

Facultad: Ingeniería.

Escuela: Electrónica.

Asignatura: Sistemas de Control Automático.

Lugar de ejecución: Instrumentación y Control (Edificio 3, 2da planta). Se hará en dos sesiones

Tema: Sistemas de lazo abierto y lazo cerrado

Objetivo General

- Comprender el funcionamiento de sistemas a lazo abierto y lazo cerrado.

Objetivos específicos

- Explicar el propósito de cada uno de los elementos que constituyen un sistema en lazo abierto y en lazo cerrado.
- Analizar el comportamiento de ambos sistemas ante perturbaciones externas e internas.
- Establecer las diferencias y características principales de ambos sistemas.

Materiales y equipo

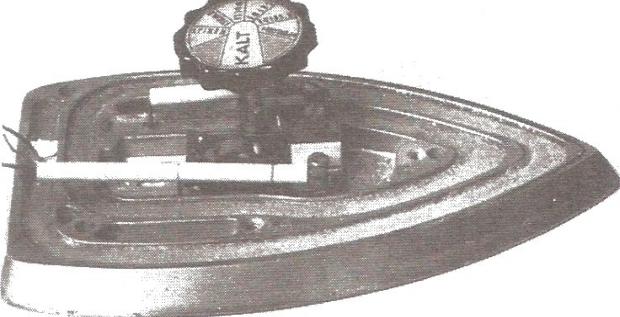
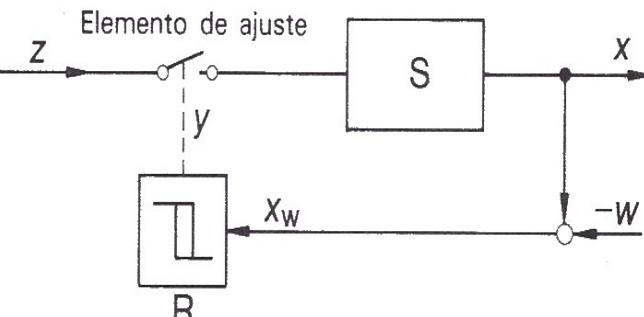
- 1 Fuente de alimentación 15 VCD [SO3538-8D]
- 1 Referencia de voltaje [SO3536-5A]
- 1 Amplificador de potencia [SO3536-7Q]
- 1 Sistema controlado de temperatura [SO3536-8T]
- 1 Sistema motor-generador [SO3536-8S]
- 1 Computadora con Run Intuilinear Data Capture y PicoScope instalado
- 1 Osciloscopio digital [DSO1052B]
- 1 PicoScope 2204A
- 2 Puntas para el osciloscopio DSO1052B
- 2 Puntas para el PicoScope 2204A
- 1 Cable USB tipo A/B.
- 1 Voltímetro de bobina móvil [SO5127-1H]
- 1 Termómetro
- 20 Puentes
- 1 Switch
- 1 Control PID [SO3536-6SO] (o en su lugar 1 sumador [SO3536-6A] y 1 control proporcional [SO3536-5T])
- varios cables.

Introducción Teórica

La particularidad que caracteriza a un buen sistema de control automático es la capacidad de “auto-gobernarse”, ésta puede entenderse como la característica que permite a un sistema, una vez puesto en operación y entre varias cosas, corregir en forma dinámica variaciones de sus parámetros de funcionamiento en un rango aceptable de desviaciones. Esto se logra porque los sistemas de control automático operan utilizando retroalimentación (feedback). La idea es que el sistema monitoree constantemente la señal de salida y la comparé con una señal de referencia, si no son iguales se genera una señal de error y a partir de ésta el sistema actúa intentando corregir la discrepancia.

Un buen ejemplo de “auto-gobernarse” es el control de temperatura de plancha de ropa común. El aspecto externo de una plancha se muestra en la Figura 2.1a. En la Figura 2.1c se observan un esquema simplificado de las partes que la conforman:

- Un elemento calefactor (espiral de caldeo), generalmente un resistor de potencia, este es el elemento que será controlado. En la terminología de control automático se le llama en general “Planta”.

