perilla en la línea de 0.1 y en escala X10)

$T_N = 0.7$ s (perilla en la línea de 0.7 y en escala X1)

13. Apague la fuente y trace la gráfica de referencia de 0 grados, luego enciéndala y trace la gráfica de temperatura ambiente.
14. Coloque el selector de la escala del tiempo del plotter a 10 s/cm y trace la gráfica de respuesta

del sistema, (no olvide dejar que la pluma recorra uno o dos centímetros antes de cerrar el SWITCH #1) ¿Es estable el sistema bajo estas condiciones? _____

15. Aumente **TN** a 7 s (perilla en la línea de 0.7 y en escala X10) y mantenga los valores de **KP** y **TV** ¿Es más estable ahora el sistema? _____, Si es más estable ¿a qué se debe esto? _____

PARTE IV CALIBRACIÓN DE UN CONTROLADOR PID CON EL MÉTODO DE ZIEGLER NICHOLS DE LAZO ABIERTO.

16. Abra el SWITCH #1 y deje que el sistema vuelva a la temperatura ambiente
17. Apague la fuente y abra el lazo de control, desconectando de la entrada negativa del punto suma el cable que va al transductor y conectándolo a tierra.
18. Reduzca al mínimo las perillas tanto del voltaje de referencia (SET POINT) como todas las del controlador PID (**KP**, **TN(s)** y **TV(s)** y las de sus respectivas escalas) y coloque los interruptores de la parte superior del controlador PID AB(D) y AB(I) hacia arriba.
19. Trace la gráfica de referencia de 0 grados, luego encienda la fuente y trace la gráfica de temperatura ambiente.
20. Coloque el selector de la escala del tiempo del plotter a 10 s/cm, coloque %W del módulo de referencia de voltaje al 100% y **KP** a 1 y trace la gráfica de respuesta del sistema, (no olvide dejar que la pluma recorra uno o dos centímetros antes de cerrar el SWITCH # 1). deje que se estabilice la temperatura.
21. Abra el SWITCH #1 y deje que el sistema vuelva a la temperatura ambiente.
22. En la gráfica obtenida indique el punto de inflexión en la respuesta transitoria y trace una recta tangente a ese punto, a continuación mida el tiempo muerto y la constante de tiempo del sistema como se indica en la siguiente Figura 6.6

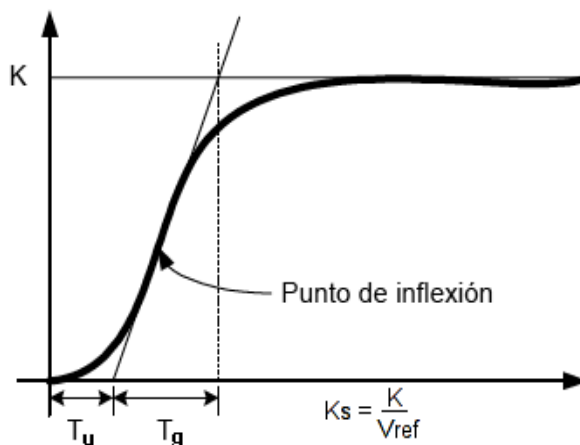


Figura 6.6. Determinación de T_u , T_g y K_s de la respuesta de la planta a lazo abierto.

23. Calcule la ganancia proporcional y los tiempos de acción integral y de duración predicha para el controlador PID como se muestra en la Tabla 6.1 de la introducción teórica.

$KP =$ _____, $TN =$ _____, $TV =$ _____

24. Cierre de nuevo el lazo de control y calibre el controlador PID con estos valores, (no olvide activar los interruptores AB(I) y AB(D) del controlador PID) y trace la gráfica de respuesta del sistema, (no olvide dejar que la pluma recorra uno o dos centímetros antes de cerrar el SWITCH # 1). deje que se estabilice la temperatura. ¿Según la gráfica obtenida que concluye acerca de la calibración del controlador PID que realizó? _____
25. Reduzca al mínimo las perillas tanto del voltaje de referencia (SET POINT) como todas las del controlador PID (KP, TV(s) y TN(s) y las de sus respectivas escalas) también coloque hacia arriba los interruptores AB(I) y AB(D) del controlador PID, apague los equipos y desconecte el sistema.

PARTE V SIMULACION

A. CONDICION DE LAZO ABIERTO

26. Abra el programa Matlab y digite el comando **simulink**, se abrirá la ventana del buscador de librerías de Simulink que se muestra en la Figura 6.7