	
(a) Aspecto externo	(b) Diagrama de bloques

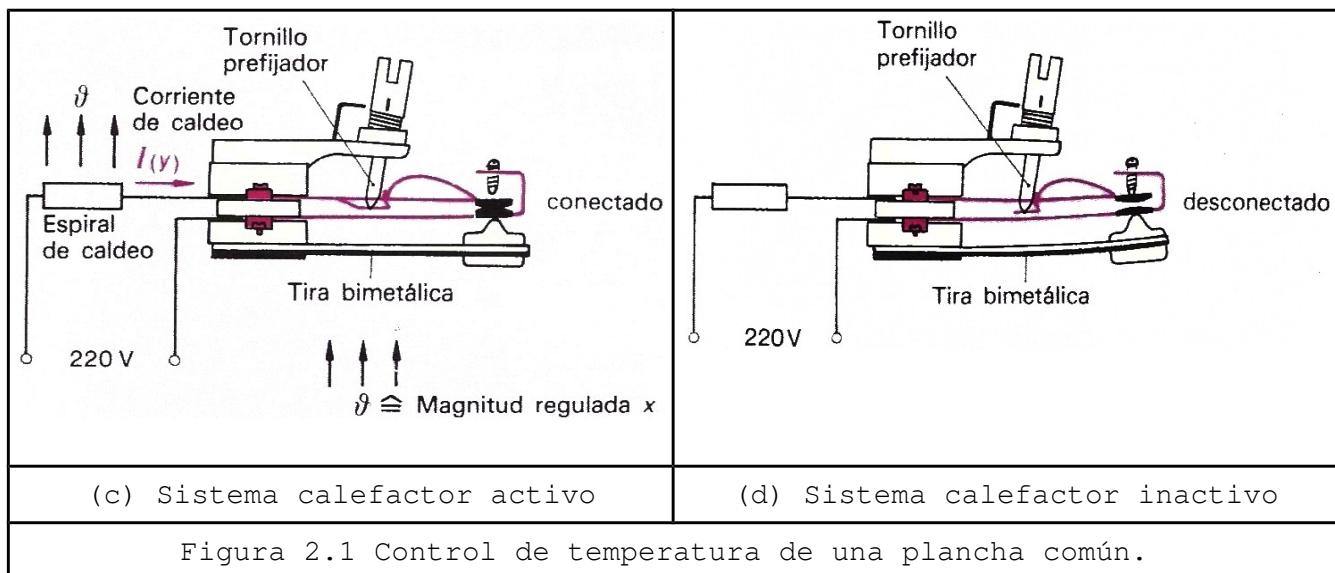


Figura 2.1 Control de temperatura de una plancha común.

- Una tira bimetálica formada por dos piezas de metales diferentes los cuales se expanden al aumentar la temperatura, pero en proporciones diferentes. El efecto anterior se usa para controlar (permitir o bloquear) el paso de la corriente sobre el elemento calefactor.
- Un tornillo (prefijador) que permite ajustar (calibrar) la temperatura a la que se desea operar la plancha y que a la larga incidirá el punto de referencia de la acción de conexión/desconexión de la tira bimetálica.

La operación inicia cuando el usuario, por medio del tornillo calibra a qué temperatura desea planchar (temperatura de referencia). A partir de ahí la corriente comienza a circular por el elemento calefactor generando un incremento de temperatura, que luego de un tiempo determinado hará llegar la superficie de contacto a la temperatura prefijada al inicio del proceso (Figura 2.1c).

Si la situación se mantiene así, el elemento calefactor continuará calentando hasta (posiblemente) dañar el equipo. Es aquí donde el sistema de control interviene al “darse cuenta” que se ha sobrepasado el valor de referencia procede a desconectar el elemento calefactor. El “darse cuenta” sucede porque la temperatura es comparada (por la tira bimetálica) con un valor de referencia fijado en forma indirecta por el tornillo prefijador, lo que se muestra en la Figura 2.1d.

Lo anterior causará, luego de un tiempo determinado, un descenso en la temperatura de la superficie de contacto.

Nuevamente el sistema de control interviene al “darse cuenta” que la temperatura ha descendido bajo un valor mínimo, procediendo a conectar nuevamente el elemento el elemento calefactor. De aquí en adelante el proceso se repite en forma cíclica.

Una representación un poco más abstracta del sistema se muestra en la Figura 2.1b, en la que las

diferentes partes se representan mediante “bloques funcionales”, una práctica muy común en el campo del Control Automático (la nomenclatura empleada en la Figura 2.1b no es la más difundida pero es válida para el ejemplo).

Se puede identificar:

- Bloque “S”: como la planta (el elemento calefactor) cuya salida es la variable que es controlada “W” (en este caso particular la temperatura).
- Un elemento que compara la variable controlada “W” con la variable de referencia “X” (la temperatura de referencia fijada por el tornillo) y genera la señal de error “ X_w ”. Hay que hacer notar que muchas veces no se compara directamente la variable controlada sino que previamente se realiza una conversión usando sensores (transductores) de señal.
- Un elemento de control “R”, llamado en general “el controlador” que indica la acción a tomar, para este ejemplo la conexión/desconexión del elemento calefactor.
- Un “actuador” o elemento de ajuste, que ejecuta directamente la acción ordenada por el controlador, para este ejemplo es un interruptor.

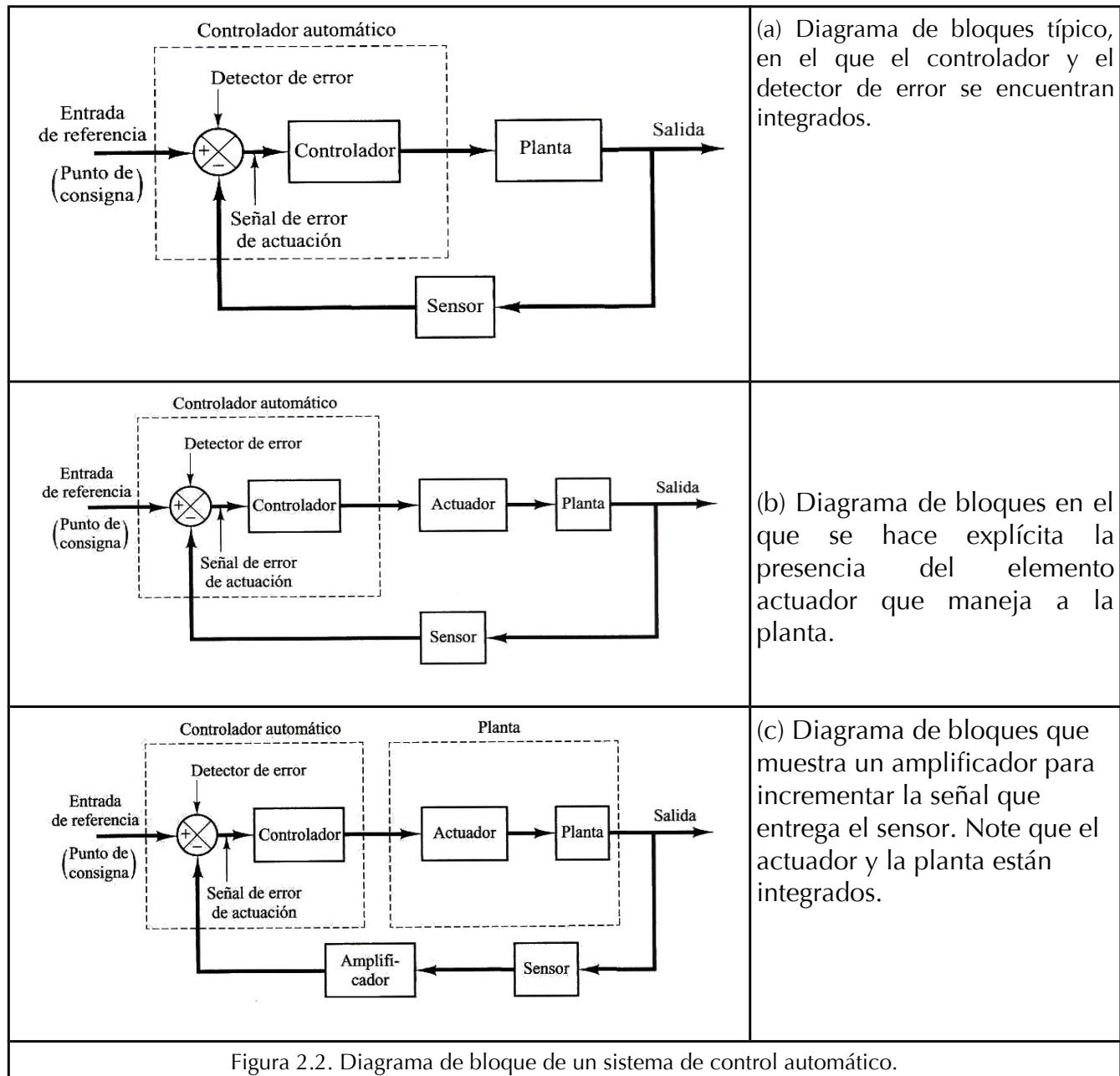
En la Figura 2.2 se muestran diferentes diagramas de bloque. La Figura 2.2a es un diagrama típico en los textos del tema y se caracteriza por su gran nivel de simplificación y trata de resaltar el hecho de poseer retroalimentación. En él se detallan los elementos principales del sistema: la planta, el controlador, el detector de error y el sensor. No muestra muchos de los elementos que son necesarios para que un equipo real trabaje adecuadamente.