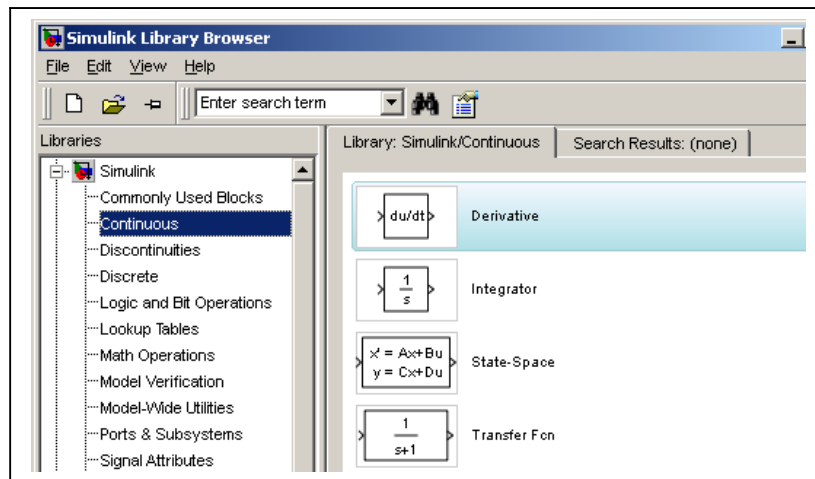


Figura 6.7 Buscador de Librerías de Simulink

27. De clic en el menú "File", "new" y seleccione "Model"
28. Cree el sistema que se muestra en la Figura 6.8, arrastrando los elementos que se muestran en el buscador de librerías a la ventana del modelo, en la Tabla 6.2 se encuentran las librerías donde están los elementos del sistema, para unir los elementos haga clic en los conectores que tienen los elementos, arrastre el cursor hasta el otro elemento a conectar y luego suelte.

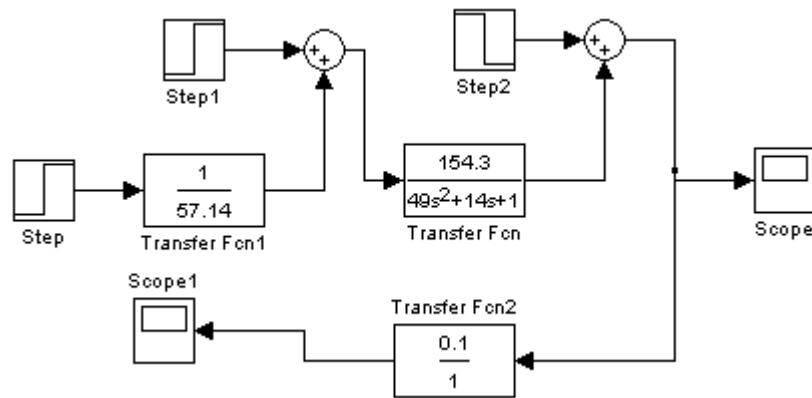


Figura 6.8 Modelo de una planta en configuración de lazo abierto.

Elemento	Librería
Transfer Fcn	Continuous
Step	Sources
Sum	Math Operations
Scope	Sinks

Tabla 6.2


El modelo de la Figura 6.9 corresponde a un control de temperatura. En el módulo “scope” se gráfica temperatura vrs. Tiempo y en el módulo “step” se define el valor de referencia. Los módulos “step1” y “step2” representan perturbaciones de corriente y temperatura respectivamente. El módulo “TransferFcn2” representa al transductor para la medición de la temperatura.

29. Para acceder a los parámetros de configuración de los elementos haga doble clic sobre ellos y cambie lo siguiente:
- Módulo “step”:
 - Step time: 0
 - Initial value: 0
 - Final value: 10 (voltios)
 - Módulo “step1”:
 - Step time: 150 (seg)
 - Initial value: 0
 - Final value: 0.045 (amperios)
 - Módulo “step2”:
 - Step time: 300 (seg)
 - Initial value: 60 (grados)
 - Final value: 50 (grados)
 - Módulo “Transfer Fcn”:
 - Numerator Coefficient: [154.3]
 - Denominator Coefficient: [49 14 1]
 - Módulo “Transfer Fcn1”:
 - Numerator Coefficient: [1]
 - Denominator Coefficient: [57.14]
 - Módulo “Transfer Fcn2”:
 - Numerator Coefficient: [0.1]
 - Denominator Coefficient: [1]

30. Para cambiar los parámetros de la simulación, haga clic en el menú “simulation” de la ventana del modelo, luego de un clic en “Configuration Parameters” y cambie lo siguiente:

Start Time: 0

Stop Time: 450 (seg)

31. Presione el botón OK y corra la simulación, dando clic en el menú “simulation” y luego en “start”, abra los elementos “scope” para ver las gráficas, presione el botón Autoscale que tiene la siguiente forma  si fuera necesario.