En la Figura 2.2b se ha hecho explícita la presencia del actuador, en la práctica el controlador, propiamente dicho, no posee las características (voltaje, corriente, impedancia) necesarias para operar directamente a la planta y por eso se hace necesaria la existencia de un “driver”.

En la Figura 2.2c se muestra que muchas veces las señales que entrega el sensor no tiene las características para ser comparada con la señal de referencia y necesita alguna transformación previa en el caso de la figura una amplificación.

Es importante hacer notar que en los sistemas reales muchas veces algunas de estas funciones están contenidos dentro de un mismo bloque y por tanto no se pueden separar en forma física, pero si de

forma analítica. Podría suceder que el controlador tenga integrado al detector de error o que el actuador del sistema se encuentre integrado en el controlador también podría suceder que la planta posea su propio driver o sus propios sensores.



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, uno de los grupos iniciará con la Parte I y II y el otro grupo con la parte III y IV, luego se intercambian.

PARTE I. SISTEMA TÉRMICO A LAZO ABIERTO

1. Para esta parte armará el sistema que se muestra en la Figura 2.3 y para adquirir las gráficas utilizará el PicoScope, revise que los materiales y equipos indicados se encuentren ya colocados en su puesto de trabajo. En caso contrario, informe de ello al docente de laboratorio.

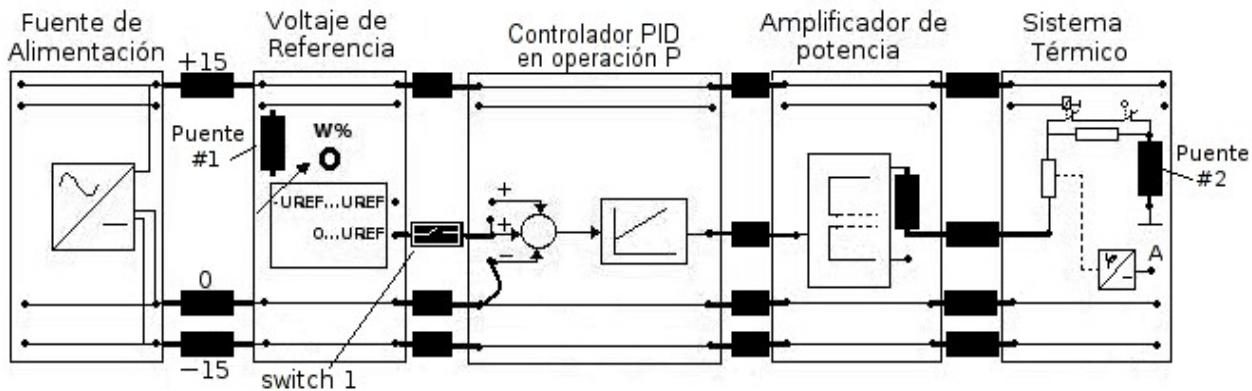


Figura 2.3. Sistema Térmico de lazo abierto.

2. Una vez armado el sistema reduzca al mínimo las perillas tanto del voltaje de referencia (Set point Value) como las del controlador, si está ocupando un módulo de controlador PID, debe dejar solamente la operación P, para ello coloque los interruptores de la parte superior (AB(D) y AB(I)) hacia arriba, no olvide conectar el puente #1, puente #2 y switch 1 indicados en la figura.
3. Abra tanto el switch 1 como el interruptor que cortocircuita la resistencia dentro del módulo de temperatura (abierto es hacia arriba).
4. Encienda la fuente de alimentación y quite el puente #2 (Ver Figura 2.3) para evitar que le llegue energía al sistema en lo que se está ajustando.
5. Cierre el switch 1 y conecte el voltímetro (escala de 10VDC) a la salida del módulo “Amplificador de potencia” y a 0V, ajuste este voltaje hasta obtener 8.0 VDC, para ello primero coloque la perilla del voltaje de referencia (SET POINT) al 100%, luego se debe ajustar KP para obtener el voltaje deseado, colocando la escala de este en x1 y después aumente lentamente la perilla KP hasta llegar a 8.0 VDC (80 °C según transductor).
6. Una vez ajustado este voltaje, abra de nuevo el switch 1 y conecte el puente #2
7. Conecte el canal A del PicoScope a la entrada positiva del punto suma (que es la misma donde está conectado el switch 1) y el canal B a la salida del “transductor temperatura/voltaje” (punto etiquetado como A en la Figura 2.3). No olvide conectar el terminal de tierra de una de las puntas a 0V en el sistema y si está utilizando puntas con atenuación colocar el selector de estas en 1X.
8. Conecte el PicoScope a la computadora, abra el programa PicoScope y realice los siguientes

ajustes:

- Escala de tiempo: 20 s/div
- Canal A: $\pm 20V$
- Canal B: $\pm 20V$
- Solamente si está utilizando puntas del osciloscopio Agilent/Keysight coloque en el software que la sonda del canal correspondiente será **x10**

9. Obtenga la gráfica de la respuesta al escalón del sistema (cerrando el switch 1 en un momento determinado).
10. Deje que la gráfica termine en la pantalla y vuelva a iniciar para estar seguro que la señal se ha estabilizado, cuando esto ocurra, **simule una perturbación externa cerrando el interruptor que cortocircuita la resistencia en el sistema de control de temperatura.**
11. Observe el voltaje a la salida del módulo amplificador de potencia, ¿subió, bajó o se mantuvo? _____

-
12. Cuando la temperatura vuelva a estabilizarse detenga la graficación y guarde la imagen de las gráficas en la computadora.
 13. Abra tanto el interruptor que cortocircuita la resistencia como el switch 1.
 14. Según la gráfica obtenida indique el valor de voltaje equivalente a la temperatura ambiente $V_{amb}= \underline{\hspace{2cm}} V$, el valor de voltaje equivalente al valor de la temperatura de estabilización antes de aplicada la perturbación $V_{ss}= \underline{\hspace{2cm}} V$ y el valor de voltaje equivalente a la temperatura de estabilización luego de aplicada la perturbación (temperatura de desviación) $V_{DES}= \underline{\hspace{2cm}} V$.
 15. Mida la temperatura ambiente con el termómetro y anótela: $T_{amb}= \underline{\hspace{2cm}} ^\circ C$. Si esa es la temperatura ambiente verdadera ¿Cuál es la temperatura real que se muestra en la gráfica al estabilizarse la temperatura antes de aplicarse la perturbación $T_{ss}= \underline{\hspace{2cm}} ^\circ C$ y luego al estabilizarse después de aplicada la perturbación (temperatura de desviación) $T_{DES}= \underline{\hspace{2cm}} ^\circ C$?
 16. Calcule el porcentaje de regulación de esta perturbación externa con la ecuación mostrada a continuación