32. Explique el comportamiento de la temperatura

B. CONDICION DE LAZO CERRADO

33. Armar en simulink el sistema mostrado en la Figura 6.9.

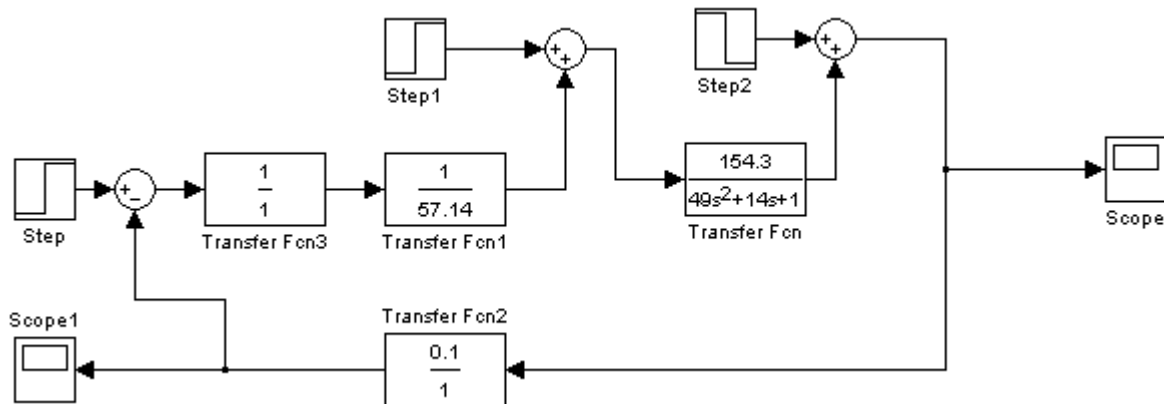


Figura 6.9 Modelo de una planta con retroalimentación.

34. De doble clic en el primer punto suma y en la pestaña “Main” en “List of Signs” cambie el segundo signo “+” por un signo “-”

i) Control proporcional

35. Correr la simulación varias veces predisponiendo el módulo “Transfer Fcn3” con valores constantes (independientes de s) iguales a 1, 10 y 100 respectivamente

36. Describir en cada caso el comportamiento de la temperatura y comparar con la condición de lazo abierto

ii) Control proporcional integral

37. Correr la simulación varias veces predisponiendo el módulo “Transfer Fcn3” con las siguientes funciones:

$$\frac{100s+10}{s}$$

(a)

$$\frac{10s+10}{s}$$

(b)

$$\frac{5s+0.2}{s}$$

(c)

38. Describir en cada caso el comportamiento de la temperatura y comparar con las condiciones anteriores

iii) Control proporcional integral derivativo

39. Correr la simulación predisponiendo el módulo "Transfer Fcn3" con la siguiente función:

$$\frac{20s^2 + 10s + 0.5}{0.03s^2 + s}$$

40. Describir el comportamiento de la temperatura y comparar con las condiciones anteriores.
41. Cierre los programas y apague la computadora.

Análisis de Resultados

1. Mencione y explique las características principales del control proporcional, proporcional-integral y proporcional-integral-derivativo.
2. Justifique el por qué el control integral corrige el error estacionario que no logra solo el control proporcional.
3. Si un sistema de cuarto orden presenta sobreimpulsos que cambiaría en el control PID para hacer que el sistema los reduzca y que implicaría esa corrección.
4. ¿Sería necesario más ajuste al aplicar el método de Ziegler-Nichols a un sistema? ¿De qué dependen esos ajustes si son necesario.
5. Presente las gráficas obtenidas con MATLAB y las preguntas realizadas en el procedimiento.

Investigación Complementaria

- ◆ Investigue si la siguiente afirmación es cierta: El controlador PI puede mejorar la estabilidad relativa y el error en estado estable al mismo tiempo, pero el tiempo de crecimiento se incrementa.
- ◆ Investigue sobre otros métodos de calibración PID.

Bibliografía

- INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA. Tercera Edición. Prentice Hall.
Katsuhiko Ogata, Biblioteca UDB, Clasificación: Libro interno 629.8 O34 1998
- SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO. Séptima Edición. Prentice Hall.
Benjamín Kuo, Biblioteca UDB, Clasificación: 621.3811 K95 1996
- SISTEMAS DE CONTROL LINEAL. Primera Edición en Español. McGraw Hill.
Charles Rohrs, Biblioteca UDB, Clasificación: Libro 621.3811 R739 1994

Guía 6: Controladores tipo P, PI y PID

Alumno:

Puesto No:

Docente:

GL:

Fecha:

EVALUACION					
	%	1-4	5-7	8-10	Nota
CONOCIMIENTO	25	Conocimiento deficiente de los siguientes fundamentos teóricos: -Características de los controladores tipo P -Características de los controladores tipo PI. -Características de los controladores tipo PID.	Conocimiento y explicación incompleta de los fundamentos teóricos.	Conocimiento completo y explicación clara de los fundamentos teóricos.	
APLICACIÓN DEL CONOCIMIENTO	70	Cumple con uno de los siguientes criterios: -Puede simular sistemas de control P, PI y PID con Simulink. -Identifica las características de cada controlador a partir de las gráficas. -Calibra correctamente un controlador PID con el método de Ziegler-Nichols.	Cumple con dos de los criterios.	Cumple con los tres criterios.	
ACTITUD	2.5	Es un observador pasivo.	Participa ocasionalmente o lo hace constantemente pero sin coordinarse con su compañero.	Participa propositiva e integralmente en toda la práctica.	
	2.5	Es ordenado pero no hace un uso adecuado de los recursos.	Hace un uso adecuado de lo recursos, respeta las pautas de seguridad, pero es desordenado.	Hace un manejo responsable y adecuado de los recursos conforme a pautas de seguridad e higiene.	
TOTAL					