$$\%R = \left| \frac{T_{ss} - T_{DES}}{T_{ss}} \right| \times 100 \quad Ecuación\ 2.1$$

$$\%R(\text{ext.}) = \underline{\hspace{2cm}} .$$

17. Si el sistema se encuentra ya en temperatura ambiente, simule una perturbación interna que generará un incremento en el valor de salida de la planta, para ello aumente en 10% el valor de **K_p** con respecto al valor actual, es decir que el multímetro muestre aproximadamente 8.8 VDC, no olvide retirar el puente #2 mientras hace el ajuste y de volverlo a colocar cuando haya finalizado.
18. Obtenga la gráfica de la respuesta al escalón del sistema (cerrando el switch 1 en un momento determinado), cuando el valor de temperatura se haya estabilizado detenga la graficación, Indique el valor de voltaje equivalente a la temperatura cuando se alcanzó la estabilización (temperatura de desviación) $V_{DES}= \underline{\hspace{2cm}} V$ y calcule el valor real de esta temperatura $T_{DES}= \underline{\hspace{2cm}} ^\circ C$, guarde las gráficas en la computadora.

19. Repita el mismo procedimiento pero ahora disminuyendo K_p en un 10% (7.2VDC en el multímetro), obtenga el voltaje equivalente a la temperatura de desviación $V_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} V$ y el valor real de esta temperatura $T_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} ^\circ C$. Guarde las gráficas en la computadora.

20. Indique cómo se comporta el sistema ante las perturbaciones internas y calcule el porcentaje de regulación de ambas:

$$\%R(\text{int. } 8.8V) = \underline{\hspace{2cm}} . \quad \%R(\text{int. } 7.2V) = \underline{\hspace{2cm}} .$$

PARTE II. SISTEMA TÉRMICO A LAZO CERRADO

21. Abra el switch 1 y espere a que el sistema se enfrie a temperatura ambiente.

22. Para cerrar el lazo de realimentación la entrada negativa del punto suma ya no debe estar conectada a 0V sino que debe ir a la salida del transductor temperatura/voltaje, cambie esta conexión y repita los pasos del 4 al 10 de la parte I.

23. Observe el voltaje de salida del módulo amplificador de potencia en presencia de la perturbación. ¿Qué puede concluir?

24. Repita los pasos del 12 al 19.

$$V_{amb} = \underline{\hspace{2cm}} V \quad V_{ss} = \underline{\hspace{2cm}} V \quad V_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} V \\ T_{amb} = \underline{\hspace{2cm}} ^\circ C$$

$$\text{Perturbación Externa: } T_{ss} = \underline{\hspace{2cm}} ^\circ C \quad T_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} ^\circ C .$$

$$\%R(\text{ext.}) = \underline{\hspace{2cm}} .$$

$$\text{Perturbación Interna (8.8V): } V_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} V \quad T_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} ^\circ C$$

$$\text{Perturbación Interna (7.2V): } V_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} V \quad T_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} ^\circ C$$

25. Indique cómo se comporta el sistema ante las perturbaciones internas y calcule el porcentaje de regulación de ambas:

$$\%R(\text{int. } 8.8V) = \underline{\hspace{2cm}} . \quad \%R(\text{int. } 7.2V) = \underline{\hspace{2cm}} .$$

26. Reduzca todas las perillas del voltaje de referencia y del controlador P o PID al mínimo y apague la alimentación en todos los equipos utilizados.

27. Desconecte los equipos, apague la computadora y deje ordenado su lugar de trabajo.

PARTE III. SISTEMA ELÉCTRICO A LAZO ABIERTO.

28. Para esta parte armará el sistema que se muestra en la Figura 2.4 y para adquirir las gráficas utilizará el osciloscopio DSO1052B, revise que los materiales y equipos indicados se encuentren ya colocados en su puesto de trabajo. En caso contrario, informe de ello al docente de laboratorio.

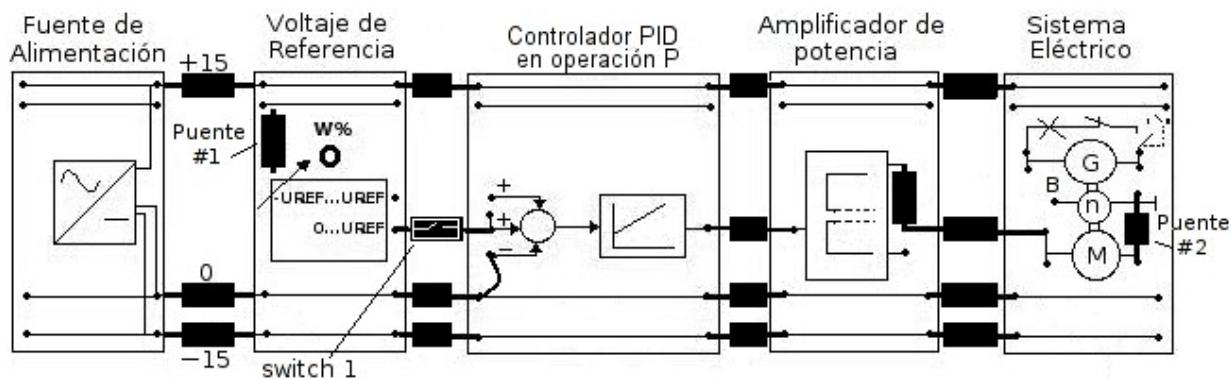


Figura 2.4. Sistema Eléctrico en lazo abierto.

29. Una vez armado el sistema reduzca al mínimo las perillas tanto del voltaje de referencia (Set point Value) como las del controlador, si está ocupando un controlador PID, debe dejar solamente la operación P, para ello coloque los interruptores de la parte superior (AB(D) y AB(I)) hacia arriba, no olvide conectar el puente #1, puente #2 y switch 1 indicados en la figura.
30. Abra tanto el switch 1 que se colocó entre el voltaje de referencia y el controlador PID como el interruptor ubicado en la esquina superior derecha del módulo motor-generador (colóquelo en 0).
31. Encienda la fuente de alimentación y conecte el voltímetro (escala de 10VDC) a la salida del transductor de velocidad/voltaje (punto etiquetado como B en la Figura 2.4) y a 0V.
32. Ajuste este voltaje hasta obtener 4000 RPM (la razón de este transductor es de 1V=1000RPM), para ello cierre el switch 1, coloque la perilla del voltaje de referencia al 70%, luego se debe ajustar KP para obtener el voltaje deseado, para ello colóquelo en escala x1 y luego aumente lentamente la perilla KP hasta llegar a 4.0 VDC.
33. Una vez ajustado este voltaje abra de nuevo el switch 1 y conecte el canal 1 del osciloscopio a la entrada positiva del punto suma (la misma donde está conectado el switch 1) y el canal 2 a la salida del “transductor velocidad/voltaje”. No olvide conectar el terminal de tierra de una de las puntas a 0V en el sistema y si está utilizando puntas con atenuación colocar el selector de estas en 10X.
34. Encienda el osciloscopio y realice los siguientes ajustes:
- Escala de tiempo: 1.00 s/
 - Referencia de voltaje: Penúltima linea horizontal de la pantalla
 - Escala de voltaje canal 1: 2.00V/

- Escala de voltaje canal 2: 2.00V/
 - Persistencia: Infinito
35. Obtenga la gráfica de la respuesta al escalón del sistema (cerrando el switch 1 en un momento determinado, esta vez debe hacerlo con mayor rapidez ya que esta planta tiene una respuesta muy rápida y por ello se ha ajustado la escala del osciloscopio a 1s).
36. Deje que la gráfica termine en la pantalla del osciloscopio y vuelva a iniciar para estar seguro que la señal se ha estabilizado, cuando esto ocurra, **simule una perturbación externa conectando el generador al motor cerrando el interruptor ubicado en la esquina superior derecha del módulo.** Cuando la velocidad vuelva a estabilizarse detenga la graficación y guarde la gráfica en la computadora.
37. Explique el comportamiento de la gráfica: _____.
38. En la gráfica obtenga el valor de voltaje equivalente a la velocidad en estado estable antes de aplicar la perturbación $V_{SS} = \underline{\hspace{2cm}} V$ y luego obtenga el valor de velocidad equivalente $\omega_{SS} = \underline{\hspace{2cm}} RPM$.
39. Obtenga también el valor de voltaje equivalente al de la desviación máxima de velocidad luego de aplicada la perturbación $V_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} V$ y luego obtenga el valor de velocidad equivalente $\omega_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} RPM$.
40. Calcule el porcentaje de regulación bajo estas condiciones

$$\%R = \left| \frac{\omega_{SS} - \omega_{DES}}{\omega_{SS}} \right| \times 100 \quad Ecuación\ 2.2$$

$\%R = \underline{\hspace{2cm}}$.

PARTE IV. SISTEMA ELÉCTRICO EN LAZO CERRADO.

41. Abra el switch 1 y el interruptor ubicado en la esquina superior derecha del módulo motor-generador (colóquelo en 0).
42. Para cerrar el lazo de realimentación la entrada negativa del punto suma ya no debe estar conectada a 0V sino que debe ir a la salida del transductor velocidad/voltaje, cambie esta conexión y repita los pasos del 31 al 40 de la parte III.

$$V_{SS} = \underline{\hspace{2cm}} V \qquad \omega_{SS} = \underline{\hspace{2cm}} RPM.$$

$$V_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} V \qquad \omega_{DES} = \underline{\hspace{2cm}} RPM.$$

$$\%R = \underline{\hspace{2cm}}.$$

43. Observe cuidadosamente las gráficas de lazo abierto y lazo cerrado. ¿Qué puede concluir?
-
-

44. Reduzca todas las perillas del voltaje de referencia y del controlador P o PID al mínimo y apague la alimentación en todos los equipos y módulos utilizados.
45. Desconecte los equipos y deje ordenado su lugar de trabajo.

Análisis de Resultados

1. Tomando como referencia la Figura 2.2c y los elementos que utilizó para implementar el control de temperatura dibuje un diagrama de bloques específico del sistema, indicando a qué parte genérica pertenecen.
2. Repita el paso anterior para el sistema del motor.
3. Explique cómo el control de lazo cerrado corrige el error.
4. Presente las gráficas, cálculos y las respuestas a las preguntas del procedimiento de la guía.

Investigación Complementaria

1. Investigue sobre los efectos que la realimentación tiene sobre la estabilidad, ancho de banda, ganancia global, perturbaciones y sensibilidad del sistema.
2. ¿En qué casos sería conveniente un control de lazo abierto en lugar de uno en lazo cerrado? Ilustre con un ejemplo.

Bibliografía

- Ogata, K., (2010), *Ingeniería de Control Moderna*, Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- Kuo, B., (1996), *Sistemas de Control Automático*, México DF, México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.

Hoja de cotejo: 2

Guía 2: Sistemas de lazo abierto y lazo cerrado

Alumno:

Puesto No:

Docente:

GL:

Fecha:

EVALUACIÓN

	%	1-4	5-7	8-10	Nota
CONOCIMIENTO	25	Conocimiento deficiente de los siguientes fundamentos teóricos: -Elementos que componen un sistema de control. -Funcionamiento de los sistemas a lazo abierto. -Funcionamiento de los sistemas a lazo cerrado.	Conocimiento y explicación incompleta de los fundamentos teóricos.	Conocimiento completo y explicación clara de los fundamentos teóricos.	
APLICACIÓN DEL CONOCIMIENTO	70	Cumple con uno o ninguno de los siguientes criterios: -Obtiene la gráfica de un sistema a lazo abierto y sabe como interpretarla. -Obtiene la gráfica de un sistema a lazo cerrado y sabe como interpretarla. -Calcula el porcentaje de regulación a partir de las gráficas.	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 los 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					